UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Otimização da secagem e dos parâmetros de pirólise na produção de biochar com resíduos do fruto de *Cocos nucifera* L

Evânderson Luis Capelête Evangelista
Magister Scientiae

VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025

EVÂNDERSON LUIS CAPELÊTE EVANGELISTA

Otimização da secagem e dos parâmetros de pirólise na produção de biochar com resíduos do fruto de *Cocos nucifera* L

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Angelica de C. O. Carneiro

Coorientador: Joao G. Meza Ucella Filho

VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T

E92o
2025

Evangelista, Evanderson Luis Capelete, 1992-

Otimização da secagem e dos parâmetros de pirólise na produção de biochar com resíduos do fruto de *Cocos nucifera* L. / Evanderson Luis Capelete Evangelista. – Viçosa, MG, 2025.

1 dissertação eletrônica (107 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, 2025.

Referências bibliográficas: f. 102-105.

DOI: https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.545

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Pirólise. 2. Biochar. 3. Créditos de carbono. 4. Biomassa vegetal. I. Carneiro, Angélica de Cássia Oliveira, 1974-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 22. ed. 634.9867

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB-6/2552

EVÂNDERSON LUIS CAPELÊTE EVANGELISTA

Otimização da secagem e dos parâmetros de pirólise na produção de biochar com resíduos do fruto de *Cocos nucifera* L

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 15 de julho de 2025.

Assentimento:

Evânderson Luis Capelête Evangelista
Autor

Angelica de Cassia Oliveira Carneiro
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 07/10/2026 às 21:46:59 e pela orientadora em 12/10/2026 às 19:18:49. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse https://siadoc.ufv.br/validar-documento. No campo 'Código de registro', informe o código **Q78Y.2YU2.N4MN** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Agradeço, primeiramente, a Deus por me dar forças para que eu pudesse concluir mais esta etapa da minha vida.

Agradeço à minha família, especialmente aos meus irmãos Daniele, Denis e Helder; ao meu pai, Helder, por todo o suporte para que eu pudesse concluir meus estudos; e à minha mãe, Laurita, que foi quem mais confiou em mim, cuidou de mim e acreditou em meu potencial durante toda a minha vida.

Agradeço à minha namorada, Dandara, por todo o carinho, amor e apoio ao longo desse processo. Foram noites viradas e fins de semana de trabalho para concluir esta etapa.

Agradeço à professora Cassinha pela amizade, orientação, conselhos e confiança depositada em mim, bem como pelas oportunidades proporcionadas, que me permitiram crescer pessoal e profissionalmente.

Agradeço aos meus amigos mais antigos e aos novos que fiz ao longo desse caminho pelo companheirismo, tanto nos momentos bons quanto nos difíceis.

Agradeço à equipe do LAPEM, aos professores e estagiários, pelo suporte ao longo deste trabalho. Em especial, agradeço a toda a equipe dos forninhos; ao Salvio Moiado, ao Eder e ao Braulio, pela ajuda na coleta, no preparo do material e nas carbonizações; ao Chico Bezerra, por estar sempre disposto a ajudar quando precisávamos de algo no sítio de pesquisa; e à Edna, à Fernanda e ao Lawrence, pela ajuda na execução das análises.

Agradeço ao professor João pela coorientação e pelo auxílio no desenvolvimento do projeto, à professora Iara e aos professores Vinicius e Aylson por aceitarem participar da banca de defesa e pelas contribuições para o aprimoramento deste trabalho.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal (PPGCF) e ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) pelo apoio institucional e pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.

Agradeço, ainda, à Agricultura BioAtiva, à Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII) e ao Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas

Empresas (SEBRAE) pelo apoio financeiro ao projeto.

RESUMO

EVANGELISTA, Evânderson Luis Capelête, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2025. **Otimização da secagem e dos parâmetros de pirólise na produção de biochar com resíduos do fruto de *Cocos nucifera* L**. Orientadora: Angelica de Cassia Oliveira Carneiro. Coorientador: Joao Gilberto Meza Ucella Filho.

A geração de resíduos provenientes do fruto de *Cocos nucifera* L. (coco verde), associada ao elevado teor de umidade e à lenta decomposição dessa biomassa, representa um desafio para seu manejo e aproveitamento. Entretanto, suas características lignocelulósicas possibilitam sua valorização por processos de conversão termoquímica, especialmente para a produção de biochar. Esta dissertação teve como objetivo avaliar o aproveitamento dos resíduos do fruto de Cocos nucifera L. para a produção de biochar, considerando a caracterização e o pré-processamento da biomassa e diferentes condições e sistemas de pirólise. O estudo foi desenvolvido em três etapas complementares. Na primeira, foram caracterizadas as propriedades físico-químicas da biomassa e avaliadas estratégias de secagem natural e artificial. O resíduo apresentou 45,84% de carbono, 31,77% de lignina total e elevada umidade inicial, de 847,92% em base seca. Na secagem natural, o coco seccionado disposto em uma única camada apresentou o menor tempo para atingir 40% de umidade em base seca, correspondente a 35 dias. Na secagem artificial, o aumento da temperatura promoveu maior velocidade de redução da umidade, com destaque para 140 °C. O modelo de Midilli apresentou o melhor ajuste às curvas de secagem natural e artificial. Na segunda etapa, avaliou-se a produção de biochar em sistema forno-fornalha em escala piloto, utilizando temperaturas finais de carbonização de 350, 400 e 500 °C. O aumento da temperatura reduziu o rendimento gravimétrico e o teor de materiais voláteis e aumentou o teor de carbono fixo e o desenvolvimento da estrutura porosa. O biochar produzido a 500 °C apresentou 75,38% de carbono fixo, razões H/C e O/C de 0,270 e 0,143, respectivamente, e área superficial específica de 84,26 m^2 g^1. O sistema mostrou-se tecnicamente viável para a conversão dos resíduos de coco verde, embora tenham sido identificadas possibilidades de aprimoramento do controle térmico. Na terceira etapa, foram avaliadas temperaturas de pirólise de 400, 500 e 600 °C e tempos de residência de 30, 60 e 90 minutos em forno elétrico tipo mufla. A temperatura exerceu maior influência sobre as propriedades do biochar do que o tempo de residência. Entre as condições avaliadas, a pirólise a 600 °C por 30 minutos apresentou o melhor equilíbrio entre as características do material e o menor tempo de processamento, resultando em biochar com 80,52% de

carbono fixo, pH de 10,13, razões H/C e O/C de aproximadamente 0,26 e 0,15, respectivamente, e capacidade de troca catiônica de 432 mmolc kg^{1}. Em conjunto, os resultados demonstram que os resíduos do coco verde apresentam potencial para a produção de biochar tanto em sistemas de menor complexidade tecnológica quanto em condições controladas de pirólise, e evidenciam a importância da secagem, da temperatura e do controle operacional para a obtenção de materiais com características de interesse agronômico e para o armazenamento de carbono.

Palavras-chave: pirólise; economia circular; descarbonização ; crédito de carbono.

ABSTRACT

EVANGELISTA, Evânderson Luis Capelête, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2025. **Optimization of drying and pyrolysis parameters in biochar production from *Cocos nucifera* L. fruit residues**. Adviser: Angelica de Cassia Oliveira Carneiro. Co-adviser: Joao Gilberto Meza Ucella Filho.

The generation of residues from *Cocos nucifera* L. fruits (green coconut), associated with the high moisture content and slow decomposition of this biomass, represents a challenge for its management and utilization. However, its lignocellulosic characteristics enable its valorization through thermochemical conversion processes, especially for biochar production. This dissertation aimed to evaluate the use of Cocos nucifera L. fruit residues for biochar production, considering biomass characterization and preprocessing as well as different pyrolysis conditions and systems. The study was conducted in three complementary stages. In the first stage, the physicochemical properties of the biomass were characterized, and natural and artificial drying strategies were evaluated. The residue contained 45.84% carbon and 31.77% total lignin and showed a high initial moisture content of 847.92% on a dry basis. Under natural drying, sectioned coconuts arranged in a single layer required the shortest time to reach 40% moisture content on a dry basis, corresponding to 35 days. Under artificial drying, increasing temperature promoted a faster reduction in moisture content, particularly at 140 °C. The Midilli model provided the best fit to both natural and artificial drying curves. In the second stage, biochar production was evaluated in a pilot-scale kiln-furnace system at final carbonization temperatures of 350, 400, and 500 °C. Increasing temperature reduced gravimetric yield and volatile matter content while increasing fixed carbon content and the development of the porous structure. Biochar produced at 500 °C showed 75.38% fixed carbon, H/C and O/C ratios of 0.270 and 0.143, respectively, and a specific surface area of 84.26 m^2 g^{-1}. The system proved technically feasible for converting green coconut residues, although opportunities for improving thermal control were identified. In the third stage, pyrolysis temperatures of 400, 500, and 600 °C and residence times of 30, 60, and 90 minutes were evaluated in an electric muffle furnace. Temperature had a greater influence on biochar properties than residence time. Among the evaluated conditions, pyrolysis at 600 °C for 30 minutes provided the best balance between material characteristics and shorter processing time, resulting in biochar with 80.52% fixed carbon, pH 10.13, H/C and O/C ratios of approximately 0.26 and 0.15, respectively, and a cation exchange capacity of 432 mmolc kg^{-1}. Overall, the results demonstrate that green

coconut residues have potential for biochar production in both lower-complexity technological systems and controlled pyrolysis conditions, highlighting the importance of drying, temperature, and operational control for obtaining materials with characteristics of agronomic interest and potential for carbon storage.

Keywords: pyrolysis; circular economy; decarbonization; carbon credit

SUMÁRIO

RESUMO 7
ABSTRACT 8
INTRODUÇÃO GERAL 11
REFERÊNCIAS 14
CAPÍTULO 1 - CARACTERIZAÇÃO E SECAGEM DO RESÍDUO DO FRUTO DE *COCOS NUCIFERA* L. VISANDO CONVERSÕES TERMOQUÍMICAS 16
RESUMO 16
1 INTRODUÇÃO 17
2 OBJETIVOS 19
2.1 OBJETIVO GERAL 19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 19
3 MATERIAL E MÉTODOS 20
3.1 PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA 20
3.2 OBTENÇÃO DAS CURVAS DE SECAGEM NATURAL E ARTIFICIAL 21
3.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL 25
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 26
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA 26
4.2 ESTUDO DE SECAGEM NATURAL DOS RESÍDUOS DE COCO VERDE 27
4.3 ESTUDO DE SECAGEM ARTIFICIAL DOS RESÍDUOS DE COCO VERDE 32
5 CONCLUSÃO 36
REFERÊNCIAS 37
CAPÍTULO 2 – PRODUÇÃO DE BIOCHAR DE RESÍDUOS DO FRUTO DE *C*OCOS NUCIFERA L. EM SISTEMA FORNOS-FORNALHA 43
RESUMO 43
1 INTRODUÇÃO 44
2 OBJETIVOS 46
2.1 OBJETIVO GERAL 46
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 46
3 MATERIAL E MÉTODOS 47
3.1 DESCRIÇÃO DA MATÉRIA PRIMA 47
3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA FORNOS-FORNALHA 47
3.3 CARBONIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE COCO VERDE NO SISTEMA FORNOS-FORNALHA 49
3.4 PROPRIEDADES DO BIOCHAR 52
3.5 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL 54

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 55
4.1 Perfil térmico do forno de carbonização 55
4.2 Rendimento e propriedades dos biochar 58
5 CONCLUSÃO 69
REFERÊNCIAS 70
CAPÍTULO 3 - VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DO FRUTO DE *Cocos nucifera* L. PARA PRODUÇÃO DE BIOCHAR: INFLUÊNCIA DO TEMPO E DA TEMPERATURA DE PIRÓLISE 76
RESUMO 76
1 INTRODUÇÃO 77
2 OBJETIVOS 79
2.1 Objetivo geral 79
2.2 Objetivos específicos 79
3 MATERIAL E MÉTODOS 80
3.1 Matéria prima 80
3.2 Pirólise em forno elétrico 80
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 84
5 CONCLUSÃO 101
REFERÊNCIAS 102
CONCLUSÃO GERAL 106

INTRODUÇÃO GERAL

A crescente geração de resíduos agroindustriais representa um desafio ambiental relevante, especialmente em países com elevada produção agrícola e florestal. Em escala global, grandes quantidades de resíduos de biomassa ainda são subutilizadas, descartadas, depositadas em aterros ou submetidas à queima direta, o que reduz as possibilidades de aproveitamento de materiais com potencial para geração de produtos de maior valor agregado (Zhou; Wang, 2020; Sun *et al*., 2023).

No Brasil, diversas cadeias produtivas geram volumes expressivos de resíduos lignocelulósicos, entre os quais se encontram aqueles provenientes do processamento e do consumo do coco. Em 2022, o país cultivava cerca de 190 mil hectares de *Cocos nucifera* L., com produção estimada em 2,7 milhões de toneladas de frutos (FAO, 2024). Como aproximadamente 80% da massa do fruto corresponde ao material residual, a cadeia produtiva do coco gera quantidade expressiva de biomassa após o aproveitamento da água e da polpa (Devens *et al*., 2018). O manejo inadequado desse material pode resultar em seu acúmulo em ambientes urbanos e locais de disposição final, enquanto o descarte em vias públicas e praias pode favorecer problemas relacionados à proliferação de vetores, mau cheiro e impactos à saúde pública (Dias *et al*., 2019).

Nesse contexto, a valorização de resíduos lignocelulósicos por meio de processos termoquímicos constitui uma alternativa para reduzir os impactos associados à sua disposição e, simultaneamente, gerar produtos de maior valor agregado. Entre esses processos destaca-se a pirólise, que promove a decomposição térmica da biomassa em condições de disponibilidade limitada de oxigênio, originando frações sólida, líquida e gasosa. A fração sólida rica em carbono, quando produzida com finalidade de aplicação ambiental ou agronômica, é denominada biochar, cujas características são determinadas tanto pelas propriedades da matéria-prima quanto pelas condições utilizadas durante o processo de conversão (Kumar; Saini; Bhaskar, 2020; Vilas-Boas *et al*., 2024).

O interesse pelo biochar está associado às suas propriedades físico-químicas e à possibilidade de estabilização de parte do carbono originalmente presente na biomassa. Durante a pirólise, parte do carbono biogênico é convertida em estruturas mais resistentes à degradação, possibilitando sua permanência por períodos prolongados quando o material é adequadamente produzido e aplicado. Nesse sentido, a produção e utilização de biochar a partir de resíduos de biomassa apresentam potencial para contribuir com estratégias de remoção e armazenamento de carbono (Lefebvre *et al*., 2023).

Além de sua contribuição potencial para o armazenamento de carbono, o biochar pode apresentar características de interesse para aplicações no solo. Dependendo da matéria-prima e das condições de produção, o material pode influenciar propriedades como pH, capacidade de troca catiônica, retenção de água e disponibilidade de nutrientes (Lehmann; Joseph, 2015; Omara *et al*., 2023; Khan *et al*., 2024). Entretanto, essas características não são uniformes entre os biochars. Temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento, características da biomassa e condições do sistema de pirólise podem alterar significativamente o rendimento e as propriedades físicas, químicas e estruturais do produto obtido (Shaaban *et al*., 2013; Zhao *et al*., 2018; Kumar; Saini; Bhaskar, 2020; Vilas-Boas *et al*., 2024).

No caso dos resíduos do fruto de *Cocos nucifera* L., a elevada umidade constitui uma limitação importante para sua utilização em processos de conversão termoquímica. O material recém-gerado pode apresentar teor de umidade superior a 80% em base úmida (Devens *et al*., 2018), aumentando a quantidade de energia necessária para a remoção da água e dificultando etapas relacionadas ao armazenamento, transporte e processamento. Dessa forma, a secagem constitui uma etapa de pré-tratamento importante para adequar a biomassa às etapas subsequentes de conversão termoquímica, sendo a análise desse processo fundamental para a definição de estratégias mais eficientes de aproveitamento de biorresíduos (Barajas Godoy *et al*., 2024). Métodos naturais e artificiais apresentam diferentes implicações quanto ao tempo de processamento, às condições operacionais e à demanda energética, tornando necessária a avaliação de alternativas adequadas às características específicas da biomassa.

Após o pré-processamento, as condições empregadas durante a pirólise tornam-se determinantes para o rendimento e para as propriedades do biochar. Além da temperatura e do tempo de residência, o tipo de reator influencia o controle operacional e a transferência de calor durante o processo. Reatores de rosca sem-fim, fornos rotativos e outros sistemas contínuos têm sido empregados para ampliar a capacidade de processamento e melhorar o controle de parâmetros operacionais em processos de pirólise (Brassard; Godbout; Raghavan, 2017; Soni; Karmee, 2020; Moser *et al*., 2023). Entretanto, a adoção desses sistemas pode exigir maior nível de infraestrutura, mecanização e controle operacional.

Nesse cenário, sistemas em batelada de menor complexidade tecnológica também podem representar alternativas para a conversão de biomassas residuais. O sistema forno-fornalha, empregado tradicionalmente na carbonização de madeira, possibilita a combustão de gases gerados durante a carbonização e tem sido avaliado como alternativa tecnológica para melhoria do processo e de seu balanço de carbono (Schettini *et al*., 2022). Sua adaptação para biomassas agroindustriais pode ampliar as possibilidades de valorização desses resíduos. Em

paralelo, sistemas laboratoriais com maior controle das condições de processo, como fornos elétricos, possibilitam avaliar de maneira mais precisa os efeitos de variáveis como temperatura e tempo de residência, fornecendo informações para a definição de condições de pirólise e para o desenvolvimento futuro de sistemas em maior escala.

Dessa forma, o aproveitamento dos resíduos do fruto de *Cocos nucifera* L. para a produção de biochar requer uma abordagem integrada, abrangendo desde o conhecimento das propriedades da matéria-prima e a redução de seu elevado teor de umidade até a definição das condições de conversão termoquímica e a avaliação das propriedades do material produzido. A análise conjunta dessas etapas permite identificar limitações e condições mais adequadas ao longo da cadeia de processamento, contribuindo para o desenvolvimento técnico do aproveitamento dessa biomassa residual.

Nesse contexto, esta dissertação teve como objetivo geral avaliar, de forma integrada, o aproveitamento dos resíduos do fruto de *Cocos nucifera* L. para a produção de biochar, considerando a caracterização e o pré-processamento da biomassa e diferentes condições e sistemas de pirólise. Para atender a esse objetivo, o estudo foi estruturado em três capítulos complementares. No primeiro, foram caracterizadas as propriedades físico-químicas da biomassa e avaliadas estratégias de secagem natural e artificial. No segundo, foi investigada a produção de biochar em sistema forno-fornalha em escala piloto, considerando diferentes temperaturas finais de carbonização e as propriedades dos materiais produzidos. No terceiro, foram avaliados, em condições controladas de pirólise, os efeitos da temperatura e do tempo de residência sobre o rendimento e as propriedades físico-químicas do biochar. Em conjunto, os estudos fornecem subsídios técnicos para a valorização dos resíduos do coco verde e para o desenvolvimento de processos de produção de biochar em diferentes níveis de controle tecnológico.

REFERÊNCIAS

BARAJAS GODOY, F. D. *et al*. The significance of biowaste drying analysis as a key pre-treatment for transforming it into a sustainable biomass feedstock. **PeerJ**, v. 12, e18248, 2024. DOI: https://doi.org/10.7717/peerj.18248.

BRASSARD, P.; GODBOUT, S.; RAGHAVAN, V. G. S. Pyrolysis in auger reactors for biochar and bio-oil production: a review. **Biosystems Engineering**, v. 161, p. 80-92, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.020.

DEVENS, K. U. *et al*. Characterization of biochar from green coconut shell and orange peel wastes. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 2, p. 288-294, 2018. DOI: https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180022.

DIAS, N. B. *et al*. Aproveitamento da casca de coco verde para uso energético. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 5, n. 3, p. 179-195, 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **FAOSTAT: Crops and livestock products**. 2024. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL. Acesso em: 10 ago. 2024.

KHAN, S. *et al*. Biochar production and characteristics, its impacts on soil health, crop production, and yield enhancement: a review. **Plants**, v. 13, n. 2, 166, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/plants13020166.

KUMAR, A.; SAINI, K.; BHASKAR, T. Hydrochar and biochar: production, physicochemical properties and techno-economic analysis. **Bioresource Technology**, v. 310, 123442, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123442.

LEFEBVRE, D. *et al*. Biomass residue to carbon dioxide removal: quantifying the global impact of biochar. **Biochar**, v. 5, n. 1, 65, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s42773-023-00258-2.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. 2. ed. London: Routledge, 2015.

MOSER, K. *et al*. Screw reactors and rotary kilns in biochar production: a comparative review. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 174, 106112, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106112.

OMARA, P. *et al*. Short-term effect of field application of biochar on cation exchange capacity, pH, and electrical conductivity of sandy and clay loam temperate soils. **Technology in Agronomy**, v. 3, 16, 2023. DOI: https://doi.org/10.48130/TIA-2023-0016.

SHAABAN, A. *et al*. Characterization of biochar derived from rubber wood sawdust through slow pyrolysis on surface porosities and functional groups. **Procedia Engineering**, v. 68, p. 365-371, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.193.

SCHETTINI, B. L. S. *et al*. Furnace-kiln system: how does the use of new technologies in charcoal production affect the carbon balance? **Industrial Crops and Products**, v. 187, 115330, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115330.

SONI, B.; KARMEE, S. K. Towards a continuous pilot scale pyrolysis based biorefinery for production of biooil and biochar from sawdust**. Fuel**, v. 271, 117570, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117570.

SUN, S. *et al*. Dry torrefaction and continuous thermochemical conversion for upgrading agroforestry waste into eco-friendly energy carriers: current progress and future prospects. **Science of the Total Environment**, v. 905, 167061, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167061.

VILAS-BOAS, A. C. M. *et al*. Valorisation of residual biomass by pyrolysis: influence of process conditions on products. **Sustainable Energy & Fuels**, v. 8, n. 2, p. 379-396, 2024. DOI: https://doi.org/10.1039/D3SE01216F.

ZHAO, B. *et al*. Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 977-987, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.013.

ZHOU, C.; WANG, Y. Recent progress in the conversion of biomass wastes into functional materials for value-added applications. **Science and Technology of Advanced Materials**, v. 21, n. 1, p. 787-804, 2020. DOI: https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1848213.

CAPÍTULO 1 - CARACTERIZAÇÃO E SECAGEM DO RESÍDUO DO FRUTO DE *Cocos nucifera* L. VISANDO CONVERSÕES TERMOQUÍMICAS

RESUMO

A elevada umidade dos resíduos do fruto de *Cocos nucifera* L. (coco verde) constitui um dos principais desafios para seu aproveitamento em processos de conversão termoquímica. Este trabalho teve como objetivo caracterizar a biomassa residual do coco verde e avaliar seu comportamento durante a secagem natural e artificial, visando subsidiar sua utilização em processos de conversão termoquímica. Foram determinadas propriedades físicas e químicas da biomassa, incluindo densidade a granel, composição química imediata, elementar e estrutural. Na secagem natural, foram avaliadas diferentes configurações quanto ao seccionamento dos frutos e à disposição em uma ou duas camadas, enquanto a secagem artificial foi conduzida nas temperaturas de 60, 100 e 140 °C. As curvas de secagem foram ajustadas a cinco modelos matemáticos. A biomassa apresentou 45,84% de carbono, 31,77% de lignina total e 0,28% de nitrogênio, além de elevada umidade inicial (847,92% em base seca), ressaltando a importância da secagem como etapa de pré-tratamento. Na secagem natural, o coco seccionado disposto em uma camada apresentou o menor tempo para atingir 40% de umidade em base seca, correspondente a 35 dias, e a maior taxa média de secagem entre as condições avaliadas. Na secagem artificial, as temperaturas de 100 e 140 °C permitiram atingir os teores de umidade estabelecidos em menores períodos, sendo observada maior velocidade de redução da umidade a 140 °C. O modelo de Midilli apresentou o melhor ajuste às curvas de secagem natural e artificial, com maiores valores de R^2 e menores valores de SE e RMSE em todas as condições avaliadas. Os resultados indicam que a configuração do material e a temperatura são fatores relevantes para o comportamento da secagem do resíduo de coco verde e fornecem subsídios para seu pré-processamento visando à conversão termoquímica.

Palavras-chave: Cinética de secagem; Biomassa lignocelulósica; Pré-tratamento.

1 INTRODUÇÃO

A valorização de resíduos agroindustriais tem se consolidado como uma estratégia promissora para a promoção da sustentabilidade em sistemas de produção agrícola e florestal. Entre esses resíduos, destaca-se aquele proveniente do fruto de *Cocos nucifera* L., amplamente cultivado no Brasil, especialmente na região Nordeste. Nessa região, os estados do Ceará, Bahia e Pernambuco concentram cerca de 80% da produção nacional, que totalizou aproximadamente 1,93 bilhão de frutos em 2024, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024).

O processamento do fruto para extração da água e da polpa resulta na geração de grande quantidade de resíduos, uma vez que aproximadamente 80% de sua massa corresponde ao material residual (Devens *et al*., 2018). Quando mal manejado, esse resíduo é comumente descartado em lixões ou aterros sanitários, onde sua decomposição pode levar de 8 a 12 anos, além de liberar metano (CH_4), um gás de efeito estufa com elevado potencial de aquecimento global (Miola, 2020; Pörtner *et al*., 2022). Além disso, o descarte inadequado em vias urbanas e praias favorece a proliferação de vetores transmissores de doenças, provoca mau cheiro e gera impactos negativos à saúde pública, ocasionando também custos indiretos ao poder público (Dias *et al*., 2019).

Diante desse contexto de geração e descarte inadequado de resíduos, a compreensão das características físico-químicas do material torna-se fundamental para viabilizar estratégias de aproveitamento eficiente. Do ponto de vista físico-químico, a casca do coco verde possui composição química heterogênea, além de elevado teor de umidade, que pode alcançar entre 85% e 90% em base úmida (Devens *et al*., 2018; Miola, 2020). Tal característica representa um dos principais entraves à sua conversão termoquímica, uma vez que a elevada umidade compromete o rendimento energético e a eficiência do processo. Isso ocorre porque a água retida na biomassa exige grande quantidade de energia para sua evaporação (Shariff *et al*., 2016; Vilas-Boas *et al*., 2024).

Para superar essas limitações, a secagem da biomassa surge como uma etapa essencial, contribuindo para a viabilidade técnica e econômica de processos de conversão, como a produção de biochar. Além de reduzir o teor de água, as condições empregadas durante a secagem podem influenciar as propriedades da biomassa destinada ao processamento termoquímico (Wróbel *et al*., 2025). A secagem natural apresenta como uma de suas principais vantagens o baixo custo operacional. Contudo, esse método depende de variáveis ambientais, como temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do ar, além de apresentar tempos de

secagem prolongados (Rashid *et al*., 2022). Por outro lado, a secagem artificial em estufas permite maior controle sobre as variáveis do processo, como temperatura, fluxo de ar e tempo de exposição (Babu *et al*., 2018), possibilitando maior previsibilidade e padronização da biomassa seca, o que pode ser particularmente vantajoso em processos industriais e laboratoriais.

Outro fator importante é o conhecimento das propriedades físico-químicas da biomassa, essencial para o planejamento e a implementação de etapas de logística, pré-tratamento e conversão (Cai *et al*., 2017). A composição da biomassa lignocelulósica, que compreende majoritariamente os polímeros estruturais celulose, hemiceluloses e lignina, determina seu comportamento durante a degradação térmica e, consequentemente, influencia a proporção e as características dos produtos gerados (Chen *et al*., 2022; Vilas-Boas *et al*., 2024). A lignina, por ser termicamente mais resistente e apresentar estrutura predominantemente aromática, tende a se decompor mais lentamente, favorecendo a formação da fração sólida durante a pirólise (Chen *et al*., 2022; Batista; Gomes, 2021). Em contraste, a celulose e as hemiceluloses apresentam maior degradação nas faixas de temperatura associadas à liberação de compostos voláteis (Shen *et al*., 2015). Portanto, a proporção relativa desses polímeros na biomassa influencia o rendimento e as características do biochar e dos demais produtos da pirólise (Batista; Gomes, 2021; Vilas-Boas *et al*., 2024).

Nesse sentido, a caracterização do resíduo do coco verde, considerando suas propriedades físicas e químicas, associada à avaliação de sua resposta às diferentes estratégias de secagem, constitui uma etapa fundamental para viabilizar seu aproveitamento em aplicações de maior valor agregado, como a produção de biochar. A caracterização inicial do material permite o estabelecimento de parâmetros para o controle de qualidade, além de subsidiar decisões técnicas quanto ao pré-processamento necessário.

