

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**PRÉ SECAGEM E TRATAMENTO TERMOQUÍMICO PARA MELHORAR A PRODUÇÃO DE BIOCÁRVÃO DE ALTO VALOR AGREGADO**Letícia Andrade Souza¹ (IC), Diego M. Yepes Maya (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá.**Palavras-chave:** Carbonização. Biofertilizante. Café. Resíduos. Bioenergia.**Introdução**

O Brasil é o maior produtor e exportador de café do mundo, detendo 36,8% da produção mundial, exercendo um papel importante no cenário global (BOSCHIERO, 2023). O estado de Minas Gerais, em destaque a região sul, é a região que mais produz café no país, em 2024, o estado brasileiro produziu aproximadamente 15 milhões de sacas de café (COSTA, 2023). Cerca de 45% do café colhido nas áreas de cultivo é composto por resíduos, sendo eles a casca, a polpa e a palha. Esses resíduos se descartados inadequadamente podem causar contaminação dos solos e águas, além de liberar metano (CH₄), um dos gases do efeito estufa, durante sua decomposição (ANDRADE, 2022). Por essa razão, é evidente a necessidade crescente de pesquisas para encontrar alternativas de reaproveitamento, reciclagem e/ou eliminação dos resíduos, visando encontrar um destino sustentável para esses resíduos.

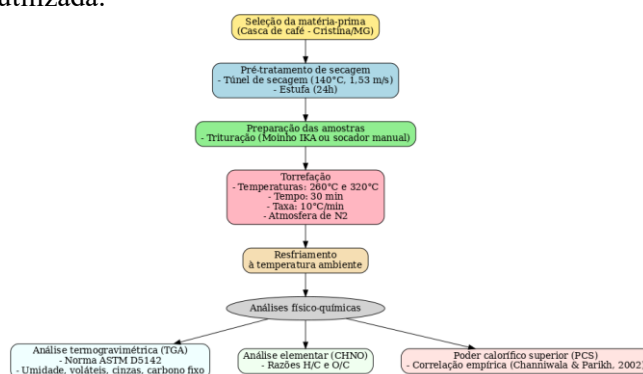
Uma estratégia muito viável, é a utilização desses resíduos para a geração de energia elétrica. No entanto, essa transformação exige uma etapa de pré-tratamento de secagem desse resíduo para aumentar seu potencial de conversão termoquímica. Este método, além de diminuir o volume de resíduos remanescentes, também agrega valor a essa biomassa, transformando-a em um produto de interesse comercial (Perazzini, 2023). Outro método utilizado para o tratamento e a mitigação dos resíduos de café é o reaproveitamento dessa biomassa utilizando tratamentos termoquímicos, como a carbonização que tem como produto o biocárvão, um material rico em carbono, que pode possuir muitas aplicações finais, a estabilização dos solos em plantações e a produção de energia são exemplos importantes de empregabilidade desse material (Dávila-Caro, 2023).

Este estudo investiga a influência que o processo de secagem possui no potencial de conversão termoquímica da casca de café se associada a um pré-tratamento de secagem, por meio da carbonização. Amostras de material seco e material in natura, foram submetidas a

diferentes temperaturas e taxas de aquecimento, e o biocárvão resultante foi caracterizado por meio de análises físico-químicas. Com base nos resultados da caracterização, foram avaliadas possíveis alternativas de utilização da biomassa carbonizada: uso como biofertilizante na estabilização de solos ou como matéria-prima na produção de biocombustíveis.

Metodologia

Figura 1 – Fluxograma detalhando a metodologia utilizada.



Fonte: Autoria própria (2025).

A biomassa utilizada foi a casca de café, proveniente de Cristina situada no sul de Minas Gerais. O pré-tratamento consistiu em secagem em células dentro de túnel com controle de temperatura e velocidade do ar (140 °C; 1,53 m/s). Em seguida, as amostras foram mantidas em estufa a temperatura controlada por 24 h para eliminar a umidade residual.

