PIRÓLISE DA PALHA DE *COFFEA CANEPHORA*~~*AFÉ*~~ COMO ESTRATÉGIA DE ECONOMIA CIRCULAR: PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOCHAR

Autores: Bruno Fonseca Coelho[1], Yuri Santos Borges, Hérika Fontes de Almeida, Edilton Nunes, Robson Costa, Josinaldo De Oliveria Dias.~~Não abreviar. Colocar o nome e sobrenome por extenso.~~

~~[1]Fulano de Tal[1], Sicrano de Tal[2].~~

Universidade Federal do Espírito Santo/Departamento de Engenharia Química, alto Universitário, S/N, Bairro Guararema - 29500-000 - Alegre-ES, Brasil, bufon2323@gmail.com, yuridossantosborges4@gmai.com, herika.almeida@edu.ufes.br, nunesedilton@gmail.com, robson.sousa@ufes.br, josinaldo.dias@ufes.br.
~~[1]Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, autor1@xxx.exemplo.br, autor2@xxx.exemplo.br.~~

Resumo

O aproveitamento da palha de café por pirólise representa uma alternativa para a valorização de resíduos agroindustriais. Este trabalho avaliou o rendimento do processo e as alterações na composição imediata da biomassa. A palha foi pirolisada em reator de leito fixo, sob nitrogênio, a 450 °C, com taxa de aquecimento de 3 °C·min^{-1} e permanência de 60 min. A análise imediata, composta pela determinação dos teores de umidade, cinzas, matéria volátil e carbono fixo, foi realizada conforme a ASTM D1762-84 (ASTM, 2021). O rendimento de biochar foi de 35%. Em base seca, a matéria volátil diminuiu de 77,49 ± 1,55% para 32,39 ± 0,39%, enquanto o carbono fixo aumentou de 16,18 ± 1,70% para 52,49 ± 0,12% e as cinzas de 6,32 ± 0,23% para 15,12 ± 0,15%. A umidade variou de 5,54 ± 0,10% na biomassa para 6,14 ± 0,11% no biochar. Portanto, a pirólise produziu um material com maior concentração de carbono fixo, demonstrando potencial para valorizar a palha de café no contexto da economia circular.~~O Brasil é o maior produtor mundial de café, atividade que gera grande volume de resíduos agroindustriais, como a palha de café, cujo aproveitamento por rotas termoquímicas está alinhado aos princípios da economia circular. Este trabalho teve como~~O **Avalia-se a valorização da palha de café por meio da pirólise, utilizando a caracterização imediata da biomassa *in natura* e do biochar produzido.**

objetivo ~~deste trabalho é~~ avaliar a valorização da palha de café~~,~~ por pirólise, mediante a caracterização imediata da biomassa *in natura* e do biochar produzido.~~ Para tal fimisso,~~ . A~~a~~ palha de café foi submetida à pirólise em reator de leito fixo a 450 °C, com taxa de aquecimento de 3 °C·min^{-1} e tempo de permanência de 60 min, sob fluxo de nitrogênio. A caracterização imediata foi realizada conforme a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021), sendo avaliados parâmetros como úmidade, teor de cinzas, matéria volátil e carbono fixo ASTM D1762-84. O processo apresentou rendimento de 35% de biochar. A pirólise reduziu o teor de matéria volátil de **77,49 ± 1,55**71,61% para **32,39 ± 0,39**29,40% e aumentou os teores de carbono fixo de **16,18 ± 1,70**22,71% para **52,49 ± 0,12**56,42% e de cinzas de **6,32 ± 0,23**6,02% para **15,12± 0,15**14,18%. A umidade foi de **5,54 ± 0,10**5,54% na biomassa e de **6,14 ± 0,11**6,15% no biochar. Conclui-se que a pirólise promoveu a conversão da palha de café em um biochar com maior concentração de carbono fixo e menor conteúdo de matéria volátil, evidenciando uma alternativa de valorização desse resíduo agroindustrial no contexto da economia circular.