Dessa forma, este estudo busca contribuir para a valorização do resíduo do coco verde por meio de sua caracterização físico-química e da avaliação de seu comportamento durante os processos de secagem natural e artificial, fornecendo subsídios técnicos para o desenvolvimento de estratégias de pré-tratamento mais eficientes para posterior conversão termoquímica e produção de biochar.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Caracterizar a biomassa residual do fruto de *Cocos nucifera* L., com ênfase em suas características físicas e químicas, e avaliar seu comportamento durante a secagem natural e artificial, visando subsidiar a padronização da biomassa para processos de conversão termoquímica.

2.2 Objetivos específicos

a) Caracterizar as propriedades físico-químicas da biomassa residual do fruto de *Cocos nucifera* L., visando subsidiar sua utilização em processos de conversão termoquímica;
b) Avaliar o efeito do seccionamento dos resíduos do fruto de *Cocos nucifera* L. e da disposição da biomassa na pilha sobre a velocidade de secagem natural e as curvas de secagem;
c) Avaliar o efeito da temperatura de secagem artificial dos resíduos do fruto de *Cocos nucifera* L. sobre a velocidade de secagem;
d) Avaliar o desempenho de diferentes modelos matemáticos no ajuste das curvas de secagem dos resíduos do fruto de *Cocos nucifera* L., nas condições de secagem natural e artificial.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Preparo e caracterização da biomassa

A biomassa residual foi obtida junto a vendedores de coco verde no município de Viçosa, MG. Após a coleta, os cocos foram transportados ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), onde o material foi preparado para a caracterização e os ensaios de secagem. Foram selecionados cinco frutos de coco verde para a caracterização da biomassa. Cada fruto foi seccionado ao meio, sendo uma das metades destinada às análises de caracterização.

O teor de umidade, em base seca, foi determinado pelo método de secagem em estufa, com base na TAPPI T 264 cm-22 (TAPPI, 2022). Para essa determinação, foram utilizadas as outras metades dos cocos previamente seccionados. As amostras foram acondicionadas separadamente em estufa com circulação forçada de ar a 105 ± 2 °C, até atingirem massa constante. Após a obtenção da massa final, o teor de umidade em base seca foi calculado conforme a Equação 1.

$$UBS(\%) = \frac{mu-ms}{ms}\ x\ 100 \qquad Equação\ 1$$

Em que:

UBS (%) = teor de umidade, em base seca;

mu (g) = massa úmida da amostra;

ms (g) = massa seca da amostra.

A densidade a granel foi determinada em duas condições: na biomassa após a coleta e na biomassa seca a 100 °C até massa constante, utilizando-se cinco repetições em cada condição. A densidade a granel foi obtida pela razão entre a massa da amostra e o volume ocupado em uma caixa cúbica de madeira de volume conhecido (0,216 m³), adotando-se como referência o princípio descrito na ISO 17828:2015.

Para as análises químicas, as amostras foram previamente moídas e peneiradas, sendo utilizada a fração retida entre as peneiras de 40 e 60 mesh, correspondente a partículas com aproximadamente 0,25 a 0,42 mm.

Os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas foram determinados de acordo com a norma ASTM D1762-84 (2021).

A composição química elementar da biomassa foi determinada utilizando o analisador elementar TruSpec Micro (LECO). Os teores de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) foram determinados conforme a DIN EN ISO 16948:2015, utilizando o módulo TruSpec Micro,

enquanto o teor de enxofre (S) foi determinado conforme a DIN EN ISO 16994:2016, utilizando o módulo TruSpec S. Os teores de C, H, N e S, fornecidos em base seca livre de cinzas, foram convertidos para base seca mediante correção pelo teor de cinzas da biomassa, conforme a DIN EN ISO 16993:2016. O teor de oxigênio (O) foi estimado por diferença, considerando os teores corrigidos de C, H, N e S e o teor de cinzas, conforme a expressão O (%) = 100 – (C + H + N + S + cinzas).

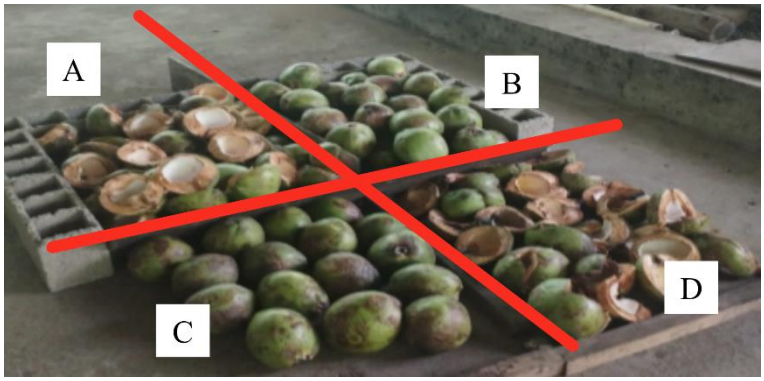
Para a determinação da composição química estrutural, os teores de extrativos foram determinados em duplicata com base em procedimento adaptado da TAPPI T 264 cm-22 (TAPPI, 2022), substituindo-se a solução de etanol/benzeno por etanol/tolueno. Os teores de lignina insolúvel foram determinados em duplicata pelo método Klason, conforme a TAPPI T 222 om-88 (TAPPI, 1999). A lignina solúvel foi determinada por espectrometria, conforme a TAPPI UM 250 (TAPPI, 2000), sendo o teor de lignina total obtido pela soma das frações solúvel e insolúvel. O teor de holoceluloses foi calculado por diferença, conforme a expressão: 100 − (extrativos + lignina total + cinzas).

3.2 Obtenção das curvas de secagem natural e artificial

Para a obtenção da curva de secagem natural dos resíduos do fruto de *Cocos nucifera* L., foram avaliados quatro tratamentos: A) resíduos dos frutos seccionados ao meio, dispostos em duas camadas; B) resíduos dos frutos inteiros, dispostos em duas camadas; C) resíduos dos frutos inteiros, dispostos em uma camada; e D) resíduos dos frutos seccionados ao meio, dispostos em uma camada. Cada camada foi constituída por 16 frutos (Figura 1). Foram selecionadas 10 amostras adicionais para a determinação do teor de umidade inicial, em base seca, utilizado como referência para o acompanhamento da secagem.

As amostras foram dispostas em área coberta e pesadas conjuntamente, por tratamento, em intervalos de sete dias, no período de 16/08/2023 a 25/10/2023. Durante o experimento, foram utilizados dados meteorológicos da estação da Universidade Federal de Viçosa para o monitoramento das condições climáticas, incluindo temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

Figura 1 – Disposição dos resíduos de coco verde nos tratamentos de secagem natural
A) coco seccionado em duas camadas (CS2C); B) coco inteiro em duas camadas (CI2C); C) coco inteiro em uma camada (CI1C); D) coco seccionado em uma camada (CS1C).



Fonte: O autor.

Foi estabelecido um teor de umidade alvo de 40%, em base seca, para os tratamentos de secagem natural, conforme a Deliberação Normativa nº 227/2018 da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais (SEMAD/MG). Ao final do período de secagem natural, os frutos foram submetidos à secagem em estufa com circulação forçada de ar até massa constante, para determinação da massa seca das amostras e posterior cálculo dos teores de umidade ao longo do período experimental.

Para a obtenção das curvas de secagem em estufa com circulação forçada de ar, foram avaliadas três temperaturas: 60, 100 e 140 °C. Para cada temperatura, foram selecionados 10 frutos de coco verde inteiros, os quais foram seccionados ao meio. Uma metade de cada fruto foi utilizada no experimento, totalizando 10 unidades experimentais por temperatura. As amostras foram distribuídas em duas prateleiras da estufa, com cinco unidades em cada uma (Figura 2).

Figura 2 – Distribuição das amostras de coco verde na estufa de circulação forçada de ar



Fonte: O autor.

Os resíduos foram pesados individualmente em intervalos de 24 horas nos tratamentos realizados a 60 e 100 °C e em intervalos de 6 horas no tratamento a 140 °C, até atingirem massa constante. Na secagem artificial, foram definidos dois teores de umidade, em base seca, como referência para o cálculo da taxa de secagem: 40% e 15%. O primeiro correspondeu ao valor adotado para a secagem natural, conforme a DN nº 227/2018 (SEMAD/MG), enquanto o segundo foi adotado como referência para avaliar a secagem da biomassa em uma condição de menor teor de umidade.

As taxas médias de secagem para cada tratamento, tanto na secagem natural quanto na secagem em estufa, foram determinadas conforme a Equação 2.

$$T_s = \frac{(Tu_i - Tu_f)}{t} \qquad Equação\ 2$$

Em que:

T_s: taxa de secagem (% dia^{-1}, para secagem natural, ou % h^{-1}, para secagem artificial);

Tu_i: teor de umidade inicial (%);

Tu_f: teor de umidade final (%);

t: tempo (dias ou horas, conforme o método de secagem).

Com o objetivo de avaliar o comportamento da secagem sob diferentes condições, cinco modelos matemáticos foram ajustados aos dados experimentais, visando identificar aquele com melhor desempenho na descrição das curvas de secagem natural e artificial. Os modelos avaliados estão apresentados na Tabela 1. A escolha dos modelos Midilli, Logarítmico, Henderson e Pabis, Dois Termos e Henderson e Pabis Modificado baseou-se em sua aplicação na descrição da cinética de secagem de produtos e resíduos agrícolas. Esses modelos são classificados como semi-teóricos e empíricos e são amplamente utilizados por permitirem a descrição do comportamento da secagem a partir de dados experimentais (Fernando; Amarasinghe, 2016).

Tabela 1 – Modelos matemáticos avaliados no ajuste das curvas de secagem natural e artificial

Modelo Matemático	**Equação do modelo**	**Referências**
Midilli	$Y = a\ \exp(-b\ t^{c}) + d\ t$	(Midilli; Kucuk; Yapar, 2002)
Logarítmico	$Y = a\ \exp(-k\ t) + b$	(Yagcioglu; Degirmencioglu; Cagatay, 1999)
Henderson e Pabis	$Y = a\ \exp(-k_0\ t)$	(Henderson; Pabis, 1961; Westerman; White; Ross, 1973)
Dois termos	$Y = a\ \exp(-b\ t) + c\ \exp(-d\ t)$	(Henderson, 1974; Rahman; Perera; Thebaud, 1997)
Henderson e Pabis modificado	$Y = a\ \exp(-k\ t) + b\ \exp(-k_0\ t) + c\ \exp(-k_1\ t)$	(Karathanos, 1999)

Fonte: Elaborada pelo autor com base nas referências apresentadas na tabela.

Onde,

Y: teor de umidade em base seca estimado pelo modelo (%);

t: tempo de secagem (dias ou horas);

a, b, c, d, k, k_0 e k_1: parâmetros dos modelos ajustados aos dados experimentais.

Os coeficientes de determinação (R^2), o erro padrão da estimativa (SE) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) foram calculados conforme as Equações 3, 4 e 5, respectivamente, para avaliar o desempenho dos modelos e identificar aquele que apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(Y_i - \hat{Y}_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(Y_i - \bar{Y}\right)^2} \quad \text{Equação 3}$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Y_i - Y)^2}{N - R}} \quad \text{Equação 4}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Y_i - Y)^2}{N}} \quad \text{Equação 5}$$

Onde,

Y_i = teor de umidade em base seca observado (%);

$\hat{Y}_i$ = teor de umidade em base seca estimado pelo modelo (%);

$\bar{Y}$ = teor médio de umidade em base seca observado (%);

N = número de observações;

R = número de parâmetros do modelo.

3.3 Delineamento experimental

O experimento de secagem natural do resíduo de coco verde foi composto por quatro tratamentos, definidos pela combinação do formato do resíduo (inteiro ou seccionado ao meio) e pelo número de camadas (uma ou duas). Os tratamentos com uma camada foram compostos por 16 resíduos cada, enquanto os tratamentos com duas camadas foram compostos por 32 resíduos, considerando 16 resíduos por camada. As unidades de cada tratamento foram pesadas conjuntamente ao longo do período de secagem, e os resultados foram avaliados de forma descritiva.

O experimento de secagem em estufa do resíduo de coco verde foi conduzido em três condições de temperatura, 60, 100 e 140 °C, realizadas separadamente e de forma sequencial. Cada condição foi composta por 10 metades de frutos de coco verde, avaliadas individualmente ao longo do processo de secagem.

O ajuste das curvas de secagem foi realizado por meio de modelos matemáticos não lineares, utilizando o software Curve Expert Professional®, versão 2.7.3. Para avaliar o ajuste dos modelos, foram calculados o coeficiente de determinação (R^2), o erro padrão da estimativa (SE) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE), conforme as Equações 3, 4 e 5. O modelo com o melhor desempenho foi selecionado com base nos maiores valores de R^2 e nos menores valores de SE e RMSE.

A taxa média de secagem foi analisada de forma descritiva, por meio da comparação dos valores obtidos entre as condições avaliadas em cada experimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização da biomassa

Na Tabela 2, são apresentados os resultados das análises físicas e químicas da biomassa residual de coco verde.

Tabela 2 – Propriedades físicas e químicas da biomassa residual de coco verde

Propriedade	Valores médios
Densidade a granel na umidade de coleta ($kg \cdot m^{-3}$)	423,18
Densidade a granel a 0% de umidade ($kg \cdot m^{-3}$)	80,35
Umidade inicial na coleta, base seca (%)	847,92
Umidade inicial na coleta, base úmida (%)	86,92
Teor de materiais voláteis (%)	74,19
Teor de carbono fixo (%)	20,71
Teor de cinzas (%)	5,10
Teor de carbono (%)	45,84
Teor de hidrogênio (%)	5,28
Teor de nitrogênio (%)	0,28
Teor de enxofre (%)	0,15
Teor de oxigênio (%)	43,35
Teor de extrativos totais (%)	26,25
Lignina total (%)	31,77
Teor de holoceluloses (%)	36,88

Fonte: Elaborada pelo autor.

A comparação entre a densidade a granel determinada na umidade de coleta (423,18 $kg \cdot m^{-3}$) e a densidade a granel a 0% de umidade (80,35 $kg \cdot m^{-3}$) evidencia a influência do elevado teor de umidade sobre essa propriedade. Observa-se que a densidade a granel na condição seca é 5,26 vezes inferior àquela obtida no momento da coleta, indicando a expressiva contribuição da água para a massa por unidade de volume da biomassa. Assim, na condição úmida, a água ocupa parte significativa desses vazios, aumentando expressivamente a densidade a granel do material. Esse comportamento ressalta a importância da secagem da biomassa antes das etapas de transporte, visando à redução da massa a ser transportada e à melhoria da eficiência logística.

A lignina é considerada um dos principais componentes estruturais associados à formação de biochar, pois apresenta maior resistência à degradação térmica em comparação à celulose e às hemiceluloses, favorecendo a permanência de frações carbonizadas após a pirólise.

No presente estudo, a biomassa residual de coco verde apresentou teor de lignina total de 31,77%, valor próximo ao reportado por Souza *et al*. (2021) para casca de coco (28,18%). Da mesma forma, os teores de holoceluloses (36,88%) e extrativos totais (26,25%) também se mostraram compatíveis com os valores observados pelos autores (37,79% e 29,81%, respectivamente), indicando similaridade composicional entre os materiais avaliados. Esse comportamento sugere que a biomassa utilizada possui características estruturais potencialmente favoráveis ao processo de carbonização, sobretudo devido ao teor relativamente elevado de lignina, que pode favorecer a formação da fração carbonizada durante a pirólise.

Os teores de carbono fixo (21,6%) e de materiais voláteis (75,5%) observados por Padilla (2023), ao avaliar a casca de coco para produção de biochar com aplicação por injeção em altos-fornos, são semelhantes aos obtidos no presente estudo. No entanto, o teor de cinzas reportado pelo autor (2,9%) foi inferior ao encontrado neste trabalho, sendo aproximadamente 1,8 vezes menor. Segundo Padilla (2023), elevados teores de materiais voláteis associados a baixos teores de carbono fixo são características típicas de biomassas lignocelulósicas *in natura*, o que pode limitar sua utilização direta em processos energéticos. Isso ocorre porque, para fins energéticos, teores mais elevados de carbono fixo são geralmente desejáveis por estarem associados a maior fração carbonácea do material.

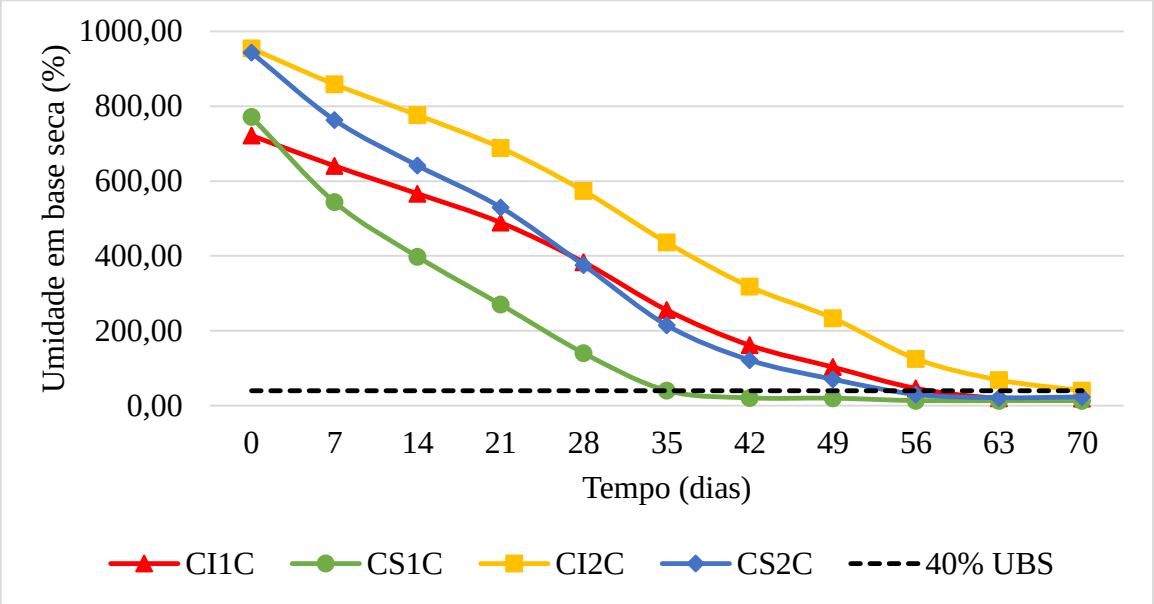
Em relação ao teor de cinzas, essa fração corresponde à porção mineral da biomassa e pode conter elementos como potássio, cálcio, magnésio e fósforo. Por outro lado, quando a biomassa é destinada à conversão termoquímica, teores elevados de cinzas podem ser indesejáveis, devido à possibilidade de ocorrência de problemas operacionais, como incrustações e corrosão, além de interferirem no desempenho do processo (Lin; Chen, 2015; De Almeida *et al*., 2022).

Além disso, a composição elementar da biomassa exerce influência direta no desempenho dos processos termoquímicos. A biomassa avaliada apresentou teor de carbono de 45,84%, valor que se encontra dentro da faixa considerada favorável à produção de biochar, podendo contribuir para maiores rendimentos (Batista; Gomes, 2021). Em contrapartida, o teor de nitrogênio foi de 0,28%, considerado baixo, o que é desejável, uma vez que menores teores de nitrogênio na biomassa tendem a reduzir o potencial de formação de óxidos de nitrogênio (NOx) durante processos termoquímicos, compostos associados à acidificação atmosférica e à formação de ozônio troposférico (Tripathi *et al*., 2016).

4.2 Estudo de secagem natural dos resíduos de coco verde

Os teores médios de umidade inicial, em base seca, dos resíduos de coco verde foram de 954,59% para o tratamento com coco inteiro em duas camadas, 943,57% para o coco seccionado em duas camadas, 721,97% para o coco inteiro em uma camada e 771,54% para o coco seccionado em uma camada. As curvas de secagem natural são apresentadas na Figura 3, e as taxas de secagem até a obtenção de 40% de umidade, em base seca, na Tabela 3.

Figura 3 – Curvas de secagem natural dos resíduos de coco verde



Fonte: O autor.
Legenda: CI1C = coco inteiro em uma camada; CS1C = coco seccionado em uma camada; CI2C = coco inteiro em duas camadas; CS2C = coco seccionado em duas camadas; UBS = umidade em base seca.

Tabela 3 – Taxas médias semanais de secagem e taxas de secagem até a obtenção de 40% de umidade em base seca dos resíduos de coco verde

Semana	Taxa de secagem (% dia^{-1})				T. A. (°C)	U. R. A. (%)	V. V. (m/s)
	CI1C	CS1C	CI2C	CS2C			
1	11,58	32,52	13,66	25,73	18,96	83,49	0,85
2	10,61	20,91	11,79	17,43	18,93	85,41	0,60
3	11,04	18,23	12,48	15,95	20,44	72,99	1,06
4	15,15	18,58	16,47	22,11	19,29	74,26	1,25
5	18,29	14,29	19,71	22,94	20,88	77,42	1,19
6	13,42	2,79	16,84	13,34	23,32	68,02	1,11
7	8,33	0,12	12,04	7,29	21,55	81,54	0,88
8	8,12	0,93	15,53	5,81	24,90	73,02	1,55
9	3,79	0,00	8,05	1,24	23,35	76,83	0,86
10	0,11	0,00	4,12	0,00	21,31	81,36	0,59
Taxa de secagem até atingir 40% UBS	**12,07**	**20,91**	**13,07**	**16,32**	-	-	-

Fonte: O autor.
Legenda: CI1C = coco inteiro em uma camada; CS1C = coco seccionado em uma camada; CI2C = coco inteiro em duas camadas; CS2C = coco seccionado em duas camadas; T.A. = temperatura do ar; U.R.A. = umidade relativa do ar; V.V. = velocidade do vento.

Na Figura 3 e na Tabela 3, observa-se que o tratamento com coco seccionado disposto em uma única camada apresentou o menor tempo de secagem (35 dias) para atingir 40% de umidade em base seca, bem como a maior taxa média de secagem até esse teor de umidade entre as condições avaliadas. Esse resultado pode estar associado à maior área superficial exposta proporcionada pelo seccionamento do fruto, favorecendo a transferência de massa e a remoção de água. Estudos indicam que o aumento da área superficial pode favorecer maiores taxas de secagem ao ampliar a superfície disponível para a evaporação da água (Agbede *et al*., 2023; Barajas Godoy *et al*., 2024).

Além disso, aproximadamente 94% da umidade total do resíduo de coco verde encontra-se concentrada no mesocarpo, camada fibrosa, espessa e altamente porosa responsável pela retenção de água (Narita, 2020). O mesocarpo está situado entre o endocarpo, camada interna rígida e lenhosa, e o epicarpo, camada externa cerosa e impermeável (Luchese; Engel; Tessaro, 2024). Dessa forma, o seccionamento do fruto promove maior exposição do mesocarpo ao ambiente, reduzindo a barreira física imposta pelo epicarpo e favorecendo a remoção da umidade.

O coco seccionado disposto em duas camadas demandou aproximadamente três semanas adicionais para atingir teor de umidade inferior a 40%, quando comparado ao material disposto em camada única. Esse comportamento pode estar relacionado à menor circulação de ar entre os frutos e à maior espessura do leito, fatores que podem aumentar a resistência à transferência de massa e retardar o processo de secagem (Chanpet *et al*., 2020).

Quanto ao comportamento ao longo do tempo, observou-se aumento na taxa de secagem nas semanas 3, 4 e 5 nos tratamentos com coco inteiro (uma e duas camadas) e no coco seccionado em duas camadas. Esse período coincidiu, de modo geral, com maiores valores de temperatura do ar e velocidade do vento e menores valores de umidade relativa em comparação às semanas iniciais, condições que podem favorecer a remoção de água. Comportamento semelhante foi relatado por Kong *et al*. (2021), que observaram que temperaturas mais baixas, menor velocidade do vento e elevada umidade relativa podem tornar o processo de secagem mais lento.

Nas semanas finais, verificou-se redução expressiva da taxa de secagem, comportamento característico do período de taxa decrescente. Nessa etapa, a remoção da

umidade ligada torna-se predominante, aumentando a influência das resistências internas à transferência de massa e da difusão sobre o processo de secagem (Fernando; Amarasinghe, 2016). Em materiais lignocelulósicos, essa água encontra-se associada aos polímeros da parede celular, principalmente por interações de hidrogênio, apresentando mobilidade distinta daquela da água livre (Thybring *et al*., 2022).

O modelo matemático que melhor descreveu a redução do teor de umidade em função do tempo de secagem natural, considerando os diferentes tratamentos avaliados, foi o modelo de Midilli (Tabela 4).

Tabela 4 – Parâmetros estatísticos dos modelos matemáticos ajustados às curvas de secagem natural dos resíduos de coco verde

Modelo matemático	SE	RMSE	R^2
Coco inteiro uma camada			
Midilli	18,30	14,60	0,9966
Logarítmico	38,04	32,44	0,9832
Henderson e Pabis	69,35	62,73	0,9372
Dois termos	78,63	62,73	0,9372
Henderson e Pabis modificado	47,74	32,19	0,9835
Coco seccionado uma camada			
Midilli	25,61	20,43	0,9933
Logarítmico	32,63	27,83	0,9876
Henderson e Pabis	36,23	32,77	0,9828
Dois termos	41,08	32,77	0,9828
Henderson e Pabis modificado	37,69	25,41	0,9897
Coco inteiro duas camadas			
Midilli	19,38	15,46	0,9976
Logarítmico	33,46	28,54	0,9917
Henderson e Pabis	87,83	79,45	0,9359
Dois termos	99,59	79,45	0,9359
Henderson e Pabis modificado	42,88	28,91	0,9920
Coco seccionado duas camadas			
Midilli	33,23	26,51	0,9930
Logarítmico	45,38	38,70	0,9851
Henderson e Pabis	67,67	61,21	0,9628
Dois termos	76,73	61,21	0,9628
Henderson e Pabis modificado	55,05	37,12	0,9863

Fonte: O autor.

O modelo de Midilli é reconhecido por sua capacidade de descrever a variação do teor de umidade em função do tempo, apresentando bom desempenho no ajuste da cinética de secagem de diferentes produtos e biomassas (Lisowski *et al*., 2015; Kong *et al*., 2021; Costa *et*

al., 2021; Barajas Godoy *et al*., 2024). No presente estudo, sua seleção foi fundamentada nos maiores valores de R^2 e nos menores valores de SE e RMSE em todos os tratamentos avaliados.

Na Tabela 5 são apresentados os parâmetros estimados do modelo de Midilli, utilizados para descrever o teor de umidade médio dos resíduos de coco verde ao longo do tempo de secagem natural, considerando os diferentes tratamentos aplicados: coco inteiro ou seccionado, dispostos em uma ou duas camadas.

Tabela 5 – Parâmetros estimados do modelo de Midilli para as curvas de secagem natural dos resíduos de coco verde

Tratamento		**Parâmetros**			
		a	***b***	***c***	***d***
Coco inteiro	**2 camadas**	932,27	0,001620	1,693952	-1,206339
	1 camada	698,47	0,001231	1,874684	-0,216221
Coco seccionado	**2 camadas**	912,07	0,005558	1,542630	-0,256822
	1 camada	759,54	0,020927	1,321306	-0,006215

Fonte: O autor.

Os parâmetros do modelo de Midilli variaram entre os tratamentos avaliados, refletindo as diferenças nos ajustes das curvas de secagem. O coeficiente *a* apresentou valores mais elevados nos tratamentos com duas camadas, tanto para o coco inteiro quanto para o coco seccionado, acompanhando as diferenças observadas nos teores iniciais de umidade entre os tratamentos.

O parâmetro *b* apresentou aumento expressivo no tratamento com coco seccionado em uma camada, comportamento que, nas condições avaliadas, foi associado à maior velocidade de redução do teor de umidade observada experimentalmente nesse tratamento. Entretanto, por integrar o termo exponencial do modelo juntamente com o parâmetro *c*, sua interpretação não deve ser realizada de forma isolada.