Para garantir uma exploração abrangente das propriedades termoquímicas da casca de café residual, foi realizada a torrefação das biomassas secas e in natura em duas temperaturas, 260 e 320°C. Primeiramente as amostras foram preparadas para a torrefação, as secas foram trituradas utilizando um Moinho Analítico para Laboratório IKA A11 e as amostras in natura foram trituradas com um socador de porcelana manual. A torrefação foi realizada utilizando uma balança

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

termogravimétrica LECO TGA701, situada no Laboratório de Caracterização de Combustíveis na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). As cascas foram mantidas por 30 minutos com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. A biomassa foi depositada em cadinhos abertos, sem a tampa, e o processamento foi realizado na atmosfera de gás nitrogênio apenas. Após o processo de torrefação os biochars foram resfriados à temperatura ambiente.

Após o tratamento, o biocarvão produzido na torrefação foi submetido a algumas análises. Primeiramente foi realizada a análise termogravimétrica (TGA), no mesmo equipamento da etapa anterior. Os testes foram realizados obedecendo a norma ASTM D5142 para realizar a análise proximal do biocarvão e das amostras de casca de café que não foram carbonizadas a fim de determinar os parâmetros de umidade, matéria volátil, carbono fixo e cinzas. Também foi realizada uma análise elementar utilizando um analisador elementar Perkin Elmes 2400 série II, presente no mesmo laboratório. As amostras foram caracterizadas com o objetivo de observar a mudança na composição orgânica do material durante a carbonização.

Foram avaliados principalmente as razões molares H/C e O/C, com o objetivo de verificar sua melhor utilização final. Não obstante, também foi obtido o poder calorífico superior (PCS) através de estimativas com base na composição elementar de um combustível, uma correlação empírica deduzida por Channiwala e Parikh (2002), descrita pela Equação 1. (Basu, 2013)

$$PCS = 0,3491C + 1,1783H - 0,10340 - 0,00151N - 0,0211S + 0,1005Q \quad \text{Equação (1)}$$

As porcentagens dos elementos foram obtidas a partir da análise elementar e os valores foram substituídos na equação acima.

Resultados e discussão

Para as próximas análises será importante considerar as seguintes nomenclaturas: C.C.S-260: Casca de café seca e torrificada a 260°C; C.C.N.-260 Casca de café in natura torrificada a 260°C; C.C.S.-320: Casca de café seca e torrificada a 320°C; C.C.N.-320: Casca de café in natura torrificada a 320°C; C.C.N: Casca de café in natura; C.C.S: Casca de café seca.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos a partir da análise proximal.

Tabela 1 – Resultados obtidos a partir da análise na TGA.

Amostra	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	C fixo(%)
C.C.S.-260	20,16	146,5	-174,5	107,8
C.C.N-260	-0,39	161,3	-117,6	56,73
C.C.S.-320	66,12	384,2	-604,7	254,3
C.C.N.-320	-74,26	8672	-8469	7313
C.C.N.	89,65	17,76	-11,02	360
C.C.S.	14,13	89,96	-24,54	20,44

Fonte: Autoria própria (2025)

Sabemos que a soma dos quatro parâmetros (Umidade + Voláteis + Cinzas + Carbono Fixo) deveria girar em torno de 100%. Muitos valores da tabela são claramente incorretos (valores negativos ou >100%), portanto os resultados numéricos não terão relevância na conclusão final deste estudo e serão analisadas somente tendências qualitativas, comparando entre as amostras.

Nesse sentido, foi observado que com o aumento da temperatura de torrefação, o valor do carbono fixo aumenta na biomassa, o que é esperado, visto que quanto mais matéria orgânica se decompõe, mais o resíduo fica carbonáceo. O aumento da temperatura também causa efeito na perda de voláteis, sugerindo que esse aumento provoca uma volatilização maior. Além disso, a carbonização também provoca um aumento no valor da volatilização. A umidade também apresentou valores menores com a carbonização do material.

O teor de carbono fixo foi mais alto nas amostras secas, ademais, voláteis e umidade também foram mais controláveis, a depender da temperatura. No entanto, alguns valores negativos na temperatura de 320°C indicam possíveis perdas indevidas em amostras previamente secas, sugerindo que a torrefação excessiva dessas amostras apresenta maior risco de erros experimentais ou degradação do material.

Na Tabela 2 estão representados os valores obtidos a partir da análise elementar.

Tabela 2 – Resultados obtidos a partir da análise elementar.