Palavras-chave: Palha de café; **B**iochar; **P**irólise; **C**aracterização imediata; **E**conomia circular.~~: Usar no mínimo 3 e no máximo 5 palavras-chave, separadas entre si por ponto final e finalizadas por ponto.~~

Área do Conhecimento: Engenh**aria Química.**: ~~(Consulte área e subárea em que o trabalho será enviado no endereço https://www.univap.br/inic/areas_conhecimento.php).~~

Introdução

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, posição que reflete o peso econômico e social da cafeicultura no país. De acordo com estimativas da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) para o ciclo 2026, a safra brasileira deve alcançar 66,2 milhões de sacas beneficiadas, cultivadas em uma área de aproximadamente 2,3 milhões de hectares (CONAB, 2026). Esse volume expressivo de produção é acompanhado por uma geração igualmente expressiva de resíduos agroindustriais: a casca e a palha do fruto podem representar até 50% da massa colhida.

A geração desses resíduos se insere em um contexto mais amplo de mudanças climáticas e da consequente necessidade de transição para modelos de produção mais sustentáveis, no qual o conceito de economia circular (Pongsiriyakul et al., 2024). Nesse sentido, a conversão da casca de café em biochar, por meio de processos termoquímicos de pirolise, vem sendo explicitamente enquadrada na literatura como uma abordagem de economia circular, ao transformar um resíduo agroindustrial de baixo valor em potencial de retorno ao próprio sistema produtivo agrícola (Abella-Segura; Coral; Rodriguez, 2025).

Dentre as rotas de aproveitamento de biomassas residuais, a conversão termoquímica por pirólise vem se consolidando como alternativa sustentável às formas tradicionais de descarte ou queima direta. A pirólise consiste na decomposição térmica da biomassa em atmosfera inerte, geralmente sob fluxo de nitrogênio, resultando em três frações principais: uma fração sólida (biochar), uma fração líquida (bio-óleo) e uma fração gasosa não condensável (Fahmy et al., 2018). O uso de atmosfera inerte é essencial para evitar a combustão do material e direcionar as reações de decomposição para a formação preferencial dessas frações, sendo o rendimento de cada uma delas fortemente dependente das condições operacionais do processo e da composição da biomassa de partida (Bispo, 2018).

Entre os produtos da pirólise, o biochar tem recebido atenção crescente por sua versatilidade de aplicações. Trata-se de um material sólido rico em carbono, com estrutura porosa e superfície quimicamente reativa, cujas propriedades como, teor de carbono fixo, matéria volátil, cinzas e umidade determinam seu potencial de uso como condicionador de solo, agente de sequestro de carbono e adsorvente de contaminantes em água e solo (Ahmad et al., 2014).

A química imediata é um dos parâmetros de caracterização mais utilizados na literatura para avaliar tanto a biomassa in natura quanto o biochar resultante da pirólise, pois permite inferir de forma rápida e relativamente simples a qualidade energética do material e sua adequação a diferentes usos. Diante desse cenário o presente trabalho tem como propósito avaliar a valorização da palha de café por rota termoquímica, por meio da caracterização da química imediata da biomassa in natura e do biochar produzido, bem como da determinação do rendimento do processo de pirólise sob fluxo de nitrogênio.

Metodologia

O procedimento experimental foi organizado em três etapas sequenciais: (i) caracterização por química imediata da palha de café in natura; (ii) condução do processo de pirólise, com determinação do rendimento das frações sólida~~, líquida e gasosa~~; e (iii) caracterização por química imediata do biochar obtido. A biomassa utilizada neste estudo foi a palha de café, doada por produtores rurais do município de Jerônimo Monteiro, Espírito Santo. A Figura 1 apresenta o aspecto visual da biomassa *in natura* e do biochar obtido após a pirólise.~~A biomassa utilizada neste trabalho foi a palha de café, doada por produtores rurais do município de Jerônimo Monteiro, no estado do Espírito Santo.~~

Figura 1: **Aspecto visual da palha de café (a)** *in natura* **e (b) após a conversão em biochar por** pirólise.



Fonte: Autor próprio.



Fonte: Autor próprio.

Fonte: elaborado pelo próprio autor(2026)

A química imediata da palha de café in natura e do biochar produzido foi determinada com base na norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021), compreendendo quatro parâmetros: teor de umidade, teor de cinzas, teor de matéria volátil e teor de carbono fixo. O procedimento de cada determinação é descrito a seguir, na ordem em que foram executadas.