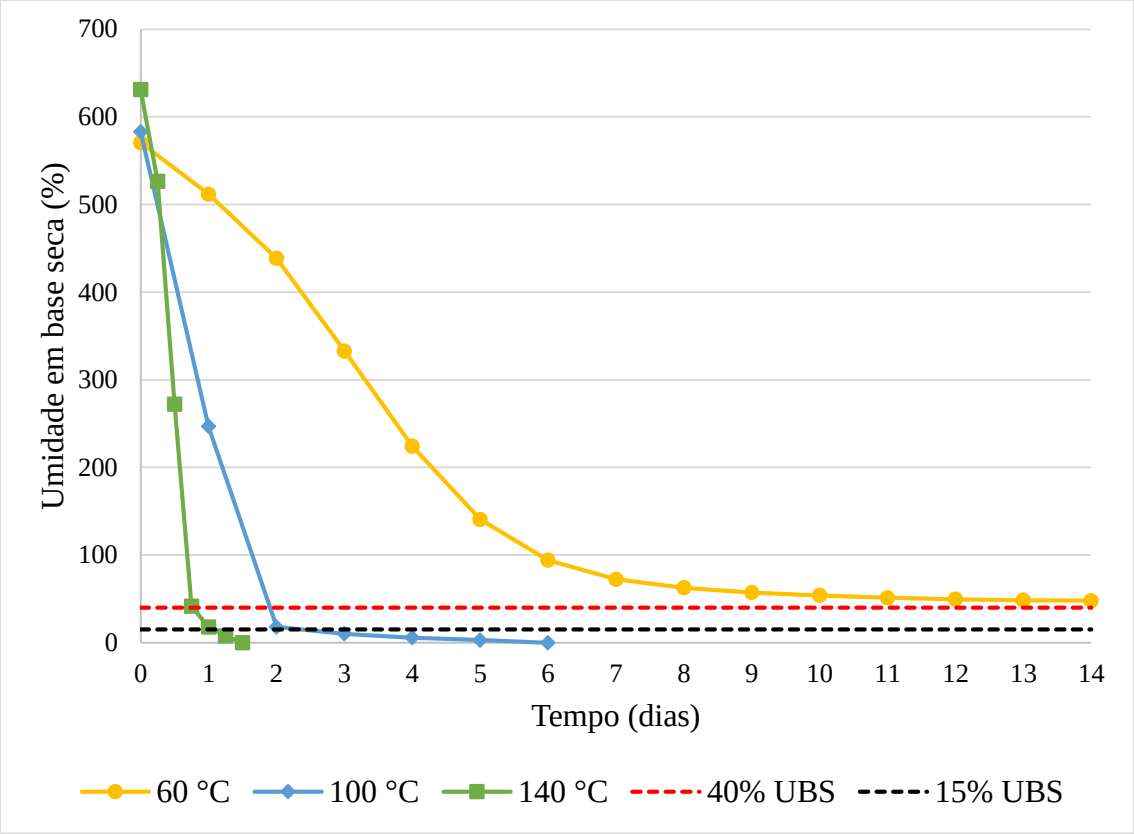
O expoente *c* variou entre aproximadamente 1,32 e 1,87, refletindo diferenças na curvatura das trajetórias de secagem ajustadas pelo modelo. O termo linear *d* apresentou valores negativos em todos os tratamentos, comportamento coerente com a tendência de redução do teor de umidade ao longo do período de secagem.

De modo geral, os resultados indicam a influência da configuração do material na cinética de secagem, destacando-se o coco seccionado disposto em camada única, que apresentou o menor tempo para atingir 40% de umidade em base seca e a maior taxa média de secagem entre as condições avaliadas.

4.3 Estudo de secagem artificial dos resíduos de coco verde

Os teores médios de umidade inicial, em base seca, dos resíduos de coco verde seccionados ao meio foram de 570,66% para o tratamento de 60 °C, 583,00% para o tratamento de 100 °C e 631,03% para o tratamento de 140 °C. As curvas de secagem artificial são apresentadas na Figura 4.

Figura 4 – Curvas de secagem dos resíduos de coco verde em estufa sob diferentes temperaturas



Fonte: O autor.

Observa-se na Figura 4 que o tratamento de secagem realizado à temperatura de 60 °C não atingiu, dentro do período avaliado, os teores de umidade em base seca estabelecidos como metas neste estudo. Nesse contexto, o não atingimento dessas faixas indica que seria necessário prolongar o período de secagem para alcançar os teores estabelecidos. Dessa forma, nas condições e no período avaliados, a secagem a 60 °C apresentou menor capacidade de redução da umidade em comparação às temperaturas de 100 e 140 °C.

Por outro lado, a elevação da temperatura para 100 °C e 140 °C promoveu uma redução mais rápida do teor de umidade, permitindo atingir valores inferiores a 40% em menor intervalo de tempo. Observa-se que o aumento da temperatura foi acompanhado por maior velocidade de

redução do teor de umidade, sendo esse comportamento mais pronunciado a 140 °C. Esse resultado é compatível com o efeito da maior disponibilidade de energia térmica sobre os mecanismos de transferência de calor e massa durante a secagem (Zeng *et al*., 2024).

A Tabela 6 apresenta as taxas de secagem dos resíduos de coco verde para as diferentes temperaturas e condições de umidade avaliadas.

Tabela 6 – Taxas de secagem dos resíduos de coco verde até a obtenção dos teores de umidade base seca de 40% e 15%, na secagem realizada em estufa

Umidade Alvo	**Taxa de secagem (% h^{-1})**		
	60 °C	**100 °C**	**140 °C**
40% UBS	1,55*	12,92	32,73
15 % UBS	1,55*	11,77	25,55

Fonte: O autor.
Nota: O tratamento a 60 °C não atingiu os teores de 40% e 15% de umidade em base seca durante o período experimental; o valor de 1,55% h^{-1} corresponde à taxa média de secagem calculada para o período avaliado.

Observa-se que as taxas de secagem para atingir 15% de umidade, em base seca, foram menores tanto na temperatura de 100 °C quanto na de 140 °C, quando comparadas às taxas calculadas até a obtenção de 40% de umidade. Esse comportamento é compatível com a redução progressiva da taxa de secagem à medida que o teor de umidade do material diminui, em razão do aumento da resistência à remoção da água nas etapas mais avançadas do processo (Costa *et al.*, 2021).

Observa-se também que a taxa de secagem foi superior no tratamento realizado a 140 °C, em comparação ao tratamento a 100 °C. A influência da temperatura sobre o processo de secagem foi evidente nas condições avaliadas, uma vez que, com o aumento da temperatura, houve redução do tempo necessário para atingir os teores de umidade estabelecidos. Esse comportamento está relacionado ao maior fornecimento de energia térmica, que favorece os mecanismos de transferência de calor e massa, promovendo um aumento da pressão de vapor da água no interior da amostra (Aral; Beşe, 2016; Udomkun *et al*., 2015; Cavalcante *et al*., 2020). Como resultado, a migração da umidade do interior para a superfície é favorecida, acelerando sua remoção.

Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste dos modelos matemáticos em cada temperatura de secagem.

Tabela 7 – Parâmetros estatísticos dos modelos matemáticos ajustados às curvas de secagem artificial dos resíduos de coco verde

Modelo	SE	RMSE	R^2
Secagem a 60 °C			
Midilli	9,01	7,99	0,9981
Logarítmico	36,25	33,56	0,9677
Henderson e Pabis	34,88	33,61	0,9676
Dois termos	37,92	33,61	0,9676
Henderson e Pabis modificado	31,05	24,89	0,9822
Secagem a 100 °C			
Midilli	5,39	3,53	0,9997
Logarítmico	33,31	25,18	0,9849
Henderson e Pabis	31,19	26,36	0,9835
Dois termos	40,27	26,36	0,9835
Henderson e Pabis modificado	53,57	20,25	0,9902
Secagem a 140 °C			
Midilli	14,64	9,58	0,9985
Logarítmico	77,88	58,87	0,9438
Henderson e Pabis	84,09	71,07	0,9180
Dois termos	108,56	71,07	0,9180
Henderson e Pabis modificado	151,63	57,31	0,9467

Fonte: O autor.

Assim como na secagem natural, o modelo de Midilli apresentou o melhor ajuste às curvas de secagem em estufa com circulação forçada de ar, nas temperaturas de 60, 100 e 140 °C, com $R^2 > 0,998$ e os menores valores de SE e RMSE em todas as condições avaliadas. Sua estrutura matemática, que incorpora termos exponenciais e lineares, confere maior flexibilidade ao ajuste da variação do teor de umidade ao longo do tempo (Bhogesara *et al.*, 2024).

Em comparação ao modelo de Midilli, o modelo logarítmico apresentou menor qualidade de ajuste, com valores de R^2 variando de 0,9438 a 0,9849 e maiores valores de SE e RMSE. De forma semelhante, o modelo de Henderson e Pabis apresentou menores valores de R^2 e maiores erros de ajuste em relação ao modelo de Midilli. O modelo modificado de Henderson e Pabis apresentou valores de R^2 superiores aos modelos logarítmico, Henderson e Pabis e Dois Termos nas três temperaturas avaliadas, porém permaneceu inferior ao modelo de Midilli.

Os resultados obtidos estão em concordância com estudos realizados com diferentes biomassas, como cascas de coco (Ndapeu *et al*., 2013), milho (Da Silva *et al*., 2022) e amaranto (Costa *et al*., 2021), nos quais o modelo de Midilli também apresentou melhor ajuste aos dados experimentais. Dessa forma, o modelo mostrou-se adequado para descrever a cinética de secagem da biomassa residual de coco verde nas condições avaliadas neste estudo.

Na Tabela 8 são apresentados os parâmetros estimados do modelo de Midilli para as diferentes temperaturas de secagem.

Tabela 8 – Parâmetros estimados do modelo de Midilli para as curvas de secagem artificial dos resíduos de coco verde

Tratamento	**Parâmetros**			
	a	***b***	***c***	***d***
60 °C	566,18	0,085735	1,765220	4,189434
100 °C	583,00	0,862699	2,043091	0,778162
140 °C	625,14	5,071816	2,526485	3,233997

Fonte: O autor.

Os parâmetros do modelo de Midilli variaram entre as temperaturas avaliadas, refletindo diferenças nos ajustes das curvas de secagem. O coeficiente *a* apresentou valores próximos aos teores de umidade iniciais observados experimentalmente. O parâmetro *b* apresentou aumento expressivo com a elevação da temperatura, comportamento coerente com a maior velocidade de redução do teor de umidade observada nas temperaturas de 100 e, principalmente, 140 °C.

O expoente *c* também apresentou tendência de aumento com a temperatura, indicando alterações na forma das curvas ajustadas entre as condições avaliadas. O termo linear *d* apresentou valores positivos em todas as temperaturas, contribuindo para o ajuste da variação do teor de umidade ao longo do período de secagem.

De modo geral, os resultados indicam a influência da temperatura sobre o comportamento da secagem, sendo observada maior velocidade de redução da umidade nas temperaturas mais elevadas, especialmente a 140 °C.

5 CONCLUSÃO

O estudo indicou que a biomassa residual do coco verde apresenta características físico-químicas compatíveis com seu aproveitamento em processos de conversão termoquímica, com destaque para os teores de carbono e lignina total e para o baixo teor de nitrogênio. A elevada umidade inicial da biomassa, que representa um desafio para sua utilização, pode ser reduzida tanto por secagem natural quanto artificial. Na secagem natural, o coco seccionado disposto em uma única camada apresentou o menor tempo para atingir 40% de umidade em base seca e a maior taxa média de secagem entre as condições avaliadas. Na secagem artificial, as temperaturas de 100 e 140 °C permitiram atingir os teores de umidade estabelecidos em menores períodos, com maior velocidade de redução da umidade a 140 °C.

O modelo de Midilli apresentou o melhor ajuste estatístico entre os modelos testados, indicando sua adequação para descrever as curvas de secagem natural e artificial da biomassa residual de coco verde nas condições avaliadas.

REFERÊNCIAS

AGBEDE, O. O. *et al.* The influence of surface area, temperature and pretreatment on convective hot air oven drying of banana peels biomass. **Engineering and Applied Science Research**, v. 50, n. 5, p. 420-439, 2023. DOI: https://doi.org/10.14456/easr.2023.45.

ARAL, S.; BEŞE, A. V. Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. **Food Chemistry**, v. 210, p. 577-584, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.128.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D1762-84(2021): Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021. DOI: https://doi.org/10.1520/D1762-84R21.

BABU, A. K. *et al.* Review of leaf drying: mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 536-556, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.002.

BARAJAS GODOY, F. D. *et al.* The significance of biowaste drying analysis as a key pre-treatment for transforming it into a sustainable biomass feedstock. **PeerJ**, v. 12, e18248, 2024. DOI: https://doi.org/10.7717/peerj.18248.

BATISTA, R. R.; GOMES, M. M. Effects of chemical composition and pyrolysis process variables on biochar yields: correlation and principal component analysis. **Floresta e Ambiente**, v. 28, n. 3, e20210007, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2021-0007.

BHOGESARA, A. V. *et al.* Thin layer drying of fenugreek leaves in a solar tunnel dryer: performance and analysis. **International Journal of Advanced Biochemistry Research**, v. 8, n. 12, p. 910-919, 2024. DOI: https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i12l.3330.

CAI, J. *et al.* Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 309-322, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.072.

CAVALCANTE, A. M. M. *et al.* Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos da algaroba. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 11192-11209, 2020. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv6n3-113.

CHANPET, M. *et al.* Effect of air velocity, temperature, and relative humidity on drying kinetics of rubberwood. **Heliyon**, v. 6, n. 10, e05151, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05151.

CHEN, D. *et al.* Insight into biomass pyrolysis mechanism based on cellulose, hemicellulose, and lignin: evolution of volatiles and kinetics, elucidation of reaction pathways, and characterization of gas, biochar and bio-oil. **Combustion and Flame**, v. 242, 112142, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112142.

COSTA, P. M. C. *et al.* Drying kinetics of *Amaranthus cruentus* 'BRS Alegria' seeds *in natura*l and artificial methods. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 5, p. 345-352, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n5p345-352.

DA SILVA, F. B. *et al.* Cinética de secagem e qualidade fisiológica de sementes de milho. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 45, n. 1-2, p. 24-33, 2022. DOI: https://doi.org/10.19084/rca.27094.

DE ALMEIDA, S. G. C. *et al.* Biochar production from sugarcane biomass using slow pyrolysis: characterization of the solid fraction. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 179, 109054, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109054.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN ISO 16948:2015-09: Solid biofuels - Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen (ISO 16948:2015)**. Berlin: Beuth Verlag, 2015. DOI: https://doi.org/10.31030/2244183.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN ISO 16993:2016-11: Solid biofuels – Conversion of analytical results from one basis to another (ISO 16993:2016)**. Berlin: Beuth Verlag, 2016. DOI: https://doi.org/10.31030/2555895.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN ISO 16994:2016-12: Solid biofuels - Determination of total content of sulfur and chlorine (ISO 16994:2016)**. Berlin: Beuth Verlag, 2016. DOI: https://doi.org/10.31030/2558210.

DEVENS, K. U. *et al.* Characterization of biochar from green coconut shell and orange peel wastes. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 2, p. 288-294, 2018. DOI: https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180022.

DIAS, N. B. *et al.* Aproveitamento da casca de coco verde para uso energético. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 5, n. 3, p. 179-195, 2019.

FERNANDO, J. A. K. M.; AMARASINGHE, A. D. U. S. Drying kinetics and mathematical modeling of hot air drying of coconut coir pith. **SpringerPlus**, v. 5, 807, 2016. DOI: https://doi.org/10.1186/s40064-016-2387-y.

HENDERSON, S. M. Progress in developing the thin layer drying equation. **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 6, p. 1167-1168, 1974. DOI: https://doi.org/10.13031/2013.37052.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 6, n. 3, p. 169-174, 1961.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA. Tabela 5457: Produção agrícola municipal - quantidade produzida, área plantada e área colhida**. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457. Acesso em: 25 nov. 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17828:2015: Solid biofuels - Determination of bulk density**. Geneva: ISO, 2015.

KARATHANOS, V. T. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, v. 39, n. 4, p. 337-344, 1999. DOI: https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00132-0.

KONG, D. *et al.* Analysis of drying kinetics, energy and microstructural properties of turnips using a solar drying system. **Solar Energy**, v. 230, p. 721-731, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.073.

LIN, B.-J.; CHEN, W.-H. Sugarcane bagasse pyrolysis in a carbon dioxide atmosphere with conventional and microwave-assisted heating. **Frontiers in Energy Research**, v. 3, art. 4, 2015. DOI: https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00004.

LISOWSKI, A. *et al.* Natural drying of fruit trees wood. **Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Agriculture (Agricultural and Forest Engineering)**, n. 65, p. 53-64, 2015.

LUCHESE, C. L.; ENGEL, J. B.; TESSARO, I. C. A review on the mercerization of natural fibers: parameters and effects. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 41, n. 3, p. 571-587, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s11814-024-00112-6.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002. DOI: https://doi.org/10.1081/DRT-120005864.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental. **Deliberação Normativa COPAM nº 227, de 29 de agosto de 2018**. Estabelece procedimentos para redução das emissões atmosféricas dos fornos de produção de carvão vegetal de floresta plantada e para avaliação da qualidade do ar no seu entorno e dá outras providências. Diário do Executivo "Minas Gerais", 31 ago. 2018. Disponível em: https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=46681. Acesso em: 27 nov. 2024.

MIOLA, B. *et al.* Aproveitamento energético dos resíduos de cascas de coco verde para produção de briquetes. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 4, p. 627-634, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180029.

NARITA, C. Y. **Carvões ativados a partir de resíduo de coco verde por diferentes ativadores: obtenção, caracterização e aplicações**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. DOI: https://doi.org/10.11606/T.3.2020.tde-07042021-161403.

NDAPEU, D. *et al.* Experimental study of the drying kinetics of the coconut shells (*nucifera*) of Cameroon. **Materials Sciences and Applications**, v. 4, n. 12, p. 822-830, 2013. DOI: https://doi.org/10.4236/msa.2013.412105.

PADILLA, E. R. D. **Biochar produzido a partir de casca de coco: aplicações como fonte de carbono nos altos-fornos**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia e Ciências, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Guaratinguetá, 2023.

PÖRTNER, H.-O. *et al.* (ed.). **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK; New York, NY: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. DOI: https://doi.org/10.1017/9781009325844.

RAHMAN, M. S.; PERERA, C. O.; THEBAUD, C. Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. **Food Research International**, v. 30, n. 7, p. 485-491, 1997. DOI: https://doi.org/10.1016/S0963-9969(98)00009-X.

RASHID, M. T. *et al.* Energy efficient drying technologies for sweet potatoes: operating and drying mechanism, quality-related attributes. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, 1040314, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1040314.

SHARIFF, A. *et al*. The effect of feedstock type and slow pyrolysis temperature on biochar yield from coconut wastes. **International Journal of Chemical and Molecular Engineering**, v. 10, n. 12, p. 1410-1414, 2016. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.1127426.

SHEN, D. *et al*. An overview on fast pyrolysis of the main constituents in lignocellulosic biomass to value-added chemicals: structures, pathways and interactions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 761-774, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.054.

SOUZA, C. O. *et al.* Potential for the use of coconut shell (*Cocus nucifera*) as an alternative fuel in the production of cassava flour. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, e250101119485, 2021. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v10i11.19485.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T 222 om-88: Acid-insoluble lignin in wood and pulp**. Atlanta, GA: TAPPI Press, 1988.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T 264 cm-22: Preparation of wood for chemical analysis**. Peachtree Corners, GA: TAPPI, 2022.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **UM 250: Acid-soluble lignin in wood and pulp**. Atlanta, GA: TAPPI Press, 2000.

THYBRING, E. E. *et al*. Water in wood: a review of current understanding and knowledge gaps. **Forests**, v. 13, n. 12, 2051, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/f13122051.

TRIPATHI, M.; SAHU, J. N.; GANESAN, P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 467-481, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122.

UDOMKUN, P. *et al.* Single layer drying kinetics of papaya amidst vertical and horizontal airflow. **LWT - Food Science and Technology**, v. 64, n. 1, p. 67-73, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.05.022.

VILAS-BOAS, A. C. M. *et al.* Valorisation of residual biomass by pyrolysis: influence of process conditions on products. **Sustainable Energy & Fuels**, v. 8, p. 379-396, 2024. DOI: https://doi.org/10.1039/D3SE01216F.

WESTERMAN, P. W.; WHITE, G. M.; ROSS, I. J. Relative humidity effect on the high-temperature drying of shelled corn. **Transactions of the ASAE**, v. 16, n. 6, p. 1136-1139, 1973. DOI: https://doi.org/10.13031/2013.37715.

WRÓBEL, M. *et al*. Material properties changes caused by high temperature drying - corn cobs case study. **Materials**, v. 18, n. 10, 2302, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/ma18102302.

YAGCIOGLU, A.; DEGIRMENCIOGLU, A.; CAGATAY, F. Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. In: BASCETINCELIK, A. (ed.). **Proceedings of the 7th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy**, Adana, Turkey, 26-27 May 1999. Adana: Faculty of Agriculture, Cukurova University, 1999. p. 565-569.

ZENG, Z. *et al*. Analysis of drying indicators during thin layer drying of tea in a convective-hot air dryer. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 8, 1371696, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1371696.

CAPÍTULO 2 – PRODUÇÃO DE BIOCHAR DE RESÍDUOS DO FRUTO DE *Cocos nucifera L.* EM SISTEMA FORNOS-FORNALHA

RESUMO

Este estudo avaliou a viabilidade técnica da produção de biochar a partir de resíduos do fruto de *Cocos nucifera* L. em um sistema fornos-fornalha de baixo custo, adaptado para a carbonização dessa biomassa em escala piloto. Foram avaliadas três condições de carbonização, com temperaturas finais de 350, 400 e 500 °C, utilizando duas repetições por tratamento e monitoramento contínuo do perfil térmico do forno. Os biochars produzidos foram caracterizados quanto ao rendimento gravimétrico, composição química imediata e elementar, razões atômicas H/C e O/C, propriedades superficiais, pH, condutividade elétrica, capacidade de retenção de água, capacidade de troca catiônica e composição mineral. A carbonização a 500 °C foi concluída em 9 h, enquanto os tratamentos a 350 e 400 °C apresentaram duração de 12 h, sendo observada menor estabilidade do perfil térmico no tratamento a 400 °C. O aumento da temperatura final de carbonização reduziu o rendimento gravimétrico e o teor de materiais voláteis e aumentou o teor de carbono fixo e o desenvolvimento da estrutura porosa. O biochar produzido a 500 °C apresentou 75,38% de carbono fixo, razões H/C e O/C de 0,270 e 0,143, respectivamente, e a maior área superficial específica, de 84,26 $m^2 g^{-1}$. A capacidade de retenção de água e a capacidade de troca catiônica diminuíram nos tratamentos de maior temperatura; contudo, todos os biochars apresentaram valores superiores aos limites mínimos estabelecidos pela legislação brasileira para essas duas propriedades em condicionadores de solo. Os materiais apresentaram caráter alcalino e concentrações relevantes de nutrientes, com destaque para o potássio. Os resultados demonstram o potencial técnico do sistema fornos-fornalha para a conversão de resíduos de coco verde em biochar e indicam a obtenção de materiais com potencial de aplicação agronômica e armazenamento de carbono em longo prazo.

Palavras chave: Biocarvões; Carbonização; Baixa emissão de metano, Economia circular.

1 INTRODUÇÃO

O aproveitamento de resíduos agroindustriais tem ganhado relevância no contexto da bioeconomia e da sustentabilidade ambiental, especialmente em países tropicais com elevada geração de biomassa residual. O Brasil apresenta expressiva produção de *Cocos nucifera* L., que alcançou aproximadamente 1,93 bilhão de frutos em 2024 (IBGE, 2024). Considerando que aproximadamente 80% da massa do fruto corresponde ao material residual após o consumo da água e da polpa, uma quantidade expressiva de resíduos é gerada ao longo dessa cadeia produtiva (Devens *et al*., 2018).

Diante desse cenário, a conversão do resíduo do coco verde em biochar surge como uma alternativa promissora, alinhada aos princípios da economia circular e à mitigação de impactos ambientais. O biochar é um material rico em carbono estável, obtido por processos de pirólise em atmosfera inerte ou com baixo teor de oxigênio, processo que promove a decomposição térmica da biomassa (EBC, 2022). Além de seu papel como estoque de carbono, o biochar apresenta propriedades agronômicas relevantes quando aplicado no solo, como alta capacidade de troca catiônica, porosidade elevada, efeito de correção do pH em solos ácidos e melhoria da estrutura do solo (Lehmann *et al*., 2015; Khan *et al*., 2024).

A eficiência e as propriedades do biochar estão diretamente relacionadas a fatores como o tipo de biomassa, a temperatura do processo, o tempo de residência e o tipo de reator utilizado (Shaaban *et al*., 2013; Zhao *et al*., 2018; Kumar *et al*., 2020). A temperatura e o tempo de residência são variáveis determinantes no processo de pirólise, pois influenciam diretamente o rendimento gravimétrico e as propriedades físico-químicas do biochar. Em geral, temperaturas mais elevadas promovem a redução do teor de materiais voláteis e do rendimento em biochar, ao mesmo tempo em que aumentam o teor de carbono fixo, a aromaticidade, a estabilidade química e o pH do material. O tempo de residência também pode influenciar essas propriedades, embora seu efeito dependa da temperatura, da matéria-prima e das condições do processo (Zhao *et al*., 2018; Rajput *et al*., 2024; Vilas-Boas *et al*., 2024). Sistemas contínuos de pirólise, como reatores de rosca sem-fim e tambores rotativos, têm sido aplicados em maior escala para a conversão térmica de biomassa (Moser *et al*., 2023; Brassard; Godbout; Raghavan, 2017). Esses sistemas apresentam vantagens operacionais significativas, incluindo maior capacidade de processamento e melhor controle de variáveis críticas, como a temperatura e o tempo de residência (Moser *et al*., 2023; Brassard; Godbout; Raghavan, 2017). No entanto, apresentam elevado custo de implantação, exigem infraestrutura robusta e, frequentemente, requerem o pré-

processamento da biomassa, como trituração ou seccionamento, o que limita sua adoção por pequenos e médios produtores.

Nesse contexto, o uso de sistemas do tipo forno-fornalha para a produção de biochar apresenta-se como uma alternativa viável, caracterizada por baixo custo de implantação, construção simples e operação acessível (Oliveira *et al*., 2017; Ribeiro *et al*., 2020). Trata-se de uma tecnologia que visa atender produtores rurais em regiões de produção tradicional, favorecendo sua aceitação e, adicionalmente, contribuindo para a redução de emissões atmosféricas, especialmente de metano, quando comparada a métodos rudimentares (Schettini *et al*., 2022). Sua utilização se alinha à proposta do biochar como estratégia de mitigação climática, ao favorecer a produção de um material estável e rico em carbono, associado ao armazenamento de carbono, além de contribuir para a redução de emissões durante o processo, podendo ser adaptada à produção de biochar a partir de resíduos agroindustriais, como os derivados do fruto de *Cocos nucifera* L.

Assim, este estudo teve como objetivo investigar a produção de biochar a partir da casca do coco verde utilizando um sistema forno-fornalha em escala piloto, avaliando diferentes curvas de carbonização baseadas na variação da temperatura e do tempo de residência, de modo a estabelecer parâmetros técnicos e operacionais para a produção de biochar de qualidade em sistemas de baixo custo, com potencial para contribuir para soluções sustentáveis de aproveitamento de resíduos agroindustriais e para ampliar as possibilidades de inserção de pequenos produtores no mercado de bioinsumos e em projetos de remoção de carbono.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Investigar a viabilidade técnica da produção de biochar a partir da casca do coco verde utilizando um sistema forno-fornalha em escala piloto, com foco na definição de parâmetros técnicos e operacionais que permitam a obtenção de um biochar com propriedades físico-químicas adequadas ao uso como condicionador de solo e ao armazenamento de carbono, acessível a pequenos produtores e alinhado aos princípios da economia circular.

2.2 Objetivos específicos

a) Adaptar e validar o sistema fornos-fornalha para carbonização dos resíduos de coco verde;
b) Obter o perfil térmico do processo de carbonização de resíduos de coco verde por meio de sistema de monitoramento de temperatura;
c) Desenvolver curvas de carbonização baseadas na variação da temperatura e do tempo de residência em sistema forno-fornalha para resíduos de coco verde;
d) Avaliar o efeito das diferentes condições de carbonização, associadas à temperatura e ao tempo de processo, sobre o rendimento e as propriedades físico-químicas dos biochars produzidos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da matéria prima

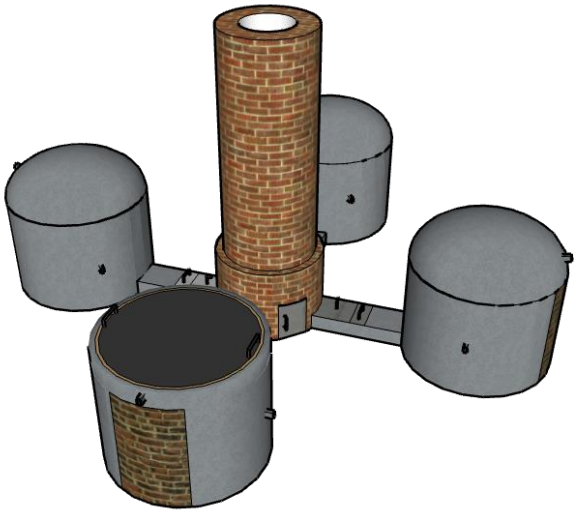
A biomassa residual foi obtida junto a vendedores de coco verde no município de Viçosa, MG. Após a coleta, os cocos foram transportados ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), onde foram realizadas as carbonizações.