Amostra	C(%)	H(%)	N(%)	O(%)
C.C.S.-260	67,63	4,31	2,97	25,09
C.C.N. – 260	60,91	5,78	2,9	30,41

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

C.C.S. – 320	4,91	2,73	2,43	39,92
C.C.N. – 320	65,43	4,12	3,18	27,27
C.C.N.	45,34	11,48	2,05	41,12
C.C.S.	55,88	7,375	2,32	34,43

Fonte: Autoria própria (2025).

Analisando os resultados das análises é possível afirmar que os valores de carbono aumentam com o aumento da temperatura de carbonização. Ademais, Não obstante, o teor de hidrogênio diminui com a carbonização, refletindo a perda de compostos voláteis ricos nesse elemento. Os valores carbonizados são semelhantes aos de carvão vegetal, indicando boa conversão térmica. Algumas amostras apresentaram valores elevados de nitrogênio, isso pode ter sido causado pela possível presença de resíduos proteicos ou fertilizantes, ou por alguma contaminação cruzada durante a moagem ou análise.

As razões atômicas O/C e H/C caem com o aumento da temperatura de torrefação, indicando maior aromaticidade e condensação de carbono, como esperado na pirólise, indicando a tendência de formação de biochar mais estável e hidrofóbico. As amostras secas na temperatura de 260°C apresentaram maior teor de carbono se comparado as amostras in natura nessa mesma temperatura. Além disso, os teores de oxigênio e hidrogênio nas amostras secas também foram menores, o que reduz os índices de O/C e H/C, proporcionando um biochar mais estável e menos reativo, sendo mais resistente à degradação.

Sendo assim, pode-se concluir que os resultados obtidos apresentam um bom alinhamento com a literatura, especialmente as porcentagens de carbono e hidrogênio (Silva et al., 2020).

Os resultados obtidos a partir do cálculo do poder calorífico superior estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores obtidos a partir do cálculo do PCS.

Amostra	HHV (MJ/kg)
C.C.S.-260	26,081
C.C.N.-260	24,925
C.C.S.-320	18,258
C.C.N.-320	24,872
C.C.N.	25,102
C.C.S.	24,634

Fonte: Autoria própria (2025).

A literatura fornece o poder calorífico superior da casca de café in natura varia entre 22 e 26 MJ/kg. Todos os valores obtidos se encontram dentro dessa faixa, exceto a casca de café seca e torrificada a 320°C que apresentou um valor abaixo do esperado. Esse comportamento pode indicar a perda excessiva de voláteis durante a carbonização intensa a uma temperatura elevada, outra razão pode ser a formação de biocarvão com baixo teor de hidrogênio, como apresentado na análise elementar, visto que a ausência desse composto reduz a energia liberada.

Além do hidrogênio, as proporções entre carbono, e oxigênio influenciam fortemente os resultados do poder calorífico superior da amostra, nesse sentido, pode-se afirmar, analisando os resultados, que o alto índice de carbono e hidrogênio implica um valor de PCS maior, no entanto, o alto teor de oxigênio e da umidade na amostra influenciam negativamente o valor do PCS. Sendo assim, o valor inferior da casca de café seca e torrificada a 320°C se alinha com o alto teor de oxigênio e baixo hidrogênio encontrados na análise elementar.

Vale ressaltar que a casca de café seca e torrificada a temperatura de 260°C apresentou o maior valor de PCS, o que indica que a carbonização leve aumentou a densidade energética sem comprometer os voláteis significativamente, esse comportamento é um indicativo de potencial para produção de biocarvão energético leve. Nesse âmbito, A carbonização a 260°C pode ser um ponto ótimo entre o rendimento energético e a densidade de carbono.

As amostras na temperatura de 260°C revelaram que o processo de secagem pode aumentar o valor do PCS, visto que a casca de café seca apresentou um valor mais alto de poder calorífico superior que a amostra in natura. No entanto, na temperatura de 320°C a amostra seca teve desempenho significativamente inferior. Nesse sentido, a secagem prévia pode melhorar o PCS quando a torrefação é controlada, mas a torrefação excessiva das amostras já secas pode causar perda energética, devido à degradação térmica acentuada.

Conclusões

A caracterização térmica, elementar e energéticas das cascas de café, submetida a diferentes temperaturas de torrefação, permitiu avaliar seu potencial como biomassa

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

para fins energéticos e para produção de biofertilizante. Os resultados da análise termogravimétrica conforme a norma ASTM D5142 revelaram que a carbonização a 260°C promoveu um aumento no carbono fixo da amostra e a redução da umidade e voláteis, bem como é esperado para essas condições. No entanto, a carbonização na temperatura de 320°C apresentou resultados inconsistentes, indicando possíveis erros experimentais.