Os resíduos, com umidade em base seca de aproximadamente 847,92%, foram seccionados com o auxílio de um machado e dispostos para secagem ao ar livre por um período de aproximadamente 45 dias. A biomassa de coco verde utilizada no experimento apresentou teor de materiais voláteis de 74,19%, carbono fixo de 20,71% e cinzas de 5,10%. Do ponto de vista estrutural, o material apresentou 36,88% de holoceluloses, 31,77% de lignina e 26,25% de extrativos.

3.2 Descrição do sistema fornos-fornalha

Para a carbonização dos resíduos do fruto de *Cocos nucifera* L., foi utilizado um forno adaptado do sistema fornos-fornalha, desenvolvido pelo Laboratório de Painéis e Energia da Madeira. Esse sistema consiste em um conjunto de quatro fornos circulares acoplados a um queimador de gases central, interligados por meio de dutos (Figura 1).

Figura 1 – Representação esquemática do Sistema Fornos-Fornalha com tampa metálica adaptada na copa para carbonizações do resíduo do fruto de *Cocos nucifera L.* desenvolvido e construído no LAPEM/UFV

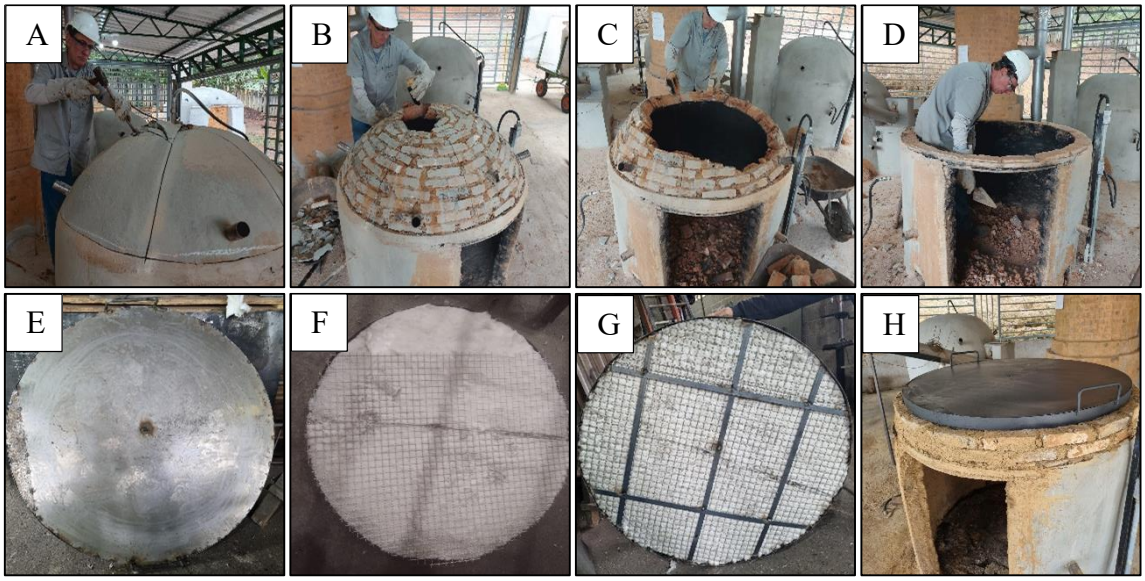


Fonte: O autor.

O forno possui capacidade volumétrica de aproximadamente 1 m³ de enfornamento. Foi construído com tijolos cerâmicos maciços, assentados com argamassa de barro. As dimensões internas de cada forno são de 1,2 m de diâmetro, com paredes de 1,0 m de altura.

A cúpula de alvenaria foi substituída por uma tampa metálica para facilitar o enchimento do forno com os resíduos de coco verde (Figura 2A, 2B, 2C e 2D). Para a construção da tampa metálica, foi utilizado um disco de aço carbono com 1,25 m de diâmetro e 3,5 mm de espessura (Figura 2E). Na borda do disco, foi colocada uma fita, também de aço carbono, com largura de 5 cm. Para minimizar a troca de calor do interior do forno com o ambiente, foi utilizada uma manta cerâmica de 5 cm de espessura na tampa metálica (Figura 2F). Ela foi fixada com o auxílio de uma grade de aço galvanizado com abertura de 3 x 3 cm e fitas de aço carbono com 3 cm de largura (Figura 2G). Para facilitar a remoção da tampa metálica do forno, foram confeccionadas duas alças, com 7 cm de altura e 23 cm de largura cada (Figura 2H).

Figura 2 – Remoção da cúpula de alvenaria do forno e construção da tampa metálica.



Fonte: O autor.

O forno conta com quatro controladores de ar localizados na base, distribuídos de maneira equidistante, permitindo o controle de entrada de ar durante o processo. O duto que conecta o forno à fornalha é equipado com uma válvula borboleta, a qual permite o controle da vazão dos gases.

A fornalha utilizada para a queima dos gases gerados na carbonização é descrita no estudo de Carneiro *et al*. (2025).

3.3 Carbonização dos resíduos de coco verde no sistema fornos-fornalha

Para as carbonizações, foram utilizados resíduos de coco verde seccionados, previamente secos ao ar livre até atingirem teor de umidade inferior a 40%, conforme recomendado pela Deliberação Normativa nº 227/2018 do Estado de Minas Gerais para produção de carvão vegetal.

O teor de umidade, em base seca, foi determinado pelo método gravimétrico, mediante secagem das amostras em estufa com circulação forçada de ar a 105 ± 2 °C até atingirem massa constante. Após a obtenção da massa final, o teor médio de umidade em base seca foi calculado conforme a Equação 1.

$$UBS(\%) = \frac{mu-ms}{ms}\ x\ 100 \quad Equação\ 1$$

Em que:

UBS (%): teor de umidade, em base seca;

mu (g): massa úmida da amostra;

ms (g): massa seca da amostra.

Após a determinação da umidade, procedeu-se ao carregamento do forno com os resíduos de coco verde, realizado manualmente pela cúpula. Após o enchimento, a tampa foi posicionada. Para assegurar a vedação entre a tampa e a parede do forno, o espaço entre ambas foi preenchido com areia. Em seguida, sobre a areia, aplicou-se uma argamassa de vedação à base de solo peneirado e água, com o objetivo de evitar a entrada de oxigênio durante a carbonização.

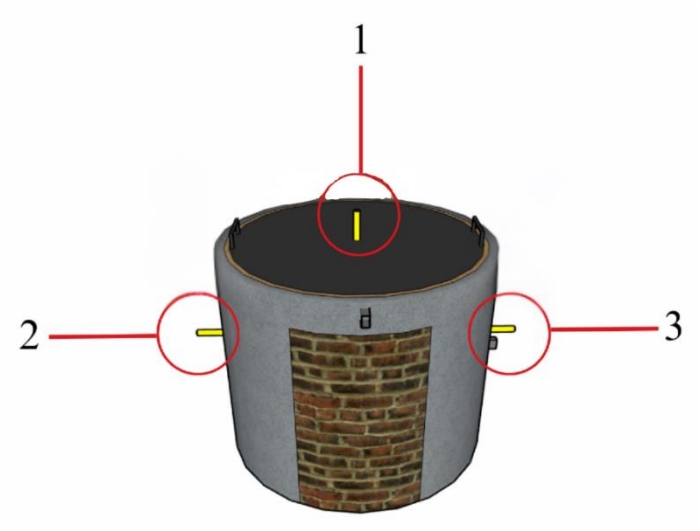
Para a carbonização, inicialmente foi realizada a ignição da fornalha de queima dos gases, utilizando resíduos lignocelulósicos, para promover a exaustão dos gases do forno. Em seguida, com a válvula borboleta do duto completamente aberta, procedeu-se à ignição do forno realizada por meio de uma abertura superior da porta. Após a consolidação da ignição, essa abertura foi fechada, e a carbonização foi controlada com o auxílio das entradas de ar do forno e da válvula borboleta instalada no duto.

As carbonizações foram realizadas com monitoramento contínuo das temperaturas, de modo a obter o perfil térmico do forno, utilizando o sistema supervisório Carbontech, desenvolvido pelo grupo Coaltech. As temperaturas foram registradas pelo sistema a cada 60 segundos. Para a elaboração dos perfis térmicos, os dados registrados pelos termopares foram organizados em intervalos de 1 hora. Os dados de temperatura obtidos e visualizados em tempo real pelo sistema supervisório auxiliaram na tomada de ações para o controle da temperatura do

forno. Para delimitar a variação de temperatura em relação à curva teórica, foi estipulada a temperatura dentro da faixa (TDF) em avaliação prévia dos ensaios, definindo um intervalo de −20 °C como limite inferior (LI) e +20 °C como limite superior (LS) da curva ideal.

Foram utilizados termopares tipo K, com haste de 20 cm de comprimento, isolados e revestidos com tranças de fio de amianto, adequados para medições contínuas em uma faixa de temperatura entre −220 °C e 1260 °C. Três termopares foram distribuídos no forno, um na parte central da tampa metálica e os outros dois, um em cada parede (Figura 3), na parte central entre a porta e o duto que liga o forno à fornalha, a 50 cm de altura.

Figura 3 – Distribuição dos termopares instalados no forno de carbonização



Fonte: O autor.
Nota: 1 – Termopar no centro da tampa metálica do forno; 2 – Termopar do lado esquerdo do forno; 3 – Termopar instalado no lado direito do forno.

A partir das temperaturas médias obtidas nos pontos de medição, foram elaborados os perfis térmicos das carbonizações e obtidos os parâmetros térmicos do forno. Foram realizados três tratamentos, com duas repetições cada, totalizando seis unidades experimentais. A temperatura final de carbonização no forno-fornalha foi determinada com base na temperatura registrada pelo termopar localizado no centro da tampa metálica do forno (Tabela 1).

Tabela 1 – Delineamento experimental para obtenção do biochar de resíduos de coco verde produzido no sistema Fornos-Fornalha

Tratamento	**Etapas de carbonização**		
	Secagem	**Degradação parcial dos carboidratos**	**Fixação de carbono**
Curva 1	200 °C / 3 h	250 °C / 3 h	350°C
Curva 2	200 °C / 3 h	250 °C / 3 h	400°C
Curva 3	200 °C / 3 h	250 °C / 3 h	500°C

Fonte: O autor.

Na última etapa da carbonização, denominada fixação de carbono, o tempo de residência foi variável em função dos tratamentos.

O término da carbonização foi determinado pela chegada da brasa nos últimos controladores de ar, localizados próximos à saída de gases. Além disso, a finalização do processo foi avaliada com base na redução da vazão dos gases e na aplicação da técnica de sondagem do forno. Essa técnica consistiu em inserir uma sonda (vergalhão de aço) nos controladores de ar próximos ao duto. A presença de umidade ou resíduos de alcatrão no vergalhão após sua retirada indicava que a carbonização ainda não estava completa. Por outro lado, quando o vergalhão era retirado seco e livre de resquícios de alcatrão, isso indicava que a carbonização havia sido concluída.

Ao término da carbonização, os controladores de ar e o duto de condução dos gases da carbonização para a fornalha foram fechados com tijolos e argamassa de barro. Após o fechamento do forno, foi iniciado o resfriamento da massa de biochar até que a temperatura interna do forno fosse reduzida para abaixo de 45 °C. Após o resfriamento, procedeu-se ao descarregamento do biochar.

As massas dos biochars foram determinadas e os rendimentos gravimétricos foram calculados pela seguinte Equação 2:

$$RG(\%) = \frac{Mb}{Msr}.100 \qquad Equação\ 2$$

Em que: RG = rendimento gravimétrico em biochar (%); Mb = massa seca de biochar (kg); e Msr = massa seca de resíduo (kg).

Para as análises físicas e químicas, o biochar produzido no sistema forno-fornalha, foi colocado em uma lona, homogeneizado e quarteado. De um quarto, foi retirado uma amostra

de 20 L, para determinação de suas propriedades conforme a norma NBR 6923 (ABNT, 1981).

3.4 Propriedades do biochar

Os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas foram determinados de acordo com a norma ASTM D1762–84 (ASTM, 2021). As amostras de biochar foram previamente maceradas em almofariz com pistilo de alumínio e peneiradas para obtenção de granulometria entre 40 e 60 mesh, a fim de padronizar as análises.

O rendimento em carbono fixo foi determinado pela multiplicação do rendimento gravimétrico pelo teor de carbono fixo do biochar, dividida por 100.

A composição química elementar dos biochars foi determinada utilizando o analisador elementar TruSpec Micro (LECO). As amostras foram previamente peneiradas para obtenção de granulometria entre 40 e 60 mesh, correspondente a partículas entre aproximadamente 0,25 e 0,42 mm. Os teores de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) foram determinados conforme a DIN EN ISO 16948:2015, utilizando o módulo TruSpec Micro, enquanto o teor de enxofre (S) foi determinado conforme a DIN EN ISO 16994:2016, utilizando o módulo TruSpec S. Os teores de C, H, N e S, fornecidos em base seca livre de cinzas, foram convertidos para base seca mediante correção pelo teor de cinzas de cada amostra, conforme a DIN EN ISO 16993:2016. O teor de oxigênio (O) foi estimado por diferença, considerando os teores corrigidos de C, H, N e S e o teor de cinzas, conforme a expressão O (%) = 100 – (C + H + N + S + cinzas).

O cálculo da razão atômica O/C foi realizado conforme descrito pela European Biochar Certificate (EBC, 2022). A razão atômica entre hidrogênio e carbono (H/C) foi calculada conforme a Equação 3, com base na Puro Standard: Biochar Methodology – Edition 2022, Version 3 (Puro.earth, 2024).

$$\frac{H}{C_{org}}\ (molar) = \frac{mh\ (\%)}{mc\ (\%)}\ x \frac{MC(gmol^{-1})}{MH(gmol^{-1})} = \frac{mh(\%)}{mc(\%)}\ x\ \frac{12}{1} \qquad Equação\ 3$$

A análise de nutrientes foi realizada por espectroscopia de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), conforme descrito por Enders *et al*. (2017). As amostras de biochar, previamente peneiradas para obtenção de granulometria entre 40 e 60 mesh (partículas entre aproximadamente 0,25 e 0,42 mm), foram secas a 105 °C por 24 horas e armazenadas em dessecador. Em seguida, cerca de 200 mg de amostra foram digeridos com 5

mL de HNO_3 a 70% e 2 mL de H_2O_2 a 30% em bloco digestor a 120 °C, até cessar a liberação de vapores nitrosos. Após o resfriamento, as amostras foram diluídas até 50 mL com água deionizada e analisadas no ICP-OES para quantificação de macro e micronutrientes, utilizando soluções-padrão certificadas para calibração.

A capacidade de troca catiônica (CTC) dos biochars foi determinada conforme o método descrito por Graber *et al*. (2017). As amostras foram secas em estufa a 65 °C até atingirem massa constante, homogeneizadas e peneiradas para obter uma granulometria entre 0,5 mm e 2,0 mm. Aproximadamente 1,000 g da amostra foi transferido para tubos Falcon, onde foram adicionados 40 mL de solução de acetato de amônio 1,0 mol L^{-1} ajustada a pH 7,0, seguido por agitação em mesa horizontal por 15 h. A suspensão foi filtrada sob vácuo utilizando uma membrana de fibra de vidro (0,45 µm), e a amostra foi lavada com etanol 60% para remover o excesso de acetato de amônio. Em seguida, foi transferida para um tubo contendo 50 mL de KCl 2,0 mol L^{-1}, submetida novamente à agitação por 15 h e filtrada. O filtrado foi coletado em balão volumétrico de 100 mL e o volume foi completado com água deionizada. O teor de amônio (NH_4^+) foi quantificado por destilação Kjeldahl. A CTC foi calculada considerando a quantidade de NH_4^+ adsorvido pela amostra, sendo expressa em mmolc kg^{-1} de biochar.

A determinação da capacidade de retenção de água a 10 cm (CRA10) foi realizada conforme a Instrução Normativa 31/2008 (MAPA, 2008). Foram utilizados anéis cilíndricos de alumínio (100 ± 5 mm de diâmetro e 50 ± 1 mm de altura) com o fundo vedado por tela de tecido de voil e anilhas de borracha. Os anéis foram preenchidos com as amostras, saturados com água por 24 horas e submetidos à tensão de 10 cm de coluna de água (1 kPa) em mesa de tensão até atingir o equilíbrio (aproximadamente 48 horas). Após a drenagem, os anéis foram pesados para determinação da massa úmida, e as amostras foram secas em estufa a 65 °C até massa constante para obtenção da massa seca. Os valores de CRA10 foram calculados com base nas massas úmida e seca, expressando a quantidade de água retida no substrato sob a tensão de 10 cm de coluna de água.

A determinação do pH e da condutividade elétrica (CE) dos biochars foi realizada utilizando amostras com granulometria abaixo de 2 mm. A suspensão foi preparada com 5 g de amostra em 50 mL de água deionizada, na proporção de 1:10 (m/v). A mistura foi mantida sob agitação a 40 rpm durante 1 hora, à temperatura de 25 °C, conforme metodologia adaptada de Singh *et al*. (2017). Em seguida, a suspensão permaneceu em repouso por 30 minutos antes da leitura do pH, efetuada com auxílio de um pHmetro digital. A condutividade elétrica foi medida na mesma suspensão, utilizando um condutivímetro da marca Tecnal, modelo TEC-4MP.

A área superficial específica e o diâmetro dos poros do biochar foram obtidos a partir

de amostras com granulometria entre 40 e 60 mesh (partículas que passaram pela peneira de 40 mesh e ficaram retidas na de 60 mesh), correspondendo a tamanhos entre aproximadamente 0,25 e 0,42 mm. As amostras, com massa de aproximadamente 10 mg, foram tratadas a 150 °C sob fluxo de nitrogênio por 4 h, utilizando o equipamento AUTOSORB-1 (Quantachrome). A área superficial específica foi determinada pelo método BET, e o volume e o diâmetro dos poros foram determinados pelo método BJH, conforme descrito por Barrett *et al*. (1951).

O biochar foi previamente peneirado, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na peneira de 60 mesh, correspondente a partículas com tamanho entre aproximadamente 0,25 e 0,42 mm. Em seguida, o material foi analisado por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). As análises foram realizadas em espectrofotômetro ALPHA II (Bruker, EUA), equipado com acessório de reflectância total atenuada (ATR), na faixa espectral de 400 a 4000 cm^{-1}, com 54 varreduras e resolução de 4 cm^{-1}. O equipamento encontra-se no Laboratório de Nanomateriais e Química Ambiental (LaNaQua), do Departamento de Química da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

3.5 Delineamento experimental

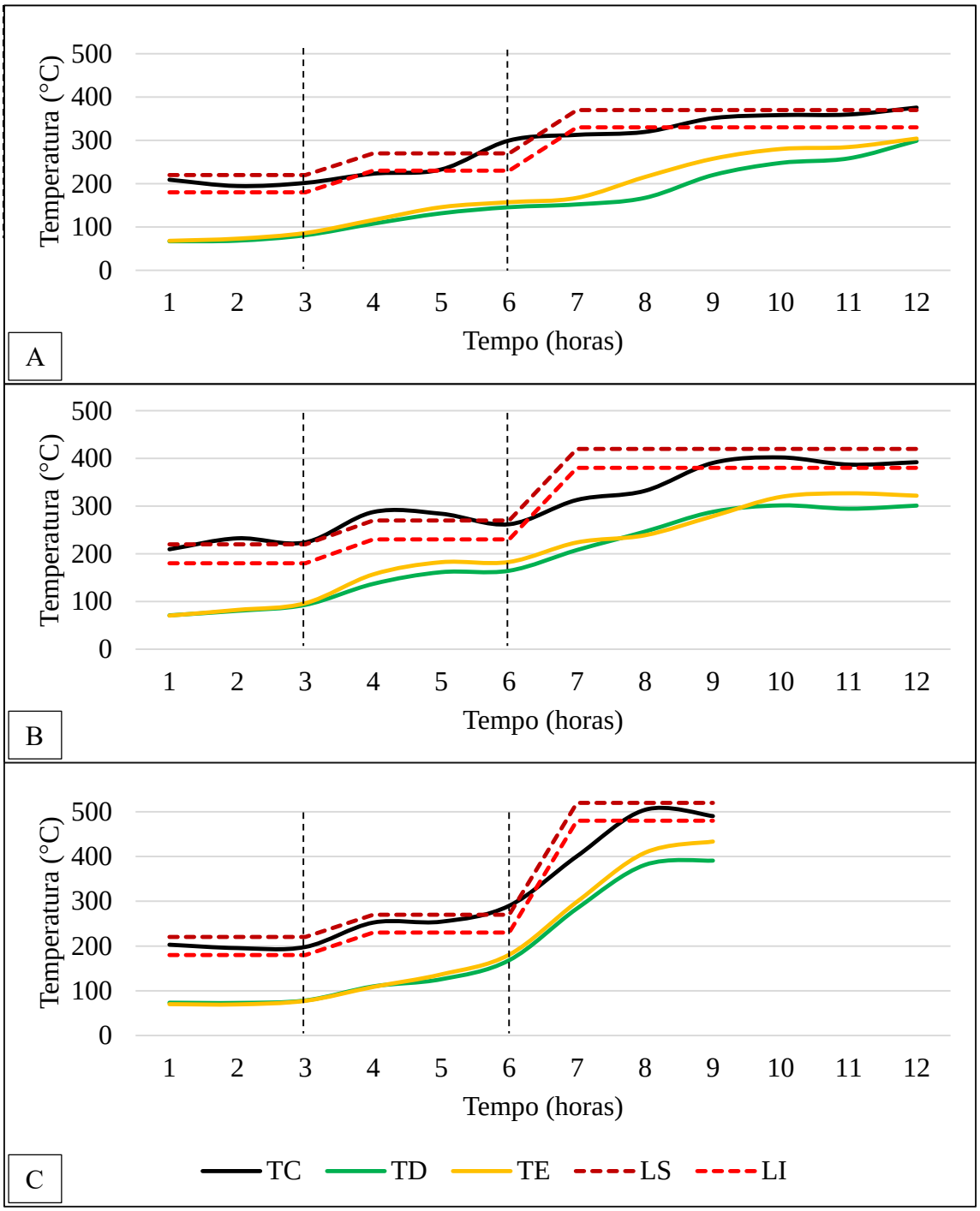
O experimento de carbonização no sistema forno-fornalha foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, com três tratamentos e duas repetições. Os resíduos foram avaliados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk e à homogeneidade das variâncias pelo teste de Bartlett. Atendidas as pressuposições, foi conduzida análise de variância (ANOVA) para identificar diferenças significativas entre os tratamentos. Quando foi identificado efeito significativo dos tratamentos, realizou-se o teste de comparação múltipla de médias de Tukey a 5% de significância. Foi utilizado o software R para as análises.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Perfil térmico do forno de carbonização

A Figura 4 representa os perfis térmicos dos tratamentos realizados com as temperaturas finais de 350 °C, 400 °C e 500 °C, mostrando o comportamento térmico do forno nos pontos de medição de temperatura (tampa metálica e paredes) ao longo do tempo de carbonização. Em um primeiro momento, observa-se que as curvas de carbonização com temperaturas finais de 350 °C (Figura 4A) e 400 °C (Figura 4B) apresentaram tempo total de carbonização de 12 horas, enquanto a carbonização com temperatura final de 500 °C (Figura 4C) foi concluída em apenas 9 horas. Essa diferença está associada à etapa final do processo, uma vez que a terceira fase da carbonização a 500 °C ocorreu em um intervalo 3 horas menor que o observado para os demais tratamentos. A redução do tempo necessário para a conclusão do processo pode estar associada ao aumento da velocidade das reações de degradação térmica da biomassa em temperaturas mais elevadas. Nessas condições, a desvolatilização é intensificada e a decomposição dos componentes lignocelulósicos ocorre mais rapidamente, especialmente da celulose (325–400 °C) e da lignina (300–550 °C), favorecendo a conversão da biomassa em biochar (Hu *et al*., 2021; Parvari *et al*., 2025).

Figura 4 – Perfis térmicos das carbonizações dos resíduos de coco verde, temperatura final de 350 °C (A), temperatura final de 400 °C (B) e temperatura final de 500 °C (C)



Fonte: O autor.
Nota: TC – Termopar no centro da tampa metálica; TD – Termopar da parede direita; TE – Termopar da parede esquerda; LS – Limite superior e LI – Limite inferior.

Na Tabela 2 encontram-se os percentuais de permanência da temperatura registrada pelo termopar localizado no centro da tampa metálica durante o processo de carbonização, dentro dos limites superior e inferior estabelecidos.

Tabela 2 – Percentual de permanência de temperatura de carbonização dentro do limite superior e inferior da curva teórica em sistema fornos-fornalha na carbonização de resíduos de coco verde

	Temperatura dentro da faixa (TDF)		
Tratamento	**350 °C**	**400 °C**	**500 °C**
TDF (%)	67	50	78

Fonte: O autor.

Entre 200 °C e temperaturas próximas a 350 °C ocorre a degradação das hemiceluloses e da celulose, intervalo associado à transição entre reações predominantemente endotérmicas e exotérmicas do processo de pirólise (Costa *et al*., 2020). Nessas temperaturas, em função da degradação desses componentes, também ocorrem picos decorrentes da decomposição térmica dos intermediários da pirólise e a liberação de gases em função de reações secundárias, que podem contribuir para maior instabilidade no processo (Jesus *et al*., 2019). No contexto das curvas adotadas neste estudo, a partir de 350 °C tem início a fase de fixação de carbono, caracterizada por reações predominantemente exotérmicas, associadas à formação de estruturas aromáticas mais estáveis e condensadas. Nessa etapa, tende a ocorrer redução na liberação de gases voláteis, refletindo o avanço das transformações estruturais da matriz carbonácea (Suman; Gautam, 2017; Andrade; Puga, 2023). A intensificação das reações exotérmicas associadas à degradação dos componentes lignocelulósicos e à decomposição dos intermediários da pirólise pode explicar o aumento de temperatura observado na sexta hora de carbonização nos tratamentos com temperatura final de 350 e 500 °C.

Acima de 200 °C até temperaturas próximas a 350 °C ocorre a degradação das hemiceluloses e da celulose, marcando o fim das reações endotérmicas e o início das reações exotérmicas do processo de pirólise (Costa *et al*., 2020). Nessas temperaturas, em função da degradação desses componentes, também ocorrem picos decorrentes da decomposição térmica dos intermediários da pirólise e a liberação de gases em função de reações secundárias, que podem causar maior instabilidade no processo (Jesus *et al*., 2019). A partir de 350 °C, tem início a fase de fixação de carbono, caracterizada por reações predominantemente exotérmicas, associadas à formação de estruturas aromáticas mais estáveis e condensadas. Nessa etapa,

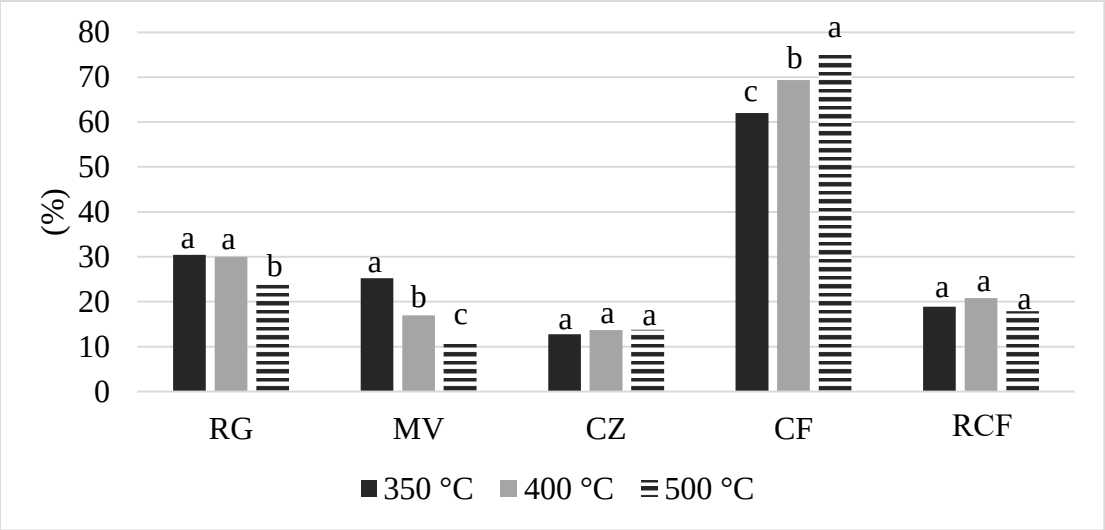
ocorre uma redução na liberação de gases voláteis, refletindo o avanço das transformações estruturais da matriz carbonácea (Suman; Gautam, 2017; Andrade; Puga, 2023). A intensificação das reações exotérmicas associadas à degradação dos componentes lignocelulósicos e à decomposição dos intermediários da pirólise pode explicar o aumento de temperatura observado na sexta hora de carbonização nos tratamentos com temperatura final de 350 e 500 °C.

A curva de carbonização da biomassa residual de coco verde, quando submetida à temperatura final de 500 °C, foi a que apresentou maior aderência aos limites definidos (± 20 °C), com exceção da fase de transição entre 250 °C e 350 °C. Observou-se uma dificuldade em atingir a temperatura de 500 °C dentro do tempo previsto, possivelmente associada à baixa densidade a granel do resíduo totalmente seco (80,35 kg/m³). Essa característica pode limitar a eficiência na transferência de calor, dificultando a elevação da temperatura na taxa desejada. Diante desse comportamento, sugere-se a adoção de uma etapa intermediária de patamar térmico entre 250 °C e 500 °C, de forma a adequar o ritmo de aquecimento e permitir que as transformações térmicas e estruturais da biomassa residual de coco verde ocorram de maneira mais controlada e eficiente.

4.2 Rendimento e propriedades dos biochar

Os valores médios de rendimento gravimétrico e composição química imediata do biochar da biomassa residual de coco verde produzido em diferentes temperaturas finais estão apresentados na Figura 5. De acordo com a análise de variância, houve efeito dos tratamentos no rendimento e na composição química imediata dos biochars produzidos a partir de resíduos de coco verde, exceto para o teor de cinzas.

Figura 5 – Rendimento gravimétrico e composição química imediata do biochar da biomassa residual de coco verde em função das temperaturas finais de carbonização no sistema fornos-fornalha



Fonte: O autor.
Legenda: RG – rendimento gravimétrico; MV – materiais voláteis; CZ – cinzas; CF – carbono fixo; RCF – rendimento em carbono fixo.
Nota: Para cada variável, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Observa-se que, à medida que aumentou a temperatura final de carbonização, ocorreu redução significativa no teor de materiais voláteis e aumento no teor de carbono fixo. O teor de cinzas não foi afetado significativamente pelos tratamentos. O rendimento gravimétrico dos biochars produzidos a 500 °C foi significativamente menor em relação aos demais tratamentos.

Conforme relatado por Ighalo *et al*. (2023), há uma tendência de redução do rendimento com o aumento da temperatura de carbonização. A biomassa é composta principalmente por hemiceluloses, celulose e lignina. Cada um desses componentes degrada-se em diferentes faixas de temperatura: as hemiceluloses decompõem-se entre 200 °C e 320 °C, a celulose entre 314 °C e 500 °C, e a lignina se decompõe em uma faixa mais ampla, podendo estender-se até temperaturas próximas a 900 °C (Visser; Seroka; Khotseng, 2024). À medida que a temperatura final de carbonização aumenta, mais desses componentes orgânicos são decompostos. Essa decomposição resulta na liberação de moléculas menores na forma de gases, como CO, CO_2, H_2 e CH_4 (Costa *et al*., 2020), reduzindo a quantidade de material sólido remanescente (biochar).

Apesar da redução no rendimento com o aumento da temperatura, é importante destacar que a produção de biochar visa, além do sólido, a qualidade do produto, especialmente no que se refere ao teor de carbono fixo e à estabilidade do material. O biochar obtido a 500 °C

apresentou maior teor de carbono fixo, igual a 75,38%, superior ao relatado por Yustanti *et al*. (2021), que encontraram 64,49% em cascas de coco carbonizadas a 500 °C em forno rotativo. Esse teor de carbono evidencia o potencial dos resíduos de coco verde para a produção de biochar com elevada concentração de carbono, reforçando sua aplicabilidade como biochar agrícola.

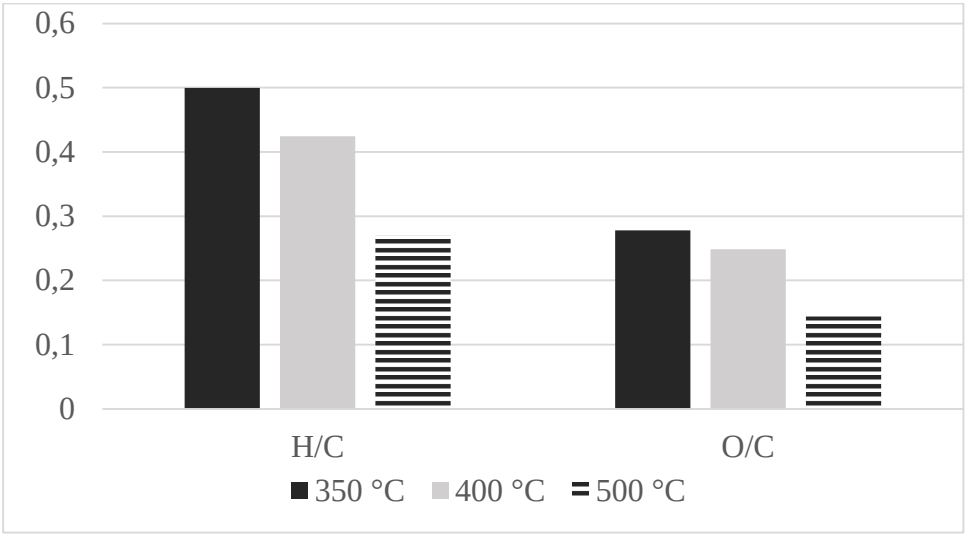
O aumento da temperatura de pirólise promove maior desvolatilização da biomassa, reduzindo os teores de hidrogênio e oxigênio na matriz carbonizada (Weber; Quicker, 2018; Oginni; Singh, 2020). Esse processo de desvolatilização está diretamente relacionado ao aumento do carbono fixo, estabelecendo uma relação inversa entre a perda de voláteis e o acúmulo de carbono estável (Weber; Quicker, 2018; Oginni; Singh, 2020). Tais transformações químicas contribuem para o aumento da estabilidade do biochar e reforçam seu potencial de uso como condicionador de solo e para o armazenamento de carbono em longo prazo.

Os teores de cinzas obtidos, entre 12,77 e 13,69%, são considerados elevados. Entretanto, esse comportamento já era esperado, uma vez que a biomassa residual de coco verde apresentou teor de cinzas próximo de 5,10% na condição *in natura*, indicando uma concentração relativamente elevada de constituintes minerais na matéria-prima. Durante a carbonização, a degradação da matéria orgânica e a liberação de compostos voláteis promovem a concentração desses elementos na fração sólida remanescente, resultando no aumento do teor de cinzas do biochar (Zhao; Ta; Wang, 2017). Considerando que as cinzas correspondem à fração inorgânica presente no material, faz-se necessária a análise de sua composição química para compreender quais minerais e metais compõem o biochar e como esses elementos podem contribuir ou limitar sua aplicação no solo (Khawkomol *et al*., 2021).

O rendimento em carbono fixo não apresentou diferença significativa entre os tratamentos (Figura 5), com valor médio igual a 19,9%, indicando que as variações no rendimento gravimétrico e no teor de carbono fixo ocorreram de forma compensatória. Embora a temperatura final de 500 °C tenha proporcionado menor rendimento gravimétrico, esse tratamento apresentou maior concentração de carbono fixo no biochar, associada à intensificação das reações de desvolatilização e à concentração da fração carbonosa durante a pirólise. Dessa forma, o aumento do teor de carbono fixo compensou a redução da massa de biochar produzida, mantendo o rendimento em carbono fixo sem diferenças significativas entre os tratamentos.

Os resultados das razões atômicas H/C e O/C do biochar da biomassa residual de coco verde estão apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Razões atômicas H/C e O/C do biochar da biomassa residual de coco verde em função das temperaturas finais de carbonização no sistema fornos-fornalha



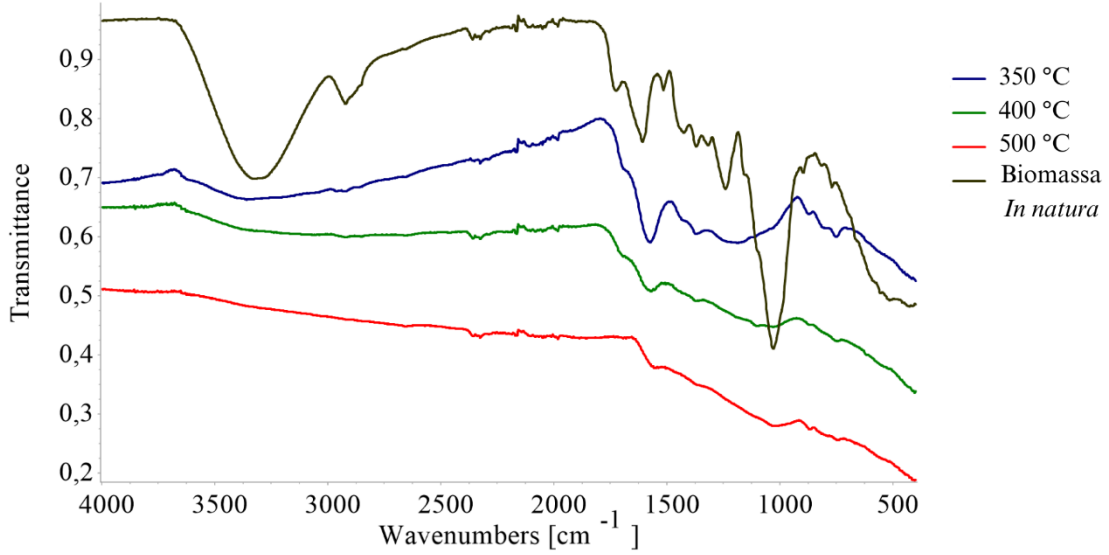
Fonte: O autor.

Em relação à composição química elementar, observou-se uma tendência de aumento do carbono elementar e decréscimo de oxigênio e hidrogênio com o aumento da temperatura final de carbonização, resultando na redução das razões O/C e H/C. Yustanti *et al*. (2021), ao carbonizar resíduos de coco verde, observaram a mesma tendência.

Para o tratamento de 500 °C, as razões H/C (0,270) e O/C (0,143) do biochar foram menores em relação aos tratamentos com temperatura de 350 e 400 °C. Estudos indicam que biochars com razão H/Corg ≤ 0,4 apresentam elevada estabilidade, sendo estimado que pelo menos 70% do carbono orgânico permaneça após 100 anos (Budai *et al*., 2013; Adhikari *et al*., 2024). Normativas como as da European Biochar Certificate (EBC), International Biochar Initiative (IBI) e Puro.earth utilizam a razão H/Corg inferior a 0,7 como indicador de estabilidade do carbono (EBC, 2022; IBI, 2015; Puro.earth, 2024). Embora, no presente estudo, a razão H/C tenha sido calculada a partir do carbono total determinado por análise elementar, os baixos valores observados, especialmente no biochar produzido a 500 °C, são compatíveis com os valores de referência utilizados para biochars de elevada estabilidade e reforçam o potencial desse material para o armazenamento de carbono em longo prazo.

Para melhor compreender as transformações estruturais ocorridas durante a carbonização dos resíduos de coco verde, foi realizada a análise por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) (Figura 7).

Figura 7 – Espectros FTIR da biomassa residual de coco verde e dos biochars produzidos em função das temperaturas finais de carbonização no sistema fornos-fornalha



Fonte: O autor.

A comparação dos espectros FTIR da biomassa residual de coco verde e dos biochars produzidos em diferentes temperaturas finais de carbonização revelou alterações significativas na intensidade e na presença de bandas características dos constituintes lignocelulósicos (Tabela 3).

Tabela 3 – Atribuição das principais bandas identificadas nos espectros FTIR da biomassa residual de coco verde e dos biochars produzidos em diferentes temperaturas finais de carbonização no sistema fornos-fornalha

Banda (cm^{-1})	**Atribuição**	**Componente associado**	**Referências**
~3400	Estiramento O–H	Celulose, hemiceluloses e água adsorvida	Suman e Gautam (2017); Nair, Mondal e Weichgrebe (2022)
2920–2850	Estiramento C–H alifático	Grupos metileno e metila de cadeias alifáticas	Rambhatla *et al*. (2025); Mishra, Chinnam e Sharma (2025)
~1600	Estiramento C=C aromático	Lignina e estruturas aromáticas condensadas	Domingues *et al*. (2017); Sarfaraz *et al*. (2020)
1030–1100	Estiramento C–O e grupos CH_2OH	Celulose e hemiceluloses	Shah *et al*. (2018); McCall *et al*. (2025)

Fonte: Elaborado pelo autor com base nas referências apresentadas na tabela.

As principais mudanças ocorreram nas regiões de aproximadamente 3400 cm^{-1}, 2920–2850 cm^{-1} e 1030–1100 cm^{-1}, associadas, respectivamente, aos grupos hidroxila (–OH), ligações C–H alifáticas e ligações C–O presentes principalmente em celulose e hemiceluloses.

Em contraste, a banda em torno de 1600 cm^{-1}, atribuída às vibrações C=C de estruturas aromáticas derivadas da lignina e de compostos aromáticos condensados, permaneceu presente em todos os biochars, sugerindo maior estabilidade térmica dessas estruturas em comparação aos constituintes lignocelulósicos mais lábeis.

A biomassa residual de coco verde *in natura* apresentou bandas intensas e bem definidas, refletindo sua natureza lignocelulósica. A banda larga observada em aproximadamente 3400 cm^{-1} é atribuída ao estiramento vibracional dos grupos hidroxila (–OH), associados a grupos oxigenados da biomassa e à água adsorvida (Nair; Mondal; Weichgrebe, 2022). As bandas em aproximadamente 2920 cm^{-1} e 2850 cm^{-1} estão associadas ao estiramento de ligações C–H alifáticas presentes em grupos metileno e metila (Nair; Mondal; Weichgrebe, 2022). Já a intensa banda observada entre 1030 e 1100 cm^{-1} é atribuída principalmente ao estiramento de ligações C–O associadas aos polissacarídeos da biomassa, especialmente celulose e hemiceluloses (Shah *et al*., 2018; Nair; Mondal; Weichgrebe, 2022).

Em comparação à biomassa *in natura*, os biochars apresentaram redução progressiva da intensidade das bandas associadas aos grupos oxigenados e estruturas alifáticas. A diminuição da banda em aproximadamente 3400 cm^{-1} está associada à perda de grupos hidroxila durante a carbonização (Liu *et al*., 2018). Da mesma forma, a redução das bandas em 2920–2850 cm^{-1} e 1030–1100 cm^{-1} evidencia a degradação térmica dos carboidratos estruturais, especialmente celulose e hemiceluloses, e a consequente eliminação de grupos funcionais oxigenados mais lábeis (Liu *et al*., 2018). Essas alterações refletem o avanço dos processos de carbonização, desoxigenação e aromatização durante a conversão da biomassa em biochar, resultando em materiais com maior estabilidade química (Kujawska *et al*., 2026).

Entre os biochars, as diferenças espectrais foram mais evidentes com o aumento da temperatura final de carbonização. O material produzido a 350 °C ainda preservou características espectrais da biomassa original, enquanto aqueles obtidos a 400 e 500 °C apresentaram espectros progressivamente mais simplificados. A redução mais pronunciada da banda em 1030–1100 cm^{-1} e da banda larga em 3400 cm^{-1} nos tratamentos de maior temperatura indica maior degradação dos polissacarídeos e remoção de grupos funcionais contendo oxigênio (Liu *et al*., 2018). Embora a intensidade da banda em torno de 1600 cm^{-1} também diminua com o aumento da temperatura, sua permanência em todos os biochars é consistente com a presença de estruturas aromáticas mais resistentes à degradação térmica (Kujawska *et al*., 2026).

As modificações observadas nos espectros FTIR corroboram os resultados da análise elementar e das razões atômicas H/C e O/C obtidos neste estudo, que evidenciaram redução progressiva dos teores relativos de hidrogênio e oxigênio com o aumento da temperatura de

carbonização. Em conjunto, esses resultados são consistentes com a ocorrência de processos de desoxigenação, incluindo desidroxilação, descarboxilação e descarbonilação, associados ao aumento da fração aromática e à formação de estruturas carbonosas mais condensadas durante a pirólise (Chen *et al*., 2022).

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios das propriedades físico-químicas dos biochars de resíduos de coco verde em função da temperatura final de carbonização no sistema fornos-fornalha.

Tabela 4 – Propriedades dos biochars da biomassa residual de coco verde em função das temperaturas finais de carbonização no sistema fornos-fornalha

Propriedade	**350 °C**	**400 °C**	**500 °C**
Área Superficial (m^2/g)	5,36	17,89	84,26
Volume de poros (cm^3/g)	0,0096	0,0157	0,0539
Diâmetro de poros (nm)	0,70	1,045	0,97
pH	9,25	9,82	10,34
CE (dS/m)	3,10	4,23	6,09
CRA (m/m) %	338,67	270,72	243,44
CTC ($mmol_c/kg$)	658,79	532,66	471,54

Fonte: O autor.
Legenda: CE: condutividade elétrica, CRA: capacidade de retenção de água e CTC: capacidade de troca catiônica.

Observa-se que a área superficial e o volume de poros aumentaram com o incremento da temperatura final de carbonização (Tabela 4). Esse comportamento é frequentemente observado em biochars e está relacionado às transformações físico-químicas que ocorrem durante a pirólise. À medida que a temperatura de pirólise aumenta, ocorre maior decomposição e liberação da fração volátil da biomassa, favorecendo o desenvolvimento da estrutura porosa do biochar (Tu *et al*., 2022). A remoção desses compostos promove a formação de espaços vazios e canais na estrutura carbonosa, aumentando a área superficial e favorecendo o desenvolvimento de microporos e mesoporos (Tu *et al*., 2022; Dhar *et al*., 2022).

Em relação à área superficial, Adorna *et al*. (2020), ao produzirem biochar de casca de coco a 550 °C, obtiveram área superficial de 97,40 m^2/g. Pituya *et al*. (2017), ao produzirem biochar de casca de coco em forno tipo mufla, obtiveram valores entre 4,01 e 11,32 m^2/g a 400 °C, dependendo do tempo de residência. No presente estudo, foram obtidos valores variando de 5,36 a 84,26 m^2/g, utilizando-se o sistema fornos-fornalha adaptado. Esses resultados evidenciam que, além da temperatura, as condições de carbonização influenciam o desenvolvimento da estrutura porosa do biochar.

A área superficial é uma propriedade relevante para a aplicação do biochar no solo, pois

está relacionada à sua capacidade de adsorção e retenção de nutrientes e, juntamente com a estrutura porosa e os grupos funcionais superficiais, influencia as interações do material com diferentes compostos e microrganismos. Essas características são fortemente influenciadas tanto pelas propriedades da matéria-prima quanto pelas condições empregadas durante o processo de carbonização (Ajien *et al*., 2022; Manikandan *et al*., 2023).

Observa-se que o diâmetro médio de poros aumentou com a elevação da temperatura de carbonização, principalmente entre os biochars produzidos a 350 °C e 400 °C. O valor passou de 0,70 nm para 1,045 nm, correspondendo a um aumento de aproximadamente 49,3%. Em relação ao biochar produzido a 500 °C, o diâmetro médio de poros foi de 0,97 nm, valor 38,6% superior ao observado a 350 °C, porém 7,2% inferior ao registrado a 400 °C. Esse comportamento demonstra que as condições de carbonização promoveram alterações na estrutura porosa do material, embora o diâmetro médio não tenha apresentado aumento contínuo entre 400 e 500 °C.

Esse comportamento é coerente com o relato de Tu *et al*. (2022), que descrevem que temperaturas mais elevadas promovem a expansão de microporos em mesoporos e, eventualmente, a conversão de alguns mesoporos em macroporos, contribuindo para alterações na distribuição do tamanho dos poros e para o aumento da área superficial específica do biochar.

Os valores de pH apresentaram pouca variação entre os tratamentos avaliados, com média geral de 9,8. Apesar da ausência de efeito da temperatura de carbonização sobre essa variável, todos os biochars apresentaram caráter alcalino, indicando potencial para utilização como condicionadores de solos ácidos. Esse efeito está relacionado à presença de compostos minerais alcalinos e à capacidade tamponante do biochar, além da presença de cátions básicos, como potássio, cálcio, magnésio e sódio (Fidel *et al*., 2017). Dessa forma, sua aplicação apresenta potencial para contribuir para a elevação do pH e a redução da acidez do solo, dependendo das características do biochar, do solo e da dose aplicada.

A condutividade elétrica (CE) foi maior no tratamento a 500 °C em comparação aos tratamentos a 350 °C e 400 °C (Tabela 4), indicando maior concentração de constituintes iônicos solúveis no biochar. A CE é uma medida relacionada à concentração de sais solúveis, sendo influenciada pela matéria-prima e pelas condições empregadas na produção do biochar (Fawzy *et al*., 2021). É importante ressaltar que o valor de referência de 4,0 dS/m, comumente utilizado para classificar solos como salinos, refere-se à condutividade elétrica do extrato de saturação do solo, e não à do biochar avaliado isoladamente (Zaman *et al*., 2020). Dessa forma, os valores de CE obtidos não permitem, isoladamente, inferir a salinidade que será promovida

após a aplicação do biochar ao solo, uma vez que esse efeito depende, entre outros fatores, da dose aplicada e das características do solo e do próprio biochar.

Embora a presença de sais solúveis no biochar possa contribuir para o fornecimento de nutrientes, valores elevados de CE requerem atenção em aplicações agronômicas, especialmente quando são utilizadas doses elevadas ou em culturas sensíveis à salinidade. Dessa forma, a definição da dose de aplicação deve considerar a CE do biochar e as características químicas do solo, evitando o acúmulo excessivo de sais na solução do solo (Fawzy *et al*., 2021)

Os resultados obtidos indicam uma redução tanto na capacidade de retenção de água (CRA) quanto na capacidade de troca catiônica (CTC) dos biochars à medida que aumentou a temperatura final de carbonização (Tabela 4). Em relação ao biochar produzido a 350 °C, a CRA diminuiu 20,06% a 400 °C e 28,12% a 500 °C, enquanto a CTC foi reduzida em 19,15% e 28,42%, respectivamente.

A diminuição da CRA nos tratamentos submetidos a maiores temperaturas pode estar associada às modificações estruturais e químicas promovidas pela pirólise. Em temperaturas mais elevadas, ocorre redução de grupos funcionais contendo oxigênio e hidrogênio na superfície do biochar, diminuindo sua polaridade e podendo alterar sua interação com a água (Tomczyk; Sokołowska; Boguta, 2020). Esse comportamento é consistente com a redução das razões H/C e O/C observada no presente estudo (Figura 6). A análise de FTIR (Figura 7) também corrobora essa interpretação ao demonstrar redução das bandas associadas aos grupos O–H e C–O nos biochars produzidos nos tratamentos de maior temperatura. A menor presença de grupos funcionais polares pode reduzir as interações entre a superfície do biochar e as moléculas de água, contribuindo para a menor CRA observada nesses tratamentos.

De maneira semelhante, a redução da CTC nos tratamentos de maior temperatura está relacionada às modificações químicas ocorridas na superfície do biochar. A CTC depende da presença de grupos funcionais oxigenados, especialmente grupos carboxílicos e fenólicos, que contribuem para a formação de cargas negativas superficiais e para a retenção de cátions (Domingues *et al*., 2017; Ippolito *et al*., 2020). A redução da razão O/C (Figura 6) e das bandas associadas a grupos oxigenados nos espectros de FTIR (Figura 7) é consistente com a menor presença desses grupos superficiais nos biochars produzidos nos tratamentos de maior temperatura. Dessa forma, a redução dos sítios superficiais capazes de reter cátions pode contribuir para a menor CTC observada nesses tratamentos.

Apesar das reduções observadas, todos os tratamentos apresentaram valores superiores aos limites mínimos de CRA e CTC estabelecidos pela Instrução Normativa SDA nº 35/2006

do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) para condicionadores de solo destinados à melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas do solo, que estabelece CRA mínima de 60% (m/m) e CTC mínima de 200 mmolc kg^{-1}. Os valores de CRA obtidos foram expressivamente superiores ao limite estabelecido: 338,67% (350 °C), 270,72% (400 °C) e 243,44% (500 °C), evidenciando elevada capacidade de retenção de água. Da mesma forma, os valores de CTC também foram elevados, atingindo 658,79, 532,66 e 471,54 mmolc kg^{-1}, respectivamente.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados das análises de macronutrientes dos biochars produzidos nas diferentes condições de carbonização.

Tabela 5 – Macronutrientes presentes nos biochars da biomassa residual de coco verde em função das temperaturas finais de carbonização no sistema fornos-fornalha

Tratamento	**Macronutrientes (mg/kg)**			
	K	**Ca**	**Mg**	**P**
350 °C	28597,6	3338,0	3328,6	2039,2
400 °C	25547,0	3417,7	3517,6	2104,9
500 °C	26430,2	3845,0	3825,3	2049,0

Fonte: O autor.

Os nutrientes com as maiores concentrações no biochar de coco verde foram potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e fósforo (P), macronutrientes importantes para o desenvolvimento das plantas. Entre esses, o potássio e o fósforo são classificados como macronutrientes primários, enquanto o cálcio e o magnésio são classificados como macronutrientes secundários.

A Tabela 5 mostra que, nas temperaturas finais avaliadas, de 350 °C a 500 °C, os macronutrientes Ca e Mg apresentaram incremento com o aumento da temperatura. Esse comportamento é consistente com o aumento da concentração de nutrientes minerais em biochars produzidos em temperaturas mais elevadas observado por Wang *et al*. (2020). Em contrapartida, os teores de K e P apresentaram variações menos definidas entre as temperaturas, indicando comportamento distinto em relação ao Ca e Mg durante o processo de carbonização.

Destaca-se que, independentemente do tratamento, o biochar apresentou teores de potássio superiores a 25 kg por tonelada de biochar, indicando uma concentração relevante desse nutriente no material. Ressalta-se, entretanto, que o teor total de potássio não corresponde necessariamente à fração prontamente disponível para as plantas, uma vez que sua disponibilidade depende da forma química e das características do biochar (Shamila *et al*.,

2024). Dessa forma, o biochar apresenta potencial para contribuir para o fornecimento de potássio ao solo, embora sua contribuição agronômica dependa da disponibilidade e da liberação desse nutriente após a aplicação.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados das análises de micronutrientes dos biochars produzidos nas diferentes condições de carbonização.

Tabela 6 – Micronutrientes presentes nos biochars da biomassa residual de coco verde em função das temperaturas finais de carbonização no sistema fornos-fornalha

Tratamento	**Micronutrientes (mg/kg)**			
	Fe	**Mn**	**Zn**	**Cu**
350 °C	230,07	32,801	23,432	12,426
400 °C	206,67	35,826	23,467	14,664
500 °C	246,67	38,253	26,202	16,706

Fonte: O autor.

Os teores de Mn, Zn e Cu apresentaram tendência de aumento com a elevação da temperatura final de carbonização, enquanto o Fe apresentou comportamento não linear, com redução a 400 °C e aumento a 500 °C (Tabela 6). O aumento da concentração de elementos minerais em biochars produzidos em temperaturas mais elevadas pode estar associado à redução da massa da fração orgânica durante a pirólise, promovendo seu enriquecimento relativo na fração sólida remanescente. Comportamento semelhante foi observado por Wang *et al*. (2020), que verificaram aumento da concentração de diversos nutrientes minerais e metais com a elevação da temperatura e do tempo de pirólise, embora o comportamento possa variar entre os elementos.

O monitoramento das concentrações de elementos potencialmente tóxicos no biochar é importante para avaliar a segurança de sua aplicação ao solo (Wang *et al*., 2020; Lataf *et al*., 2022). Entre os elementos determinados neste estudo, cobre e zinco estão contemplados nos valores de referência apresentados pelo International Biochar Initiative (IBI), que reúne limites máximos estabelecidos em diferentes regulamentações internacionais. Para o Cu, esses limites variam de 143 a 6000 mg/kg, enquanto para o Zn variam de 416 a 7400 mg/kg (IBI, 2015). As concentrações máximas observadas neste estudo, de 16,706 mg/kg para Cu e 26,202 mg/kg para Zn, permaneceram abaixo até dos menores valores dessas faixas.

5 CONCLUSÃO

A produção de biochar a partir dos resíduos do fruto de *Cocos nucifera* L. em sistema forno-fornalha mostrou-se tecnicamente viável, permitindo a adaptação e validação de uma tecnologia de baixo custo alinhada aos princípios da economia circular. O sistema possibilitou o monitoramento eficiente do perfil térmico e o desenvolvimento de curvas de carbonização controladas em escala piloto.

Entretanto, foram observadas diferenças na estabilidade dos perfis térmicos entre os tratamentos, destacando-se a carbonização a 400 °C, que permaneceu dentro da faixa desejada em apenas 50% do tempo. Esses resultados indicam a necessidade de aprimoramentos no controle térmico do processo. A adoção de um patamar térmico intermediário antes da elevação para temperaturas mais altas pode ser avaliada em estudos futuros como estratégia para favorecer maior estabilidade da carbonização.