A análise das proporções elementares das amostras indicou que o teor de carbono aumentou com a carbonização leve, visto que o índice de carbono na biomassa in natura foi de 45,35%, enquanto para a amostra seca e torrificada a 260°C apresentou o valor de 67,63%. Além disso, o hidrogênio e o oxigênio diminuíram com o aumento da temperatura, caracterizando a formação de um biochar mais aromático e estável. As relações atômicas H/C e O/C apresentaram uma redução na biomassa torrificada confirmando maior estabilidade e menor reatividade sob essas condições.

Para a análise do poder calorífica superior a maioria das amostras apresentaram valores dentro da faixa estabelecida pela literatura. O café seco e torrificado a 260°C apresentou maior poder calorífico, indicando carbonização leve e eficiente. Em contrapartida, a amostra de café seco e torrificado a 320°C apresentou o valor de PCS menor em comparação as outras amostras, sugerindo carbonização excessiva com perda de compostos energéticos.

As amostras secas apresentam vantagens claras quando a torrefação é realizada em temperaturas moderadas, resultando em maior poder calorífico superior, maior teor de carbono fixo e biocarvão mais estável. No entanto, a secagem prévia nas biomassas carbonizadas em temperaturas mais elevadas pode provocar perdas energéticas significativas e instabilidade nos resultados.

A casca de café apresentou grande potencial como biomassa energética, sendo temperaturas intermediárias, próximas de 260°C, ideais para torrefação, obtendo um equilíbrio favorável entre índice energético, composição química estável e baixa perda de massa útil. A carbonização mais intensa pode reduzir o rendimento energético, exigindo maior controle de processo.

O biochar produzido na faixa de temperatura sugerida, tem potencial para uso como combustível sólido, visto que apresentou um aumento no carbono fixo durante a

torrefação e um alto valor de PCS. Também pode ser utilizado como condicionador de solos, porque o material apresentou grande estabilidade, o que é requerido para essa aplicação devido a degradação microbiana do solo, essa aplicação se destaca pelo fato de concluir-se que temperaturas mais amenas são mais favoráveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Projeto: “Valorização energética de biomassa residual para precursores de alto valor energético” - Ação: Chamada CNPq/MCTI/FNDCT No 18/2021 - Faixa A – Grupos Emergentes – pelo incentivo à pesquisa. Também agradecem à Universidade Federal de Itajubá por ter cedido espaço e à Diretoria de Empreendedorismo e Inovação pelo suporte financeiro fornecido na forma de bolsa de extensão para viabilizar o presente estudo.

Referências

- Andrade, R. *Estudo dos resíduos gerados no seguimento de café e o uso potencial como subprodutos*. Josif, 2022. <https://josif.ifsuldeminas.edu.br/ojs/index.php/anais/article/download/282/238>.
- Boschiero, J. *5 maiores produtores de café do mundo*. Agroadvance, 2023. <https://agroadvance.com.br/blog-5-maiores-produtores-de-cafe-do-mundo/>.
- Costa, D. Certifica Minas Café garante a qualidade da produção de mais de 900 cafeicultores em 2023. *Agência Minas*. 2023. <https://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/certifica-minas-cafe-garante-a-qualidade-da-producao-de-mais-de-900-cafeicultores-em-2023>.
- DÁVILA-CARO, L. I. et al. Valorización energética de biomasa residual de yuca para precursores de alto valor energético: caso pirólisis. *Tecnología en Marcha*, San José, v. 36, n. esp., p. 16-26, dez. 2023. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i10>.
- Kim, D. Characterizations of biochar from hydrothermal carbonization of exhausted coffee residue. 2016. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-016-0572-2>.
- Perazzini, A. Design and economic analysis of a pre-treatment process of coffee husks biomass for an integrated bioenergy plant. *Elsevier*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103131>
- Silva, Jéssica de Oliveira da et al. *Agregação de valor a resíduos agroindustriais para fins energéticos*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.19084/RCA.15129>.
- BASU, Prabir. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*. 2. ed. Oxford: Academic Press, 2013.