O aumento da temperatura final de carbonização promoveu a redução do rendimento gravimétrico e dos teores de materiais voláteis, além do aumento do carbono fixo e do desenvolvimento da estrutura porosa dos biochars. O biochar produzido a 500 °C apresentou as menores razões H/C e O/C e a maior área superficial, características associadas à maior estabilidade do carbono e ao desenvolvimento da porosidade. Embora a CRA e a CTC tenham diminuído nos tratamentos de maior temperatura, todos os biochars apresentaram valores superiores aos limites mínimos estabelecidos pela Instrução Normativa SDA nº 35/2006 para essas duas propriedades em condicionadores de solo.

De forma geral, os resultados demonstram o potencial técnico do sistema fornos-fornalha para a conversão de resíduos de coco verde em biochar, constituindo uma alternativa para a valorização dessa biomassa residual e para a produção de materiais carbonizados com potencial de aplicação agronômica e armazenamento de carbono em longo prazo.

REFERÊNCIAS

ADHIKARI, S. *et al.* Comparative analysis of biochar carbon stability methods and implications for carbon credits. **Science of the Total Environment**, v. 914, 169607, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169607.

ADORNA, J. *et al.* Coconut shell derived activated biochar-manganese dioxide nanocomposites for high performance capacitive deionization. **Desalination**, v. 492, 114602, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114602.

AJIEN, A. *et al.* Coconut shell and husk biochar: a review of production and activation technology, economic, financial aspect and application. **Waste Management & Research**, v. 41, n. 1, p. 37-51, 2023. DOI: https://doi.org/10.1177/0734242X221127167.

ANDRADE, C. A. de; PUGA, A. P. Biocarvão: uso agrícola e ambiental. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C. A. de (ed.). **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. cap. 14, p. 435-473.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6923: carvão vegetal - amostragem e preparação da amostra**. Rio de Janeiro: ABNT, 1981. 15 p.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D1762-84(2021): Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021. DOI: https://doi.org/10.1520/D1762-84R21.

BARRETT, E. P.; JOYNER, L. G.; HALENDA, P. P. The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms. **Journal of the American Chemical Society**, v. 73, n. 1, p. 373-380, 1951. DOI: https://doi.org/10.1021/ja01145a126.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa SDA nº 31, de 23 de outubro de 2008**. Altera os subitens 3.1.2, 4.1 e 4.1.2 do Anexo à Instrução Normativa SDA nº 17, de 21 de maio de 2007. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 24 out. 2008. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-31-de-23-10-2008-altera-metodo-substrato.pdf. Acesso em: 27 nov. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa SDA nº 35, de 4 de julho de 2006**. Aprova as normas sobre especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, de alcalinidade e de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 12 jul. 2006. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-35-de-4-7-2006-corretivos.pdf. Acesso em: 27 nov. 2024.

BRASSARD, P.; GODBOUT, S.; RAGHAVAN, V. G. S. Pyrolysis in auger reactors for biochar and bio-oil production: a review. **Biosystems Engineering**, v. 161, p. 80-92, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.020.

BUDAI, A. *et al.* **Biochar Carbon Stability Test Method: an assessment of methods to determine biochar carbon stability**. International Biochar Initiative, 2013. Disponível em: https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/06/IBI_Report_Biochar_Stability_Test_Method_Final.pdf. Acesso em: 15 nov. 2024.

CARNEIRO, A. C. O. *et al.* Circular economy in charcoal production: valorization of residues for increased efficiency and sustainability. **Sustainability**, v. 17, n. 7, 3191, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/su17073191.

CHEN, D. *et al.* Insight into biomass pyrolysis mechanism based on cellulose, hemicellulose, and lignin: evolution of volatiles and kinetics, elucidation of reaction pathways, and characterization of gas, biochar and bio-oil. **Combustion and Flame**, v. 242, 112142, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112142.

COSTA, J. M. N. *et al.* Influência da temperatura de pirólise nas emissões gasosas, rendimentos e densidade do carvão vegetal. **Ciência da Madeira**, v. 11, n. 1, p. 53-62, 2020. DOI: https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v11n1p53-62.

DEVENS, K. U. *et al.* Characterization of biochar from green coconut shell and orange peel wastes. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 2, p. 288-294, 2018. DOI: https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180022.

DHAR, S. A.; SAKIB, T. U.; HILARY, L. N. Effects of pyrolysis temperature on production and physicochemical characterization of biochar derived from coconut fiber biomass through slow pyrolysis process. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 12, n. 7, p. 2631-2647, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s13399-020-01116-y.

DIN. **DIN EN ISO 16948:2015-09: Solid biofuels - Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen (ISO 16948:2015)**. Berlin: DIN, 2015. DOI: https://doi.org/10.31030/2244183.

DIN. **DIN EN ISO 16993:2016-11: Solid biofuels - Conversion of analytical results from one basis to another (ISO 16993:2016)**. Berlin: DIN, 2016. DOI: https://doi.org/10.31030/2555895.

DIN. **DIN EN ISO 16994:2016-12: Solid biofuels - Determination of total content of sulfur and chlorine (ISO 16994:2016)**. Berlin: DIN, 2016. DOI: https://doi.org/10.31030/2558210.

DOMINGUES, R. R. *et al.* Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **PLOS ONE**, v. 12, n. 5, e0176884, 2017. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176884.

ENDERS, A. *et al.* Total elemental analysis of metals and nutrients in biochars. In: SINGH, B.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; LEHMANN, J. (ed.). **Biochar: a guide to analytical methods**. Clayton South: CSIRO Publishing, 2017. p. 95-108.

EUROPEAN BIOCHAR CERTIFICATE (EBC). **European Biochar Certificate: Guidelines for a Sustainable Production of Biochar**. Version 10.0E. Arbaz, Switzerland: European

Biochar Foundation, 2022. Disponível em: https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version_en_10_0.pdf. Acesso em: 15 nov. 2024.

FAWZY, S. *et al.* Industrial biochar systems for atmospheric carbon removal: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 19, p. 3023-3055, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s10311-021-01210-1.

FIDEL, R. B. *et al.* Characterization and quantification of biochar alkalinity. **Chemosphere**, v. 167, p. 367-373, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.151.

GRABER, E. R. *et al*. Determination of cation exchange capacity in biochar. In: SINGH, B.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; LEHMANN, J. (ed.). **Biochar: a guide to analytical methods**. Clayton South: CSIRO Publishing, 2017. p. 74–84.

HU, Z. *et al.* Effects of pyrolysis parameters on the distribution of pyrolysis products of Miscanthus. **Progress in Reaction Kinetics and Mechanism**, v. 46, 14686783211010970, 2021. DOI: https://doi.org/10.1177/14686783211010970.

IGHALO, J. O. *et al.* Biochar from coconut residues: an overview of production, properties, and applications. **Industrial Crops and Products**, v. 204, 117300, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117300.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção Agrícola Municipal 2023**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/66/pam_2023_v50_br_informativo.pdf. Acesso em: 03 nov. 2024.

INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE (IBI). **Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil**. Version 2.1. 23 nov. 2015. Disponível em: https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2020/06/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final2.pdf. Acesso em: 3 nov. 2024.

IPPOLITO, J. A. *et al.* Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. **Biochar**, v. 2, n. 4, p. 421-438, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x.

JESUS, M. S. *et al.* Thermal decomposition fundamentals in large-diameter wooden logs during slow pyrolysis. **Wood Science and Technology**, v. 53, n. 6, p. 1353-1372, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s00226-019-01133-9.

KHAN, S. *et al.* Biochar production and characteristics, its impacts on soil health, crop production, and yield enhancement: a review. **Plants**, v. 13, n. 2, 166, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/plants13020166.

KHAWKOMOL, S. *et al.* Potential of biochar derived from agricultural residues for sustainable management. **Sustainability**, v. 13, n. 15, 8147, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/su13158147.

KUJAWSKA, J. *et al.* Effect of pyrolysis temperature on chemical structure and thermal stability of digestate-based biochar. **Energies**, v. 19, n. 4, 1043, 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/en19041043.

LATAF, A. *et al.* The effect of pyrolysis temperature and feedstock on biochar agronomic properties. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 168, 105728, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105728.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). **Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation**. 2. ed. London: Routledge, 2015.

LIU, Z. *et al.* Effect of the carbonization temperature on the properties of biochar produced from the pyrolysis of crop residues. **BioResources**, v. 13, n. 2, p. 3429-3446, 2018. DOI: https://doi.org/10.15376/biores.13.2.3429-3446.

MANIKANDAN, S. *et al.* Comprehensive review on recent production trends and applications of biochar for greener environment. **Bioresource Technology**, v. 388, 129725, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129725.

MCCALL, M. A. *et al.* Biochar stability revealed by FTIR and machine learning. **ACS Sustainable Resource Management**, v. 2, n. 5, p. 842-852, 2025. DOI: https://doi.org/10.1021/acssusresmgt.5c00104.

MISHRA, R. K.; CHINNAM, S.; SHARMA, A. Thermocatalytic pyrolysis of low-value waste biomass: thermal decomposition, kinetics behaviour, and biochar characterization. **Results in Engineering**, v. 25, 104210, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104210.

MOSER, K. *et al.* Screw reactors and rotary kilns in biochar production - a comparative review. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 174, 106112, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106112.

NAIR, R. R.; MONDAL, M. M.; WEICHGREBE, D. Biochar from co-pyrolysis of urban organic wastes-investigation of carbon sink potential using ATR-FTIR and TGA. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 12, p. 4729-4743, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s13399-020-01000-9.

OGINNI, O.; SINGH, K. Influence of high carbonization temperatures on microstructural and physicochemical characteristics of herbaceous biomass derived biochars. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 5, 104169, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104169.

OLIVEIRA, A. C. *et al.* Análise de risco econômico de dois sistemas produtivos de carvão vegetal. **Floresta e Ambiente**, v. 24, e20160265, 2017. DOI: https://doi.org/10.1590/2179-8087.026516.

PARVARI, E.; MAHAJAN, D.; HEWITT, E. L. A review of biomass pyrolysis for production of fuels: chemistry, processing, and techno-economic analysis. **Biomass**, v. 5, n. 3, 54, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/biomass5030054.

PITUYA, P.; SRIBURI, T.; WIJITKOSUM, S. Properties of biochar prepared from acacia wood and coconut shell for soil amendment. **Engineering Journal**, v. 21, n. 3, p. 63-75, 2017. DOI: https://doi.org/10.4186/ej.2017.21.3.63.

PURO.EARTH. **Puro Standard: Biochar Methodology**. Edition 2022, Version 3. Helsinki: Puro.earth, 2024. Disponível em: https://puro.earth/carbon-removal-methods. Acesso em: 5 abr. 2025.

RAJPUT, V. *et al.* Biochar production methods and their transformative potential for environmental remediation. **Discover Applied Sciences**, v. 6, 408, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s42452-024-06125-4.

RAMBHATLA, N. *et al.* Biomass pyrolysis for biochar production: study of kinetics parameters and effect of temperature on biochar yield and its physicochemical properties. **Results in Engineering**, v. 25, 103679, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103679.

RIBEIRO, G. B. de D. *et al.* Economic viability of four charcoal productive systems from Minas Gerais state. **Revista Árvore**, v. 44, e440101, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/1806-908820200000001.

SARFARAZ, Q. *et al.* Characterization and carbon mineralization of biochars produced from different animal manures and plant residues. **Scientific Reports**, v. 10, 955, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-020-57987-8.

SCHETTINI, B. L. S. *et al.* Furnace-kiln system: how does the use of new technologies in charcoal production affect the carbon balance? **Industrial Crops and Products**, v. 187, 115330, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115330.

SHAH, M. A.; KHAN, M. N. S.; KUMAR, V. Biomass residue characterization for their potential application as biofuels. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 134, n. 3, p. 2137-2145, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/s10973-018-7560-9.

SHAMILA, S. K. *et al.* Assessing the impact of king coconut husk ash and biochar, combined with chemical fertilizer application, on enhancing soil fertility in coconut plantations. **Crops**, v. 4, n. 2, p. 227-241, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/crops4020017.

SINGH, B.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; LEHMANN, J. (ed.). **Biochar: a guide to analytical methods**. Clayton South: CSIRO Publishing; Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2017. 310 p.

SUMAN, S.; GAUTAM, S. Pyrolysis of coconut husk biomass: analysis of its biochar properties. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 39, n. 8, p. 761-767, 2017. DOI: https://doi.org/10.1080/15567036.2016.1263252.

TOMCZYK, A.; SOKOŁOWSKA, Z.; BOGUTA, P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 19, p. 191-215, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3.

TU, P. *et al.* Influence of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of biochars obtained from herbaceous and woody plants. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 9, n. 1, 131, 2022. DOI: https://doi.org/10.1186/s40643-022-00618-z.

VILAS-BOAS, A. C. M. *et al.* Valorisation of residual biomass by pyrolysis: influence of process conditions on products. **Sustainable Energy & Fuels**, v. 8, p. 379-396, 2024. DOI: https://doi.org/10.1039/D3SE01216F.

VISSER, E. D.; SEROKA, N. S.; KHOTSENG, L. Recent advances in biochar: synthesis techniques, properties, applications, and hydrogen production. **Processes**, v. 12, n. 6, 1111, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/pr12061111.

WANG, K. *et al.* Effects of pyrolysis temperature and holding time on physicochemical properties of swine-manure-derived biochar. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 2, p. 613-624, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s12649-018-0435-2.

WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of biochar. **Fuel**, v. 217, p. 240-261, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054.

YUSTANTI, E. *et al.* Types and composition of biomass in biocoke synthesis with the coal blending method. **Energies**, v. 14, n. 20, 6570, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/en14206570.

ZAMAN, M.; SHAHID, S. A.; HENG, L. **Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques**. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2020. ISBN 978-3-319-96189-7.

ZHAO, B. *et al.* Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 977-987, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.013.

ZHAO, S.-X.; TA, N.; WANG, X.-D. Effect of temperature on the structural and physicochemical properties of biochar with apple tree branches as feedstock material. **Energies**, v. 10, n. 9, 1293, 2017. DOI: https://doi.org/10.3390/en10091293.

CAPÍTULO 3 - VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DO FRUTO DE *Cocos nucifera* L. PARA PRODUÇÃO DE BIOCHAR: INFLUÊNCIA DO TEMPO E DA TEMPERATURA DE PIRÓLISE

RESUMO

A crescente geração de resíduos agroindustriais tem impulsionado a busca por alternativas sustentáveis para sua valorização, com destaque para processos termoquímicos capazes de gerar produtos de interesse agrícola e ambiental. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar a influência da temperatura de pirólise e do tempo de residência na produção de biochar a partir da casca de *Cocos nucifera* L., visando identificar condições operacionais favoráveis à obtenção de um material com potencial para uso como condicionador de solo e em estratégias de remoção e armazenamento de carbono, além de gerar informações técnicas para futuras aplicações em reatores contínuos de pirólise. As pirólises foram realizadas em forno elétrico tipo mufla, em delineamento fatorial 3 × 3, combinando temperaturas finais de 400, 500 e 600 °C e tempos de residência de 30, 60 e 90 minutos. Foram avaliados o rendimento gravimétrico, a análise imediata, a composição elementar, as razões atômicas H/C e O/C, o pH, a condutividade elétrica, a capacidade de troca catiônica, os teores de macro e micronutrientes e as características químicas por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier. A temperatura de pirólise exerceu maior influência sobre as propriedades do biochar, promovendo redução do rendimento gravimétrico, dos materiais voláteis e das razões H/C e O/C, além do aumento do teor de carbono fixo, do pH e da condutividade elétrica. Para as propriedades que apresentaram interação entre temperatura e tempo de residência, a influência do tempo foi mais evidente a 400 °C. A temperatura de 600 °C apresentou o maior rendimento médio em carbono fixo (27,93%). Entre as condições avaliadas, 600 °C por 30 minutos apresentou o melhor equilíbrio entre as características do biochar e o menor tempo de processamento, com 80,52% de carbono fixo, pH de 10,13, razões H/C e O/C de aproximadamente 0,26 e 0,15, respectivamente, capacidade de troca catiônica de 432 mmolc kg^{-1} e teor de potássio de aproximadamente 31,1 g kg^{-1}. As razões atômicas obtidas nessa condição foram numericamente compatíveis com faixas utilizadas internacionalmente como indicadores de estabilidade do carbono em biochars. Os resultados demonstram o potencial da casca de coco verde como matéria-prima para a produção de biochar com aplicações agronômicas e ambientais e fornecem subsídios para o desenvolvimento futuro de sistemas contínuos de pirólise.

Palavras-chave: Condicionador de solo; estabilidade do carbono; economia circular; propriedades físico-químicas; remoção de carbono.

1 INTRODUÇÃO

A conversão de resíduos agroindustriais em insumos de alto valor agregado por meio de processos termoquímicos tem se consolidado como uma estratégia relevante diante dos desafios ambientais e energéticos da atualidade. A produção de biochar a partir de resíduos lignocelulósicos tem se mostrado uma alternativa promissora. O biochar é um material rico em carbono, obtido a partir da pirólise de biomassa em atmosfera inerte ou com baixo teor de oxigênio, com aplicações agrícolas e ambientais, incluindo o condicionamento do solo, a melhoria da fertilidade e a adsorção de contaminantes (Lehmann; Joseph, 2015). Além disso, o carbono presente no biochar pode apresentar elevada estabilidade, conferindo ao material potencial para estratégias de remoção e armazenamento de carbono em longo prazo (Chiaramonti *et al*., 2024). No entanto, as propriedades físico-químicas do biochar, tais como porosidade, área superficial, teor de carbono fixo e composição elementar, dependem diretamente das condições de processo adotadas durante sua produção (Kumar; Saini; Bhaskar, 2020; Weber; Quicker, 2018).

Dentre os parâmetros mais importantes no processo de pirólise, destacam-se a temperatura final e o tempo de residência, que influenciam diretamente tanto o rendimento quanto as propriedades do biochar. Em relação ao efeito da temperatura de pirólise, o aumento dessa variável tende a reduzir o rendimento e o teor de materiais voláteis, enquanto eleva o teor de carbono fixo e de cinzas. Além disso, promove a redução das razões atômicas H/C e O/C, associada ao aumento do grau de carbonização e da estabilidade do material (Weber; Quicker, 2018; Vilas-Boas *et al*., 2024).

O tempo de residência também pode influenciar as características do biochar, uma vez que períodos mais prolongados podem favorecer a continuidade das reações de degradação térmica e de desvolatilização (Rajput *et al*., 2024). Entretanto, a magnitude desse efeito depende da temperatura de pirólise, da matéria-prima e das demais condições operacionais, sendo frequentemente menos pronunciada que o efeito da temperatura (Cárdenas-Aguiar *et al*., 2024).

O tipo de reator empregado também influencia as condições operacionais do processo, incluindo o controle da temperatura, da taxa de aquecimento e do tempo de residência. Sistemas contínuos de pirólise têm sido desenvolvidos visando ampliar a capacidade de processamento e a continuidade operacional em escalas superiores. Soni e Karmee (2020), por exemplo, demonstraram a ampliação da pirólise de serragem de um sistema em batelada para um reator contínuo em escala piloto.

No Brasil, sistemas contínuos de pirólise já vêm sendo empregados em escala industrial. A NetZero opera unidades destinadas à produção de biochar a partir de resíduos agrícolas, com destaque para a utilização de resíduos da cadeia do café. Outro exemplo é o Reator Horizontal Contínuo de Pirólise LZ500™, desenvolvido pela MDL Ambiental e operado pela Aperam BioEnergia em Capelinha, Minas Gerais, para a conversão de biomassa residual em material carbonizado. Apesar do avanço dessas tecnologias, ainda são necessárias informações específicas sobre o comportamento da casca de coco verde em condições controladas de pirólise que possam subsidiar sua futura aplicação em sistemas contínuos.

Diante dessa lacuna, o presente estudo utilizou um forno elétrico tipo mufla como ferramenta experimental para avaliar a produção de biochar a partir da casca de coco verde sob diferentes temperaturas e tempos de residência. Buscou-se, assim, gerar informações técnicas sobre as condições de pirólise e as propriedades do biochar produzido, de modo a subsidiar futuras aplicações dessa biomassa em reatores contínuos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência da temperatura e do tempo de residência na produção de biochar a partir da casca do coco verde, utilizando forno elétrico tipo mufla, visando identificar condições de pirólise que favoreçam o rendimento e as propriedades físico-químicas do biochar e gerar informações que possam subsidiar futuras aplicações dessa biomassa em reatores contínuos.

2.2 Objetivos específicos

a) Avaliar o efeito da temperatura e do tempo de residência sobre o rendimento e as características físico-químicas dos biochars produzidos;
b) Identificar as condições de pirólise que proporcionem biochars com características favoráveis ao potencial uso como condicionadores de solo e ao armazenamento de carbono em longo prazo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Matéria prima

A biomassa residual foi obtida junto aos vendedores do fruto de *Cocos nucifera* L., na cidade de Viçosa-MG. Após a coleta, os cocos foram transportados para o Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde foram realizadas as etapas experimentais. Os resíduos, com teor de umidade inicial de 847,92% em base seca, foram seccionados ao meio e secos em estufa a 103 ± 2 °C até atingirem massa constante.

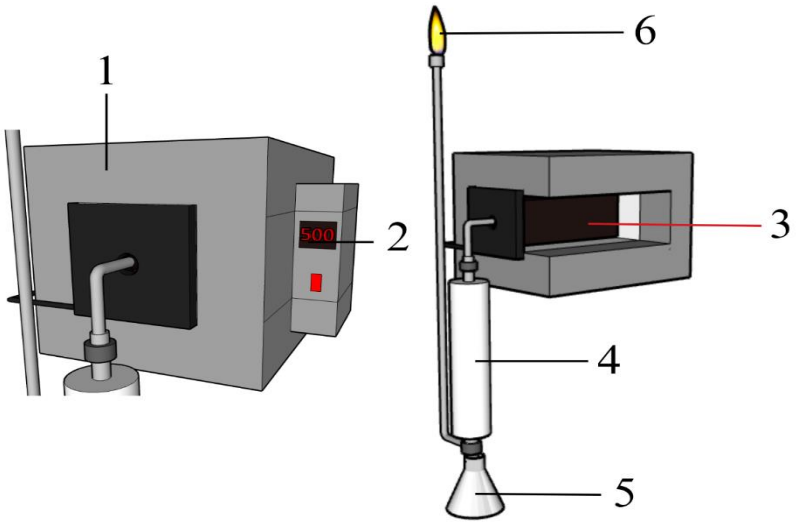
Os resíduos de coco verde foram submetidos à redução granulométrica em um triturador da marca Lippel, modelo TMF 266. Após a trituração, o material foi classificado em peneira com abertura de 0,8 mm, sendo utilizada a fração retida. O material selecionado foi acondicionado em sacos plásticos vedados e posteriormente utilizado no processo de pirólise.

A biomassa de coco verde utilizada no experimento apresentou teor de materiais voláteis de 74,19%, carbono fixo de 20,71% e cinzas de 5,10%. Do ponto de vista estrutural, o material apresentou 36,88% de holoceluloses, 31,77% de lignina total e 26,25% de extrativos totais.

3.2 Pirólise em forno elétrico

Para a realização das pirólises, utilizou-se um forno elétrico tipo mufla, modelo GP Científica-2000. Em cada ensaio, foram empregados aproximadamente 1,25 kg de biomassa residual de coco verde. O material foi acondicionado em um contêiner metálico com volume aproximado de 0,011 m^3, posteriormente inserido no interior da mufla e conectado ao sistema de condensação e condução dos gases apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama esquemático do sistema utilizado para a pirólise em forno elétrico tipo mufla



Legenda:
1 – Mufla;
2 – Termostato;
3 – Contêiner metálico;
4 – Condensador de gases por fluxo de água;
5 – Coletor de gases condensáveis;
6 – Queima dos gases não condensáveis.

Fonte: O autor.

Antes de cada ensaio, a mufla foi aquecida até a temperatura final de pirólise correspondente ao tratamento (400, 500 ou 600 °C). Após a estabilização na temperatura estabelecida, o contêiner metálico contendo a biomassa foi inserido no interior da mufla. Em decorrência da abertura do equipamento e da introdução do contêiner, ocorreu redução temporária da temperatura interna. Assim, aguardou-se o restabelecimento da temperatura correspondente ao tratamento e, a partir desse momento, iniciou-se a contagem do tempo de residência de 30, 60 ou 90 minutos. Foram conduzidos nove tratamentos, em esquema fatorial 3 × 3, com três repetições por tratamento, totalizando 27 unidades experimentais.

Após as pirólises, o contêiner metálico foi retirado da mufla e mantido em ambiente aberto para resfriamento, sendo utilizada uma manta de algodão umedecida para auxiliar nesse processo. Após o resfriamento, o biochar foi retirado do contêiner metálico e pesado para determinação do rendimento gravimétrico, sendo posteriormente destinado às análises físico-químicas.

A massa de biochar obtida após cada pirólise foi determinada, e o rendimento gravimétrico foi calculado conforme a Equação 1:

$$RG(\%) = \frac{Mb}{Msr}.100 \quad (1)$$

Em que: RG = rendimento gravimétrico em biochar (%); Mb = massa seca de biochar (kg); e Msr = massa seca da biomassa residual utilizada na pirólise (kg).

3.3 Propriedades do biochar

Os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas foram determinados de acordo com a norma ASTM D1762–84 (ASTM, 2021). As amostras de biochar foram previamente peneiradas para obtenção de granulometria entre 40 e 60 mesh (partículas entre aproximadamente 0,25 e 0,42 mm), a fim de padronizar as análises.

A composição química elementar dos biochars foi determinada utilizando o analisador elementar TruSpec Micro (LECO). As amostras foram previamente peneiradas para obtenção de granulometria entre 40 e 60 mesh, correspondente a partículas entre aproximadamente 0,25 e 0,42 mm. Os teores de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) foram determinados conforme a DIN EN ISO 16948:2015, utilizando o módulo TruSpec Micro, enquanto o teor de enxofre (S) foi determinado conforme a DIN EN ISO 16994:2016, utilizando o módulo TruSpec S. Os teores de C, H, N e S, fornecidos em base seca livre de cinzas, foram convertidos para base seca mediante correção pelo teor de cinzas de cada amostra, conforme a DIN EN ISO 16993:2016. O teor de oxigênio (O) foi estimado por diferença, considerando os teores corrigidos de C, H, N e S e o teor de cinzas, conforme a expressão O (%) = 100 – (C + H + N + S + cinzas).

O cálculo da razão atômica O/C foi realizado conforme descrito na European Biochar Certificate (EBC, 2022), a partir dos teores elementares (% em massa) convertidos em razão molar por meio da divisão pelas respectivas massas atômicas de cada elemento.

Foram calculadas as relações molares entre hidrogênio e carbono (H/C) descrita na metodologia da Puro Standard: Biochar Methodology – Version 4.1 (Puro.earth, 2023).

$$\frac{H}{C_{org}}\ (molar)\frac{mh\ (\%)}{mc\ (\%)}\ x\frac{MC(gmaol^{-1})}{MH(gmol^{-1})} = \frac{mh(\%)}{mc(\%)}\ x\ \frac{12}{1} \quad (2)$$

A análise de nutrientes foi realizada por espectroscopia de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), com base no procedimento descrito por Enders *et al*. (2017). As amostras de biochar, previamente peneiradas para obtenção de granulometria entre 40 e 60 mesh (partículas entre aproximadamente 0,25 e 0,42 mm), foram secas a 105 °C por 24 horas e armazenadas em dessecador. Em seguida, cerca de 200 mg de amostra foram digeridos com 5 mL de HNO_3 a 70% e 2 mL de H_2O_2 a 30% em bloco digestor a 120 °C, até cessarem os vapores nitrosos. Após o resfriamento, as amostras foram diluídas para o volume final de 50 mL com água deionizada e analisadas por ICP-OES para quantificação de macro e micronutrientes, utilizando padrões certificados para calibração.

A capacidade de troca catiônica (CTC) dos biochars foi determinada conforme o método descrito por Graber *et al*. (2017). As amostras foram secas em estufa a 65 °C até atingirem massa constante, homogeneizadas e peneiradas para obtenção de granulometria entre 0,5 e 2,0 mm. Aproximadamente 1,000 g de amostra foi transferido para tubos tipo Falcon, aos quais foram adicionados 40 mL de solução de acetato de amônio 1,0 mol L^{-1} ajustada a pH 7,0, seguida de agitação em mesa horizontal por 15 horas. A suspensão foi filtrada sob vácuo utilizando membrana de fibra de vidro de 0,45 µm, e a amostra foi lavada com etanol a 60% para remoção do excesso de acetato de amônio. Em seguida, a amostra foi transferida para um tubo contendo 50 mL de KCl 2,0 mol L^{-1}, submetida novamente à agitação por 15 horas e filtrada. O filtrado foi coletado em balão volumétrico de 100 mL, e o volume foi completado com água deionizada. O amônio (NH_4^+) foi quantificado por destilação Kjeldahl, e a CTC foi expressa em mmolc kg^{-1} de biochar.

A determinação do pH e da condutividade elétrica (CE) dos biochars foi realizada utilizando amostras com granulometria inferior a 2 mm. A suspensão foi preparada com 5 g de amostra e 50 mL de água deionizada, na proporção 1:10 (m/v). A mistura foi mantida sob agitação a 40 rpm durante 1 hora, à temperatura de 25 °C, conforme metodologia adaptada de Singh *et al*. (2017). Em seguida, a suspensão permaneceu em repouso por 30 minutos antes da leitura do pH, realizada com auxílio de pHmetro digital. A condutividade elétrica foi determinada na mesma suspensão, utilizando condutivímetro da marca Tecnal, modelo TEC-4MP.

O biochar foi previamente peneirado, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na peneira de 60 mesh, correspondente a partículas com tamanho entre aproximadamente 0,25 e 0,42 mm. Em seguida, o material foi analisado por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). As análises foram realizadas em espectrofotômetro ALPHA II (Bruker, EUA), equipado com acessório de reflectância total atenuada (ATR), na faixa espectral de 400 a 4000 cm^{-1}, com 54 varreduras e resolução de 4 cm^{-1}. O equipamento encontra-se no Laboratório de Nanomateriais e Química Ambiental (LaNaQua), do Departamento de Química da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

3.4 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 × 3, constituído por três temperaturas de pirólise (400, 500 e 600 °C) e três tempos de

residência (30, 60 e 90 minutos), com três repetições por tratamento, totalizando 27 unidades experimentais.

Para as variáveis submetidas à análise estatística, foram avaliadas a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Bartlett. Em seguida, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) fatorial, considerando os efeitos da temperatura, do tempo de residência e da interação entre esses fatores. Quando constatado efeito significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. Nos casos em que a interação entre temperatura e tempo de residência foi significativa, realizou-se o desdobramento da interação. As análises estatísticas foram realizadas no software R, utilizando o ambiente RStudio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve efeito significativo da interação entre a temperatura e o tempo de residência sobre o rendimento gravimétrico dos biochars, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Rendimento gravimétrico (%) dos biochars produzidos em diferentes temperaturas e tempos de residência

Tempo (minutos)	**Temperatura de pirólise (°C)**		
	400	**500**	**600**
30	44,91 aA	37,49 bA	34,72 cA
60	40,20 aB	35,83 bA	34,44 bA
90	39,66 aB	36,00 bA	34,69 bA

Fonte: O autor.
Nota: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras minúsculas comparam as temperaturas dentro de cada tempo de residência; letras maiúsculas comparam os tempos de residência dentro de cada temperatura.

O rendimento gravimétrico reduziu com o aumento da temperatura de pirólise em todos os tempos de residência (Tabela 1). Aos 30 minutos, essa redução ocorreu de forma significativa entre todas as temperaturas, passando de 44,91% a 400 °C para 37,49% a 500 °C e 34,72% a 600 °C. Aos 60 e 90 minutos, os rendimentos obtidos a 500 e 600 °C não diferiram significativamente entre si. A redução do rendimento com o aumento da temperatura está associada à intensificação das reações de decomposição térmica e desvolatilização dos constituintes da biomassa, resultando em maior liberação de produtos gasosos e condensáveis e, consequentemente, menor permanência de massa na fração sólida. Esse comportamento é característico da pirólise de biomassas lignocelulósicas e foi também observado por Selvarajoo

e Oochit (2020), que verificaram redução do rendimento em biochar com a elevação da temperatura de pirólise. Weber e Quicker (2018) destacam ainda que a temperatura é um dos principais parâmetros responsáveis pelas alterações observadas durante a carbonização da biomassa.

O efeito do tempo de residência sobre o rendimento gravimétrico foi observado apenas a 400 °C. Nessa temperatura, o rendimento diminuiu de 44,91% aos 30 minutos para 40,20% aos 60 minutos e 39,66% aos 90 minutos, não havendo diferença entre os dois maiores tempos. Em contraste, a 500 e 600 °C, o aumento do tempo de residência de 30 para 90 minutos não promoveu alteração significativa no rendimento. Esse comportamento indica que, nas condições mais severas de temperatura, grande parte das transformações responsáveis pela perda de massa ocorreu antes ou durante os primeiros 30 minutos de residência, reduzindo o efeito do prolongamento do processo. Li *et al*. (2019) relataram que o efeito do tempo de residência sobre o rendimento pode se tornar menos pronunciado em temperaturas mais elevadas, enquanto Cárdenas-Aguiar *et al*. (2024) também observaram maior influência da temperatura em comparação ao tempo de residência sobre as propriedades do biochar.

Do ponto de vista operacional, esse resultado é relevante, pois, nas temperaturas de 500 e 600 °C, o prolongamento do tempo de residência de 30 para 90 minutos não aumentou o rendimento gravimétrico. Assim, o emprego de tempos mais curtos pode reduzir o tempo de processamento e a demanda energética do processo, além de possibilitar maior produtividade operacional.

Os resultados obtidos para os teores de materiais voláteis (Tabela 2) e carbono fixo (Tabela 3) evidenciaram efeito significativo da interação entre o tempo de residência e a temperatura de pirólise.

Tabela 2 – Teor de materiais voláteis (%) dos biochars produzidos em função do tempo de residência e da temperatura de pirólise

Tempo (minutos)	**Temperatura de pirólise (°C)**		
	400	**500**	**600**
30	32,78 aA	17,02 bA	9,35 cA
60	24,87 aB	14,10 bA	9,16 cA
90	24,35 aB	15,00 bA	8,24 cA

Fonte: O autor.
Nota: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras minúsculas comparam as temperaturas dentro de cada tempo de residência; letras maiúsculas comparam os tempos de residência dentro de cada temperatura.

Tabela 3 – Teor de carbono fixo (%) dos biochars produzidos em função do tempo de residência e da temperatura de pirólise

Tempo (minutos)	Temperatura de pirólise (°C)		
	400	500	600
30	59,99 cB	73,23 bA	80,52 aA
60	66,33 cA	75,87 bA	80,21 aA
90	67,19 cA	75,39 bA	81,27 aA

Fonte: O autor.
Nota: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras minúsculas comparam as temperaturas dentro de cada tempo de residência; letras maiúsculas comparam os tempos de residência dentro de cada temperatura.

Para os materiais voláteis, o aumento da temperatura promoveu redução significativa dos teores em todos os tempos de residência avaliados. No tempo de 30 minutos, os valores diminuíram de 32,78%, a 400 °C, para 17,02%, a 500 °C, e 9,35%, a 600 °C. Comportamento semelhante foi observado nos tempos de 60 e 90 minutos, sendo verificadas diferenças significativas entre as três temperaturas em todos os tempos avaliados. Em relação ao tempo de residência, entretanto, seu efeito foi observado apenas a 400 °C, condição na qual o teor de materiais voláteis diminuiu de 32,78%, aos 30 minutos, para 24,87% e 24,35%, aos 60 e 90 minutos, respectivamente, sem diferença significativa entre estes dois últimos tempos. A 500 e 600 °C, o aumento do tempo de residência de 30 para 90 minutos não promoveu alterações significativas nos teores de materiais voláteis.

A redução do teor de materiais voláteis com o aumento da temperatura está associada à intensificação das reações de degradação térmica e de desvolatilização da biomassa. Oginni e Singh (2020) observaram redução do conteúdo de materiais voláteis e dos teores de hidrogênio e oxigênio em biochars produzidos em temperaturas crescentes de carbonização. Para a casca de coco, Suman e Gautam (2017) verificaram que a degradação térmica das hemiceluloses e da celulose ocorre predominantemente entre 200 e 400 °C, enquanto a lignina apresenta degradação em uma faixa mais ampla de temperatura. Dessa forma, a influência do prolongamento do tempo de residência observada a 400 °C pode estar relacionada à continuidade das reações de degradação dos constituintes lignocelulósicos nessa condição térmica. Em contrapartida, a ausência de diferenças entre os tempos a 500 e 600 °C demonstra que, nas condições avaliadas, o aumento do tempo de residência além de 30 minutos não proporcionou redução adicional significativa do teor de materiais voláteis.

O carbono fixo apresentou comportamento inverso ao observado para os materiais voláteis. Em todos os tempos de residência, seu teor aumentou significativamente com a elevação da temperatura de pirólise. Aos 30 minutos, os valores aumentaram de 59,99%, a 400

°C, para 73,23%, a 500 °C, e 80,52%, a 600 °C. Da mesma forma, aos 60 e 90 minutos, os maiores teores de carbono fixo foram obtidos a 600 °C, seguidos por 500 e 400 °C. Quanto ao efeito do tempo de residência, novamente foram observadas diferenças significativas apenas a 400 °C, na qual o teor de carbono fixo aumentou de 59,99%, aos 30 minutos, para 66,33% e 67,19%, aos 60 e 90 minutos, respectivamente, sem diferença significativa entre estes dois últimos tempos. A 500 e 600 °C, os teores de carbono fixo não diferiram entre os tempos avaliados.

O aumento proporcional do teor de carbono fixo com a elevação da temperatura está associado à perda progressiva da fração volátil durante a pirólise e à consequente concentração da fração carbonácea não volátil no material sólido. Weber e Quicker (2018) destacam que o carbono fixo corresponde à fração que permanece na estrutura sólida após a remoção dos componentes voláteis e que a temperatura de tratamento constitui um dos principais fatores responsáveis pelas alterações nas propriedades do biochar. Assim, o comportamento observado para o carbono fixo é coerente com a redução simultânea dos materiais voláteis, evidenciando o maior grau de carbonização dos biochars produzidos em temperaturas mais elevadas.

O rendimento em carbono fixo não foi influenciado pelo tempo de residência, sendo observado apenas efeito significativo da temperatura de pirólise (Tabela 4).

Tabela 4 – Rendimento em carbono fixo (%) dos biochars em função da temperatura de pirólise

Temperatura de pirólise (°C)		
400	**500**	**600**
26,75 b	27,26 ab	27,93 a

Fonte: O autor.
Nota: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O maior valor foi obtido a 600 °C (27,93%), diferindo significativamente de 400 °C (26,75%). A temperatura de 500 °C apresentou valor intermediário (27,26%), não diferindo estatisticamente das demais. O maior rendimento em carbono fixo observado a 600 °C resulta da relação entre o rendimento gravimétrico e o teor de carbono fixo do biochar. Considerando as médias das temperaturas, entre 400 e 600 °C ocorreu aumento de 25,06% no teor de carbono fixo, enquanto o rendimento gravimétrico diminuiu 16,77%. Assim, o incremento proporcional do teor de carbono fixo foi suficiente para compensar a redução da massa de biochar produzida, resultando em maior recuperação de carbono fixo por unidade de biomassa seca processada a 600 °C.

A análise de variância indicou ausência de efeito significativo da interação entre o tempo de residência e a temperatura de pirólise sobre o teor de cinzas dos biochars (Tabela 5), sendo observados efeitos significativos isolados de ambos os fatores. Dessa forma, o efeito da temperatura e do tempo de residência foi interpretado com base em suas respectivas médias marginais.

Tabela 5 – Teor de cinzas (%) dos biochars em função do tempo de residência e da temperatura de pirólise

Tempo (minutos)	**Temperatura de pirólise (°C)**			**Média**
	400	**500**	**600**	
30	-	-	-	9,04 B
60	-	-	-	9,83 A
90	-	-	-	9,52 A
Média	8,17 b	9,80 a	10,42 a	

Fonte: O autor.
Em que: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras minúsculas comparam as médias marginais das temperaturas de pirólise; letras maiúsculas comparam as médias marginais dos tempos de residência.

Em relação à temperatura, o teor médio de cinzas aumentou de 8,17%, a 400 °C, para 9,80%, a 500 °C, não sendo observada diferença significativa entre 500 e 600 °C, cuja média foi de 10,42%. O aumento do teor de cinzas com a temperatura está relacionado à perda progressiva da fração orgânica da biomassa durante a pirólise, promovendo a concentração relativa dos constituintes minerais na fração sólida remanescente. Comportamento semelhante foi observado por Suman e Gautam (2017) em biochars produzidos a partir de casca de coco, nos quais o aumento da temperatura de pirólise resultou em maior teor de cinzas.

O tempo de residência também influenciou o teor de cinzas. O menor valor médio foi observado aos 30 minutos (9,04%), enquanto os tempos de 60 e 90 minutos apresentaram, respectivamente, 9,83% e 9,52%, sem diferença significativa entre si. Esse resultado indica que, nas condições avaliadas, o prolongamento do tempo de residência de 30 para 60 minutos foi suficiente para promover maior concentração relativa da fração mineral, não sendo observado aumento adicional significativo com a extensão do processo para 90 minutos.

Na tabela 6, são encontrados os valores médios da composição química elementar dos biochars produzidos.

Tabela 6 – Composição elementar (%) e teor de cinzas (%) dos biochars em função da temperatura e do tempo de residência

Variáveis		**Elementos (%)**					
Temperatura (°C)	**Tempo (min)**	**C**	**H**	**N**	**S**	**O**	**Cinzas**
400	**30**	64,20	2,34	0,91	0,01	25,32	7,22
	60	64,38	2,68	0,72	0,05	23,36	8,81
	90	65,63	2,76	0,69	0,01	22,45	8,46
500	**30**	68,05	2,31	0,79	0,05	19,06	9,74
	60	70,62	2,25	0,69	0,08	16,32	10,04
	90	71,41	2,23	0,66	0,07	16,01	9,62
600	**30**	73,42	1,59	0,57	0,05	14,23	10,14
	60	72,92	1,48	0,55	0,05	14,36	10,64
	90	71,61	1,38	0,62	0,08	15,82	10,49

Fonte: O autor.

A composição elementar dos biochars apresentou alterações consistentes com o aumento da temperatura de pirólise (Tabela 6). O teor de carbono aumentou de forma geral com a elevação da temperatura, variando entre 64,20 e 65,63% nos biochars produzidos a 400 °C, entre 68,05 e 71,41% a 500 °C e entre 71,61 e 73,42% a 600 °C. O maior teor de carbono foi observado na condição de 600 °C e 30 minutos de residência (73,42%).

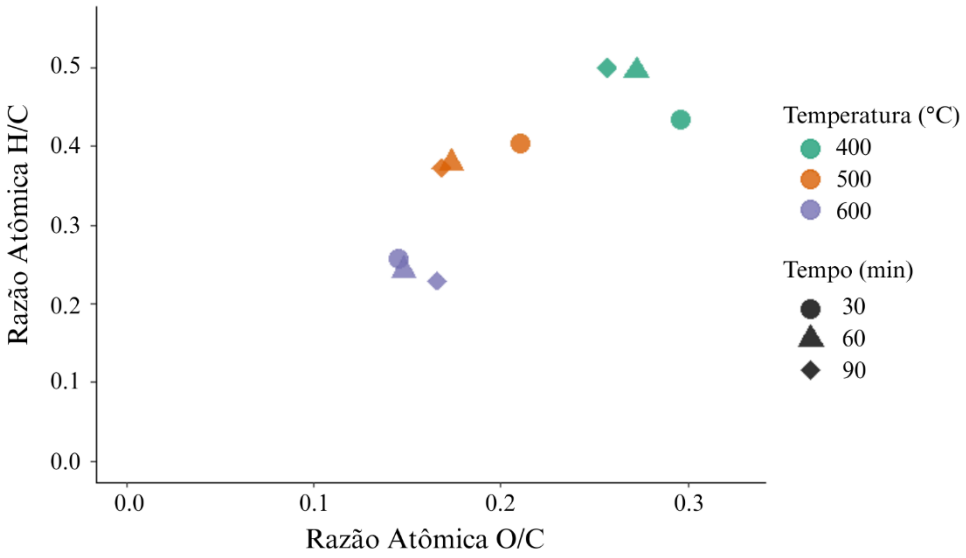
Em sentido oposto, os teores de hidrogênio e oxigênio apresentaram redução com o aumento da temperatura. Os teores de hidrogênio variaram de 2,34 a 2,76% a 400 °C e diminuíram para 1,38 a 1,59% a 600 °C. Da mesma forma, os teores de oxigênio, estimados por diferença, passaram de valores entre 22,45 e 25,32% a 400 °C para valores entre 14,23 e 15,82% a 600 °C. Em relação ao tempo de residência, entretanto, não foi observada tendência consistente para os teores de C, H e O entre as diferentes temperaturas avaliadas.

A redução dos teores de H e O com o aumento da temperatura está associada à intensificação das reações de desvolatilização e à remoção de grupos funcionais contendo esses elementos, enquanto a fração sólida se torna relativamente enriquecida em carbono. Zhao *et al*. (2018) observaram relação negativa entre a temperatura de pirólise e as frações mássicas de H e O, além da redução da quantidade de grupos funcionais em biochars produzidos entre 200 e 700 °C. De forma semelhante, Domingues *et al*. (2017) verificaram, para biochars de origem vegetal, redução das razões H/C e O/C com o aumento da temperatura, associando esse comportamento à remoção de grupos contendo H e O e ao aumento do caráter aromático da matriz carbonosa.

Os teores de nitrogênio também apresentaram, de maneira geral, redução com o aumento da temperatura, enquanto o enxofre permaneceu em baixas concentrações e não apresentou tendência definida em função das condições de pirólise.

Na Figura 2 esta apresentado o diagrama de Van Krevelen com as razões atômica H/C e O/C dos biochars de resíduo de coco verde produzido em diferentes tempos de residência e temperatura de pirólise.

Figura 2 – Diagrama de Van Krevelen dos biochars de casca de coco verde em função da temperatura de pirólise e do tempo de residência



Fonte: O autor.

O diagrama de Van Krevelen (Figura 2) evidenciou redução das razões atômicas H/C e O/C com o aumento da temperatura de pirólise. Os biochars produzidos a 400 °C apresentaram razões H/C entre 0,43 e 0,50 e O/C entre 0,26 e 0,30, enquanto a 600 °C esses valores diminuíram para 0,23–0,26 e 0,15–0,17, respectivamente. Em relação ao tempo de residência, não foi observada tendência uniforme de redução das razões H/C e O/C nas diferentes temperaturas avaliadas.

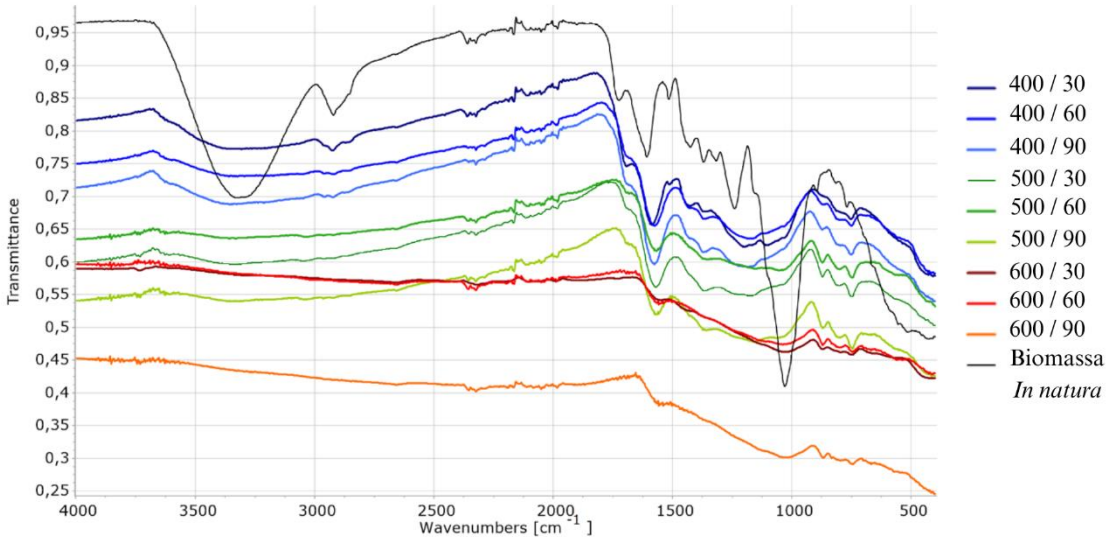
A redução das razões H/C e O/C com o aumento da temperatura está associada à progressiva remoção de grupos contendo hidrogênio e oxigênio e ao aumento do caráter aromático da matriz carbonosa durante a pirólise. Domingues *et al*. (2017) observaram comportamento semelhante em biochars derivados de biomassas vegetais, nos quais o aumento da temperatura promoveu redução das razões H/C e O/C, associada a reações de desidratação, remoção de grupos funcionais contendo H e O e formação de estruturas aromáticas.

Todas as razões H/C calculadas neste estudo foram inferiores a 0,7, enquanto as razões O/C permaneceram abaixo de 0,4. Numericamente, esses valores encontram-se em faixas compatíveis com critérios utilizados como indicadores de estabilidade de biochars, uma vez que a IBI (2015) e a metodologia Puro.earth (2023) adotam H/Corg inferior a 0,7, enquanto o EBC (2022) utiliza H/Corg inferior a 0,7 e recomenda O/Corg inferior a 0,4.

Budai *et al*. (2013) propuseram a razão H/Corg como indicador da persistência do carbono do biochar, considerando materiais com H/Corg ≤ 0,4 como altamente estáveis, com estimativa conservadora de pelo menos 70% do carbono orgânico remanescente após 100 anos, enquanto valores entre 0,4 e 0,7 correspondem a uma estimativa conservadora de pelo menos 50%. Embora as razões H/C obtidas neste estudo sejam numericamente compatíveis com essas faixas, essa comparação deve ser considerada indicativa, uma vez que foram calculadas a partir do carbono total e o teor de carbono inorgânico não foi determinado.

A comparação dos espectros de FTIR da biomassa de casca de coco verde e dos biochars evidenciou alterações na presença e na intensidade relativa das principais bandas de absorção em função das condições de pirólise (Figura 3 e Tabela 7).

Figura 3 – Espectros de FTIR da biomassa de casca de coco verde e dos biochars produzidos em diferentes temperaturas de pirólise e tempos de residência



Fonte: O autor.

Tabela 7 – Atribuição das principais bandas de absorção identificadas nos espectros de FTIR da biomassa e dos biochars

Banda (cm^{-1})	**Atribuição**	**Componente associado**	**Referências**
3400–3000	Estiramento O–H	Grupos hidroxila e água	Suman e Gautam (2017); Ćwieląg-Piasecka *et al*. (2023)
2921 e 2852	Estiramento assimétrico e simétrico de C–H alifático	Grupos $–CH_2–$, possível contribuição de $–CH_3$	Tu *et al*. (2022)
~1600	Estiramento C=C aromático, com possível contribuição de C=O conjugado	Estruturas aromáticas e grupos carbonílicos conjugados	Haeldermans *et al*. (2019); Tu *et al*. (2022)
~1030	Estiramento C–O	Álcoois, éteres e estruturas oxigenadas associadas à lignina e à celulose	Shah *et al*. (2018); McCall *et al*. (2025)

Fonte: Elaborada pelo autor com base nas referências apresentadas na tabela.

A análise dos espectros de FTIR evidenciou alterações na presença e na intensidade relativa das principais bandas entre a biomassa *in natura* e os biochars obtidos em diferentes condições de pirólise (Figura 3 e Tabela 7). A banda larga observada na região de 3400–3000 cm^{-1} é atribuída ao estiramento das ligações O–H, associadas a grupos hidroxila e à presença de água adsorvida. Essa banda foi mais evidente na biomassa *in natura* e nos biochars produzidos em condições de menor severidade térmica, apresentando redução de intensidade relativa com o aumento da temperatura de pirólise. Suman e Gautam (2017), ao avaliarem a pirólise de casca de coco, observaram redução progressiva da banda associada ao estiramento O–H com o aumento da temperatura, passando de forte na biomassa para moderada a 400 °C e fraca a partir de 600 °C. Esse comportamento é coerente com a redução do teor de oxigênio observada na análise elementar (Tabela 6) e das razões O/C no diagrama de Van Krevelen (Figura 2).

As bandas localizadas em 2921 e 2852 cm^{-1} são atribuídas às vibrações de estiramento assimétrico e simétrico, respectivamente, de grupos alifáticos C–H, principalmente associados às cadeias $–CH_2–$, com possível contribuição de grupos $–CH_3$ (Tu *et al*., 2022). Essas bandas apresentam maior intensidade na biomassa *in natura* e ainda são observadas nos tratamentos a 400 °C, porém sua intensidade é progressivamente reduzida com o aumento da temperatura de pirólise, sendo essa atenuação mais pronunciada nas condições de maior temperatura. Essa atenuação está relacionada à perda de cadeias laterais alifáticas e é consistente com os menores

teores de hidrogênio e razões H/C observados nessas condições (Figura 2), indicando a formação de um material com maior grau de carbonização e aromaticidade.

Na região próxima de 1600 cm^{-1} são observadas absorções associadas principalmente a vibrações de estruturas aromáticas C=C, podendo ocorrer também contribuição de grupos C=O conjugados. A permanência de absorção nessa região nos biochars produzidos em temperaturas mais elevadas é compatível com a presença de estruturas aromáticas na matriz carbonosa. Haeldermans *et al*. (2019) e Tu *et al*. (2022) relacionam a região entre aproximadamente 1650 e 1550 cm^{-1} a vibrações de C=C e C=O, incluindo contribuição de estruturas aromáticas.

A banda próxima de 1030 cm^{-1} está associada ao estiramento das ligações C–O presentes em estruturas oxigenadas da matriz lignocelulósica. Essa banda é evidente na biomassa *in natura* e nos biochars produzidos a 400 °C, tornando-se menos pronunciada com o aumento da temperatura de pirólise. Suman e Gautam (2017) observaram, em casca de coco, redução da banda de estiramento C–O entre 1000 e 1150 cm^{-1}, passando de forte na biomassa para moderada a 400 °C e fraca a 600 °C. McCall *et al*. (2025) também identificaram a região de 1247–1030 cm^{-1} como associada ao estiramento C–O da lignina e da celulose e verificaram redução dessa banda com o aumento da temperatura de pirólise.

De modo geral, as alterações observadas nos espectros de FTIR evidenciam a redução progressiva de grupos hidroxila, alifáticos e oxigenados com o aumento da temperatura de pirólise, acompanhada pela permanência de estruturas de caráter aromático na matriz carbonosa. Essas alterações são consistentes com os resultados da composição elementar e do diagrama de Van Krevelen, que demonstraram redução dos teores de H e O e das razões H/C e O/C nas temperaturas mais elevadas. Em relação ao tempo de residência, não foi observado nos espectros um padrão de alteração tão consistente quanto aquele associado à temperatura, indicando que, nas condições avaliadas, a temperatura apresentou influência mais evidente sobre as características químicas identificadas por FTIR.

Na Tabela 8 são apresentados os valores médios de pH dos biochars em função do tempo de residência e da temperatura de pirólise.

Tabela 8 – pH dos biochars em função do tempo de residência e da temperatura de pirólise

Tempo (minutos)	Temperatura de pirólise (°C)		
	400	500	600
30	7,47 bB	9,9 aA	10,13 aA
60	9,43 bA	10,03 aA	10,14 aA
90	9,59 bA	10,12 aA	10,15 aA

Fonte: O autor.
Nota: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras minúsculas comparam as temperaturas dentro de cada tempo de residência; letras maiúsculas comparam os tempos de residência dentro de cada temperatura.

A interação entre a temperatura de pirólise e o tempo de residência influenciou significativamente o pH dos biochars (Tabela 8). Em todos os tempos avaliados, os biochars produzidos a 400 °C apresentaram menores valores de pH em relação aos produzidos a 500 e 600 °C, enquanto estas duas temperaturas não diferiram entre si. Aos 30 minutos, o pH aumentou de 7,47, a 400 °C, para 9,90 e 10,13, a 500 e 600 °C, respectivamente. Comportamento semelhante foi observado aos 60 e 90 minutos.

O aumento do pH com a temperatura de pirólise está associado às transformações químicas da biomassa durante a carbonização, incluindo a concentração e a liberação de constituintes minerais alcalinos, a formação de carbonatos e a redução de grupos funcionais ácidos na superfície do biochar. Tomczyk *et al*. (2020) destacam que o aumento da temperatura favorece a separação de sais alcalinos da matriz orgânica e a redução de grupos carboxílicos, contribuindo para o caráter alcalino dos biochars. Mandal *et al*. (2018) também relacionaram o aumento do pH de biochars produzidos em temperaturas mais elevadas ao aumento da alcalinidade e do conteúdo de carbonatos. Comportamento semelhante foi observado por Suman e Gautam (2017) em biochars de casca de coco, cujo pH aumentou de 8,50, a 400 °C, para 9,64, a 600 °C, alcançando valores superiores a 10 nas temperaturas mais elevadas.

Em relação ao tempo de residência, foram observadas diferenças apenas a 400 °C. Nessa temperatura, o pH aumentou de 7,47, aos 30 minutos, para 9,43 e 9,59, aos 60 e 90 minutos, respectivamente, sem diferença significativa entre estes dois últimos tempos. A 500 e 600 °C, o aumento do tempo de residência de 30 para 90 minutos não promoveu alterações significativas no pH. Esse resultado indica que, na condição de menor temperatura, o prolongamento do tempo de residência esteve associado ao desenvolvimento mais acentuado do caráter alcalino do biochar, enquanto nas temperaturas de 500 e 600 °C esse efeito adicional do tempo não foi detectado.

Na Tabela 9 são apresentados os valores médios de condutividade elétrica dos biochars em função do tempo de residência e da temperatura de pirólise.

Tabela 9 – Condutividade elétrica (dS m^{-1}) dos biochars em função do tempo de residência e da temperatura de pirólise

Tempo (minutos)	Temperatura de pirólise (°C)			Média
	400	500	600	
30	-	-	-	3,35 B
60	-	-	-	3,51 B
90	-	-	-	3,72 A
Média	2,61 c	3,68 b	4,20 a	

Fonte: O autor.
Nota: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras minúsculas comparam as médias marginais das temperaturas de pirólise; letras maiúsculas comparam as médias marginais dos tempos de residência.

Não foi observada interação significativa entre a temperatura de pirólise e o tempo de residência para a condutividade elétrica dos biochars, sendo verificados efeitos significativos de ambos os fatores isoladamente (Tabela 9). Em relação ao tempo de residência, a CE foi maior aos 90 minutos (3,72 dS m^{-1}) em comparação aos tempos de 30 e 60 minutos, que não diferiram entre si. Quanto à temperatura de pirólise, verificou-se aumento progressivo da CE, com médias de 2,61, 3,68 e 4,20 dS m^{-1} a 400, 500 e 600 °C, respectivamente, sendo todas as temperaturas diferentes entre si.

O aumento da CE com a temperatura de pirólise pode estar relacionado à maior participação relativa da fração mineral no biochar, decorrente da perda progressiva de constituintes orgânicos durante a carbonização. Nesse processo, cinzas, sais e outras espécies iônicas passam a representar uma fração proporcionalmente maior do material e podem contribuir para a condutividade da suspensão aquosa. De Morais *et al*. (2024) observaram aumento da CE de biochars com a elevação da temperatura de pirólise e destacaram que essa propriedade é influenciada pelo teor de cinzas, sais e íons presentes no material. Os autores também verificaram associação positiva entre o aumento da temperatura, o teor de cinzas e a CE.

Resultados semelhantes foram encontrados por Almutairi *et al*. (2023), que avaliaram biochars produzidos entre 300 e 600 °C e verificaram aumento geral da CE com a elevação da temperatura de pirólise. Os autores relacionaram os maiores valores à presença de maiores quantidades de sais solúveis. Esse comportamento também foi observado especificamente em material derivado de coco. Dhar *et al*. (2022), ao avaliarem biochars produzidos a partir de fibra de coco por pirólise lenta entre 350 e 600 °C, verificaram aumento da CE à medida que a temperatura de pirólise foi elevada, juntamente com o aumento do teor de cinzas e do pH. A

proximidade da matéria-prima e da faixa de temperatura utilizada reforça a tendência observada no presente estudo.

A influência da composição mineral sobre a CE também foi demonstrada por Domingues *et al*. (2017), que verificaram maiores valores de condutividade em biochars contendo minerais solúveis, como kalicinita e silvita, além de relacionarem essa propriedade à presença de constituintes inorgânicos solúveis em água. Dessa forma, o aumento da CE observado neste estudo é coerente com o incremento do teor de cinzas verificado nas temperaturas mais elevadas, indicando maior participação de constituintes minerais e espécies solúveis nos biochars.

Do ponto de vista agronômico, a condutividade elétrica constitui um importante indicador da presença de sais solúveis e nutrientes minerais no biochar. Valores mais elevados de CE podem estar associados a maiores concentrações de espécies iônicas solúveis, incluindo nutrientes como o potássio, o que pode favorecer o uso do material como condicionador ou fonte complementar de nutrientes para o solo (Domingues *et al*., 2017; Almutairi *et al*., 2023).

Entretanto, biochars com elevada CE devem ser utilizados com cautela, principalmente em doses elevadas ou em solos com maior suscetibilidade à salinização, uma vez que o excesso de sais solúveis pode aumentar a salinidade do meio e prejudicar o desenvolvimento de plantas sensíveis (Palansooriya *et al*., 2021).

Na Tabela 10 são apresentados os valores de capacidade de troca catiônica (CTC) dos biochars em função do tempo de residência e da temperatura de pirólise.

Tabela 10 – Capacidade de troca catiônica (mmolc kg^{-1}) dos biochars em função do tempo de residência e da temperatura de pirólise

Tempo (minutos)	**Temperatura de pirólise (°C)**		
	400	**500**	**600**
30	189	277	432
60	563	335	557
90	482	402	294

Fonte: O autor.

A CTC apresentou comportamento variável em função das condições de pirólise, sem uma tendência uniforme associada à temperatura ou ao tempo de residência (Tabela 10). Aos 30 minutos, os valores aumentaram de 189 mmolc kg^{-1}, a 400 °C, para 432 mmolc kg^{-1}, a 600 °C. Em contraste, aos 90 minutos ocorreu redução de 482 para 294 mmolc kg^{-1} com o aumento da temperatura. Aos 60 minutos, observou-se comportamento não linear, com valores de 563, 335 e 557 mmolc kg^{-1} a 400, 500 e 600 °C, respectivamente.

A CTC dos biochars está relacionada à presença de sítios de carga negativa na superfície, especialmente aqueles associados a grupos funcionais oxigenados, bem como à composição mineral e às características da estrutura porosa do material. Em muitos casos, o aumento da temperatura de pirólise promove a perda de grupos carboxílicos, fenólicos e outros grupos oxigenados, reduzindo os sítios disponíveis para troca de cátions (Tomczyk *et al*., 2020). Entretanto, essa resposta não é universal e depende da matéria-prima e das transformações estruturais promovidas durante a pirólise. Domingues *et al*. (2017) observaram ampla variação da CTC entre diferentes biomassas e temperaturas, enquanto Liao *et al*. (2018) verificaram aumento da CTC com a elevação da temperatura em biochars de resíduos agrícolas e florestais. Essa variabilidade é compatível com a ausência de uma tendência única observada no presente estudo.

Do ponto de vista agronômico, a CTC representa uma propriedade importante do biochar, pois está relacionada à capacidade do material de reter e trocar cátions, como Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} e NH_4^{+}, reduzindo potencialmente perdas por lixiviação e contribuindo para a retenção de nutrientes no sistema solo-biochar. Domingues *et al*. (2017) destacam que biochars com elevada CTC apresentam potencial para aumentar a retenção de nutrientes no solo, constituindo uma característica relevante para seu uso agronômico.

A Instrução Normativa SDA nº 35/2006 estabelece CTC mínima de 200 mmolc kg^{-1} para condicionadores de solo destinados à melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas do solo. Numericamente, oito das nove condições avaliadas neste estudo apresentaram valores superiores a esse limite, sendo a exceção o biochar produzido a 400 °C por 30 minutos, com 189 mmolc kg^{-1}.

Na Tabela 11 são apresentadas as concentrações de potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e fósforo (P) nos biochars em função do tempo de residência e da temperatura de pirólise.

Tabela 11 – Concentrações de macronutrientes nos biochars em função do tempo de residência e da temperatura de pirólise

Variáveis		**Macronutrientes (mg/kg)**			
Temperatura	**Tempo**	**K**	**Ca**	**Mg**	**P**
400	**30**	25528,2	3671,9	3253,4	1970,0
	60	28882,1	3735,9	3600,1	2258,0
	90	27813,0	3476,2	3629,2	1928,9
500	**30**	28108,3	3905,7	3668,8	2066,1
	60	30705,5	4933,3	4311,2	2553,0
	90	29406,9	3885,2	3920,6	2126,4
600	**30**	31100,8	4247,0	3843,1	2194,3
	60	32548,0	4778,0	3999,3	1963,5
	90	29842,4	4015,0	3789,1	2260,4

Fonte: O autor.

De modo geral, as concentrações de K, Ca e Mg apresentaram tendência de aumento entre 400 e 600 °C quando comparados os mesmos tempos de residência. Para o K, os valores passaram de 25.528,2–28.882,1 mg kg^{-1} a 400 °C para 29.842,4–32.548,0 mg kg^{-1} a 600 °C. Comportamento semelhante foi observado para Ca e Mg. O fósforo apresentou maior variabilidade entre os tratamentos, embora em dois dos três tempos de residência os valores a 600 °C tenham sido superiores aos observados a 400 °C.

O aumento da concentração de parte dos macronutrientes nas temperaturas mais elevadas pode ser atribuído, principalmente, à perda de massa da fração orgânica durante a pirólise e à consequente concentração relativa dos constituintes minerais na fração sólida. Ippolito *et al*. (2020), em uma ampla análise de dados de biochars produzidos a partir de diferentes matérias-primas, demonstraram que o aumento da temperatura de pirólise tende a elevar as concentrações de diversos macronutrientes, especialmente P e Ca, embora as respostas de K e Mg possam variar em função da matéria-prima e das condições de produção. Os autores relacionaram esse comportamento, entre outros fatores, ao aumento do teor de cinzas e à concentração dos elementos remanescentes após a volatilização da matéria orgânica. Lataf *et al*. (2022) também demonstraram que a composição mineral dos biochars é fortemente condicionada tanto pela matéria-prima quanto pela temperatura de pirólise, destacando que essas variáveis devem ser consideradas conjuntamente na avaliação do potencial agronômico do material

Em relação ao tempo de residência, K e Ca apresentaram, nas três temperaturas, maiores concentrações aos 60 minutos em comparação aos tempos de 30 e 90 minutos. Para Mg e P,

entretanto, não foi observado um padrão uniforme de resposta ao tempo de residência. Assim, o efeito do tempo sobre a composição mineral mostrou-se dependente do elemento avaliado.

O potássio foi o macronutriente presente em maior concentração em todos os tratamentos, variando de aproximadamente 25,5 a 32,5 g kg^{-1} de biochar. Esses valores evidenciam o potencial do material como fonte complementar de K em aplicações agronômicas. Entretanto, a concentração total do elemento não corresponde necessariamente à fração imediatamente disponível às plantas, uma vez que sua disponibilidade depende das formas químicas presentes no biochar e de sua solubilidade após a aplicação ao solo.

Na Tabela 12 são apresentadas as concentrações de ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e cobre (Cu) nos biochars em função do tempo de residência e da temperatura de pirólise.

Tabela 12 – Concentrações de micronutrientes nos biochars em função do tempo de residência e da temperatura de pirólise

Variáveis		**Micronutrientes (mg/kg)**			
Temperatura (°C)	**Tempo (min)**	**Fe**	**Mn**	**Zn**	**Cu**
400	**30**	205,27	40,20	22,47	13,10
	60	300,97	38,26	27,17	12,93
	90	295,67	39,31	28,68	14,63
500	**30**	418,37	38,00	30,19	15,39
	60	460,27	48,36	49,43	16,03
	90	208,37	39,99	30,00	15,13
600	**30**	192,07	31,20	25,41	15,04
	60	349,27	39,22	30,42	12,85
	90	203,97	36,91	25,73	13,15

Fonte: O autor.

As concentrações dos micronutrientes apresentaram comportamento variável entre as condições de pirólise, sem uma tendência uniforme de aumento ou redução em função da temperatura ou do tempo de residência. Destaca-se, entretanto, que o tratamento a 500 °C por 60 minutos apresentou as maiores concentrações de todos os elementos avaliados, com 460,27 mg kg^{-1} de Fe, 48,36 mg kg^{-1} de Mn, 49,43 mg kg^{-1} de Zn e 16,03 mg kg^{-1} de Cu. Nas condições de 600 °C, as concentrações desses elementos foram, em geral, inferiores aos respectivos valores máximos observados a 500 °C.

A concentração de micronutrientes no biochar depende da composição inicial da biomassa e das transformações ocorridas durante a pirólise. Ippolito *et al*. (2020), em uma análise abrangente de biochars produzidos a partir de diferentes matérias-primas e temperaturas, demonstraram que as concentrações totais de micronutrientes são fortemente

influenciadas pela matéria-prima e também podem ser alteradas pela temperatura de pirólise, sendo a resposta dependente do elemento considerado. De maneira semelhante, Dissanayaka *et al*. (2025), ao avaliarem biochars produzidos a partir de casca de coco entre 300 e 500 °C, não observaram efeito significativo da temperatura sobre as concentrações totais de Fe, Cu e Zn, evidenciando que a resposta desses elementos à pirólise não ocorre necessariamente de forma linear. Esse comportamento é compatível com a variabilidade observada no presente estudo.

Em relação ao Cu e ao Zn, que além de micronutrientes podem representar risco ambiental quando presentes em concentrações elevadas, os valores máximos observados neste estudo foram de 16,03 e 49,43 mg kg^{-1}, respectivamente. Esses valores encontram-se numericamente abaixo das faixas de limites máximos utilizadas pelo IBI (2015) para avaliação desses elementos, que variam de 143 a 6.000 mg kg^{-1} para Cu e de 416 a 7.400 mg kg^{-1} para Zn, dependendo da jurisdição considerada. Dessa forma, os resultados indicam baixas concentrações desses elementos nos biochars avaliados. Essa comparação, entretanto, não deve ser interpretada isoladamente como comprovação de atendimento integral aos critérios de certificação do IBI, que incluem a avaliação de outros contaminantes e requisitos analíticos específicos.

5 CONCLUSÃO

A temperatura de pirólise exerceu maior influência sobre as propriedades do biochar produzido a partir da casca de coco verde do que o tempo de residência. O aumento da temperatura promoveu redução do rendimento gravimétrico, dos materiais voláteis e das razões atômicas H/C e O/C, além do aumento do teor de carbono fixo, do pH e da condutividade elétrica. Para as propriedades que apresentaram interação entre temperatura e tempo de residência, a influência do tempo foi mais evidente a 400 °C, enquanto nas temperaturas de 500 e 600 °C as diferenças entre os tempos foram menos pronunciadas.

Entre as condições avaliadas, a pirólise a 600 °C por 30 minutos apresentou o melhor equilíbrio entre as características do biochar e o menor tempo de processamento. Nessa condição, o material apresentou 80,52% de carbono fixo, pH de 10,13, razão H/C de aproximadamente 0,26, razão O/C de aproximadamente 0,15, capacidade de troca catiônica de 432 mmolc kg^{-1} e concentração de potássio de aproximadamente 31,1 g kg^{-1}. Além disso, a temperatura de 600 °C apresentou o maior rendimento médio em carbono fixo entre as temperaturas avaliadas.

As baixas razões H/C e O/C obtidas nessa condição são numericamente compatíveis com faixas utilizadas internacionalmente como indicadores de estabilidade do carbono em biochars, enquanto o pH alcalino, a capacidade de troca catiônica e o elevado teor de potássio evidenciam características de interesse agronômico. Dessa forma, o biochar produzido a 600 °C por 30 minutos apresentou características promissoras tanto para aplicações relacionadas ao condicionamento do solo quanto para estratégias de remoção e armazenamento de carbono.

Os resultados demonstram, portanto, o potencial da casca de coco verde como matéria-prima para a produção de biochar e fornecem informações técnicas para o desenvolvimento futuro de sistemas contínuos de pirólise. Considerando que, a 600 °C, o aumento do tempo de residência não resultou em melhorias expressivas nas principais propriedades avaliadas, a utilização de 30 minutos apresenta vantagem operacional e pode contribuir para a redução do tempo de processamento em aplicações de maior escala.

REFERÊNCIAS

ALMUTAIRI, A. A. *et al.* Variations in composition and stability of biochars derived from different feedstock types at varying pyrolysis temperature. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences,** v. 22, n. 1, p. 25-34, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jssas.2022.05.005.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D1762-84(2021): Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021. DOI: https://doi.org/10.1520/D1762-84R21.

BILIAS, F. *et al.* Towards a Soil Remediation Strategy Using Biochar: Effects on Soil Chemical Properties and Bioavailability of Potentially Toxic Elements. **Toxics,** v. 9, n. 8, p. 184, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/toxics9080184.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 35, de 4 de julho de 2006. Aprova as normas sobre especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, de alcalinidade e de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura. **Diário Oficial da União:** seção 1, Brasília, DF, p. 32, 12 jul. 2006. Disponível em: https://faolex.fao.org/docs/pdf/bra67952.pdf. Acesso em: 7 out 2024.

BUDAI, A. *et al.* **Biochar Carbon Stability Test Method: An assessment of methods to determine biochar carbon stability.** International Biochar Initiative, 2013. Disponível em: https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/06/IBI_Report_Biochar_Stability_Test_Method_Final.pdf. Acesso em: 8 set. 2026.

CÁRDENAS-AGUIAR, E. *et al.* The Effects of Feedstock, Pyrolysis Temperature, and Residence Time on the Properties and Uses of Biochar from Broom and Gorse Wastes. **Applied Sciences,** v. 14, n. 10, p. 4283, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/app14104283.

CHIARAMONTI, D. *et al.* Biochar is a long-lived form of carbon removal, making evidence-based CDR projects possible. **Biochar,** v. 6, p. 81, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s42773-024-00366-7.

ĆWIELĄG-PIASECKA, I. *et al.* Deashed Wheat-Straw Biochar as a Potential Superabsorbent for Pesticides. **Materials,** v. 16, n. 6, p. 2185, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/ma16062185.

DE MORAIS, E. G. *et al.* Empirical Correlation between Electrical Conductivity and Nitrogen Content in Biochar as Influenced by Pyrolysis Temperature. **Nitrogen,** v. 5, n. 2, p. 288-300, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/nitrogen5020019.

DHAR, S. A.; SAKIB, T. U.; HILARY, L. N. Effects of pyrolysis temperature on production and physicochemical characterization of biochar derived from coconut fiber biomass through slow pyrolysis process. **Biomass Conversion and Biorefinery,** v. 12, n. 7, p. 2631-2647, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s13399-020-01116-y.

DIN. **DIN EN ISO 16948:2015-09: Solid biofuels - Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen (ISO 16948:2015).** Berlin: DIN, 2015. DOI: https://doi.org/10.31030/2244183.

DIN. **DIN EN ISO 16993:2016-11: Solid biofuels - Conversion of analytical results from one basis to another (ISO 16993:2016).** Berlin: DIN, 2016. DOI: https://doi.org/10.31030/2555895.

DIN. **DIN EN ISO 16994:2016-12: Solid biofuels - Determination of total content of sulfur and chlorine (ISO 16994:2016).** Berlin: DIN, 2016. DOI: https://doi.org/10.31030/2558210.

DISSANAYAKA, N. S. *et al.* Evaluation of the nutritional composition of king coconut husk waste biochar and ash soil conditioners: a comprehensive analysis. **Technology in Agronomy,** v. 5, p. e003, 2025. DOI: https://doi.org/10.48130/tia-0024-0034.

DOMINGUES, R. R. *et al.* Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **PLOS ONE,** v. 12, n. 5, p. e0176884, 2017. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176884.

ENDERS, A. *et al.* Total elemental analysis of metals and nutrients in biochars. In: SINGH, B.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; LEHMANN, J. (Ed.). **Biochar: a guide to analytical methods.** Clayton South: CSIRO Publishing, 2017. p. 95-108.

EUROPEAN BIOCHAR CERTIFICATE (EBC). **European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar.** Version 10.2E, 8 Dec. 2022. Frick: Carbon Standards International, 2022. Disponível em: https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version_en_10_2.pdf. Acesso em: 15 nov. 2024.

HAELDERMANS, T. *et al.* Microwave assisted and conventional pyrolysis of MDF-characterization of the produced biochars. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,** v. 138, p. 218-230, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.12.027.

INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE. **Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil.** Version 2.1. 2015. Disponível em: https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2019/01/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final1.pdf. Acesso em: 22 ago. 2024.

IPIALES, R. P. *et al.* Hydrothermal carbonization of swine manure in a continuous flow reactor pilot plant with process water recycling. **Biomass and Bioenergy,** v. 198, p. 107854, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107854.

IPPOLITO, J. A. *et al.* Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. **Biochar,** v. 2, n. 4, p. 421-438, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x.

KUMAR, A.; SAINI, K.; BHASKAR, T. Hydrochar and biochar: Production, physicochemical properties and techno-economic analysis. **Bioresource Technology,** v. 310, p. 123442, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123442.

LATAF, A. *et al.* The effect of pyrolysis temperature and feedstock on biochar agronomic properties. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,** v. 168, p. 105728, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105728.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Ed.). **Biochar for environmental management: science, technology and implementation.** 2. ed. London: Routledge, 2015. DOI: https://doi.org/10.4324/9780203762264.

LIAO, F. *et al.* Characteristics and inorganic N holding ability of biochar derived from the pyrolysis of agricultural and forestal residues in the southern China. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,** v. 134, p. 544-551, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.08.001.

LI, W. *et al.* Effects of temperature, heating rate, residence time, reaction atmosphere, and pressure on biochar properties. **Journal of Biobased Materials and Bioenergy,** v. 13, n. 1, p. 1-10, 2019.

MANDAL, S. *et al.* The effect of biochar feedstock, pyrolysis temperature, and application rate on the reduction of ammonia volatilisation from biochar-amended soil. **Science of the Total Environment,** v. 627, p. 942-950, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.312.

MCCALL, M. A. *et al.* Biochar Stability Revealed by FTIR and Machine Learning. **ACS Sustainable Resource Management,** v. 2, n. 5, p. 842-852, 2025. DOI: https://doi.org/10.1021/acssusresmgt.5c00104.

OGINNI, O.; SINGH, K. Influence of high carbonization temperatures on microstructural and physicochemical characteristics of herbaceous biomass derived biochars. **Journal of Environmental Chemical Engineering,** v. 8, n. 5, p. 104169, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104169.

PURO.EARTH. **Biochar Methodology.** Edition 2022, Version 3. Helsinki: Puro.earth, 2024. Disponível em: https://7518557.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/7518557/Supplier%20Documents/Puro.earth%20Biochar%20Methodology.pdf. Acesso em: 5 abr. 2025.

RAJPUT, V. *et al.* Biochar production methods and their transformative potential for environmental remediation. **Discover Applied Sciences,** v. 6, n. 8, p. 408, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s42452-024-06125-4.

SELVARAJOO, A.; OOCHIT, D. Effect of pyrolysis temperature on product yields of palm fibre and its biochar characteristics. **Materials Science for Energy Technologies,** v. 3, p. 575-583, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mset.2020.06.003.

SHAH, M. A.; KHAN, M. N. S.; KUMAR, V. Biomass residue characterization for their potential application as biofuels. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,** v. 134, p. 2137-2145, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/s10973-018-7560-9.

SHAO, Z. *et al.* Sustained methane production enhancement by magnetic biochar and its recovery in semi-continuous anaerobic digestion with varying substrate C/N ratios. **Chemical**

Engineering Journal, v. 514, p. 163050, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.163050.

SINGH, B.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; LEHMANN, J. (ed.). **Biochar: a guide to analytical methods**. Clayton South: CSIRO Publishing; Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2017. 310 p.

SONI, B.; KARMEE, S. K. Towards a continuous pilot scale pyrolysis based biorefinery for production of biooil and biochar from sawdust. **Fuel,** v. 271, p. 117570, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117570.

SUMAN, S.; GAUTAM, S. Pyrolysis of coconut husk biomass: Analysis of its biochar properties. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects,** v. 39, n. 8, p. 761-767, 2017. DOI: https://doi.org/10.1080/15567036.2016.1263252.

TOMCZYK, A.; SOKOŁOWSKA, Z.; BOGUTA, P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology,** v. 19, n. 1, p. 191-215, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3.

TU, P. *et al.* Influence of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of biochars obtained from herbaceous and woody plants. **Bioresources and Bioprocessing,** v. 9, n. 1, p. 131, 2022. DOI: https://doi.org/10.1186/s40643-022-00618-z.

VERHEIJEN, F. G. A. *et al.* Biochar Increases Water Use Efficiency in Eucalypt Plants Under Water and Nutrient Limitation, with Trade-Offs Under Non-limiting Conditions. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition,** v. 22, n. 2, p. 1732-1742, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s42729-022-00767-2.

VILAS-BOAS, A. C. M. *et al.* Valorisation of residual biomass by pyrolysis: influence of process conditions on products. **Sustainable Energy & Fuels,** v. 8, n. 2, p. 379-396, 2024. DOI: https://doi.org/10.1039/D3SE01216F.

WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of biochar. **Fuel,** v. 217, p. 240-261, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054.

ZHAO, B. *et al.* Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar. **Journal of Cleaner Production,** v. 174, p. 977-987, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.013.

CONCLUSÃO GERAL

Os resultados desta dissertação demonstram que os resíduos do fruto de *Cocos nucifera* L. apresentam características favoráveis ao seu aproveitamento como matéria-prima para a produção de biochar, desde que sejam consideradas as particularidades da biomassa e as etapas necessárias ao seu processamento. A composição físico-química, com destaque para os teores de carbono e lignina, evidencia seu potencial para conversão termoquímica, enquanto a elevada umidade inicial representa uma importante limitação operacional. Nesse sentido, a secagem mostrou-se uma etapa fundamental do pré-processamento. Em condições naturais, o seccionamento dos frutos e sua disposição em uma única camada favoreceram a redução da umidade, enquanto, na secagem artificial, o aumento da temperatura acelerou o processo, com maior velocidade de redução da umidade a 140 °C. O modelo de Midilli mostrou-se adequado para representar a cinética de secagem da biomassa nas condições avaliadas.

A conversão dos resíduos de coco verde em sistema forno-fornalha demonstrou a viabilidade técnica de utilização de uma tecnologia de menor complexidade para a produção de biochar em escala piloto. O aumento da temperatura final de carbonização promoveu maior grau de carbonização e desenvolvimento da estrutura porosa, embora acompanhado pela redução do rendimento gravimétrico. Entre as condições avaliadas nesse sistema, o biochar produzido a 500 °C apresentou características associadas à maior estabilidade do carbono e ao maior desenvolvimento da porosidade. Apesar da redução da capacidade de retenção de água e da capacidade de troca catiônica com o aumento da temperatura, os valores dessas propriedades permaneceram elevados. Os resultados também evidenciaram, entretanto, a necessidade de aprimoramento do controle térmico do sistema para maior estabilidade e padronização do processo.

Em condições controladas de pirólise, verificou-se que a temperatura exerceu influência mais pronunciada sobre as propriedades do biochar do que o tempo de residência. O aumento da temperatura reduziu o rendimento gravimétrico, os materiais voláteis e as razões atômicas H/C e O/C e aumentou o teor de carbono fixo, o pH e a condutividade elétrica. Entre as combinações avaliadas, a condição de 600 °C por 30 minutos apresentou o melhor equilíbrio entre as propriedades do biochar e o menor tempo de processamento, resultando em material com 80,52% de carbono fixo, baixas razões H/C e O/C e características de interesse para aplicações agronômicas e para o armazenamento de carbono. O prolongamento do tempo de residência a 600 °C não proporcionou melhorias expressivas nas principais propriedades avaliadas, indicando vantagem operacional da utilização do menor tempo de processamento.

A análise conjunta dos diferentes sistemas demonstra que não existe uma única condição de produção que possa ser considerada ótima independentemente da tecnologia empregada. No sistema forno-fornalha, 500 °C proporcionou as características mais favoráveis entre as temperaturas estudadas, enquanto, no forno elétrico sob condições experimentais controladas, 600 °C por 30 minutos apresentou o melhor equilíbrio entre as variáveis avaliadas. Esses resultados evidenciam que a definição das condições de produção deve considerar não apenas a temperatura, mas também o tipo de sistema, o grau de controle operacional, o tempo de processamento e as propriedades desejadas para o produto final.

De forma integrada, a caracterização da biomassa, o estudo da secagem e a avaliação de diferentes condições e sistemas de pirólise demonstram a possibilidade de estabelecer uma cadeia tecnológica para a valorização dos resíduos do coco verde por meio da produção de biochar. Os resultados obtidos fornecem subsídios para o desenvolvimento de processos em diferentes níveis de complexidade tecnológica e indicam potencial para a obtenção de materiais com características de interesse agronômico e para estratégias de armazenamento de carbono. Estudos futuros devem avançar na otimização do controle térmico em sistemas de maior escala e na avaliação do desempenho do biochar em condições de uso, de modo a relacionar as propriedades observadas em laboratório e em escala piloto aos efeitos decorrentes de sua aplicação e ampliar a viabilidade tecnológica do aproveitamento dessa biomassa residual.