Para a análise do teor de umidade as amostras foram secas em estufa a (105 ± 3) °C por 24 h ininterruptas, resfriadas em dessecador e pesadas em balança analítica com precisão de quatro casas decimais. O teor de umidade em base úmida foi calculado pela Equação 1. O teor de cinzas as amostras já secas (Ms) foram calcinadas em forno mufla a 700 °C por 4 h ininterruptas. O teor de cinzas foi determinado pela Equação 2:



Fonte: Autor próprio.



Fonte: Autor próprio.

(Eq. 1)

~~**Mt (%) = [(Mw – Ms) / Mw] × 100 (Eq. 1)**~~

~~Cz (%) = (Mc / Ms) × 100 (Eq. 2)~~

(Eq. 2)

onde Mt é o teor de umidade, Mw é a massa úmida (antes da secagem), Ms é a massa seca, Cz é o teor de cinzas, Mc é a massa de cinzas remanescente após a calcinação.

Para quantificar o teor de matéria volátil as amostras secas foram colocadas em cadinhos de porcelana sem tampa e inseridas em mufla pré-aquecida a 600 °C~~,~~ ~~e~~ Em seguida, os cadinhos foram tampados e o forno mantido fechado por 7 minutos. Após resfriamento em dessecador, as amostras foram pesadas para obtenção da massa final (Mf). O teor de matéria volátil foi calculado pela Equação 3. O teor de carbono fixo foi obtido por diferença em relação às demais frações, uma vez que umidade,

cinzas, matéria volátil e carbono fixo compõem, juntos, a totalidade da massa da amostra. O cálculo foi realizado pela Equação 4:

~~Mv (%) = [(Ms – Mf) / Ms] × 100 (Eq. 3)~~

~~(Eq. 3)~~

$$Cf\ (\%) = 100 - (Cz + Mv) \quad \text{(Eq. 4)}$$

em que Mv é o teor de matéria volátil, Ms é a massa seca, Mf é a massa final após o aquecimento a 600 °C e Cf é o teor de carbono fixo.

A pirólise da palha de café foi conduzida em reator de leito fixo inserido em forno mufla, sob fluxo constante de nitrogênio, responsável por inertizar a atmosfera reacional e suprimir a combustão do material. As condições operacionais empregadas em cada ensaio estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 — Condições operacionais do processo de pirólise.

Parâmetro	Condição
Massa de biomassa por ensaio	300 ± 10 g
Temperatura final de pirólise	450 °C
Taxa de aquecimento	3 °C/min
Tempo de reação	60 min
Atmosfera	N_2 (fluxo constante)

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2026).

A temperatura final de 450 °C foi escolhida por se aproximar de parâmetros praticados em escala industrial, conferindo maior representatividade aos resultados obtidos. A fração condensável dos vapores gerados foi capturada em condensador resfriado com banho de água e gelo, sendo o bio-óleo (licor pirolenhoso) coletado em kitassato.

A eficiência do processo foi avaliada por meio dos rendimentos gravimétricos da fração solida, conforme a Equação 1:

$$Rcv\ (\%) = (Mcv / Mm) \times 100 \quad \text{(Eq. 5)}$$

Onde Rcv é rendimentos em biochar; Mcv é a massa de biochar obtida ao final do processo; e Mm é a massa seca inicial da biomassa alimentada ao reator.

Resultados

~~Química imediata da biomassa e do biochar~~

A Tabela 2 apresenta os resultados de química imediata (umidade, cinzas, matéria volátil e carbono fixo) obtidos para a palha de café in natura (Biomassa) e para o biochar produzido na condição de pirólise a 450 °C, com taxa de aquecimento de 3 °C/min

Tabela 2 :— Análise imediata da biomassa e do biochar produzido a 450 °C.

Amostra	Umidade (%)	Cinzas (%)	Matéria Volátil (%)	Carbono Fixo (%)
Biomassa	5,54 ± 0,104	6,32 6,02 ± 0,230,25	77,4971,61 ± 1,550,98	16,1822,71 ± 1,700,11
Biochar	6,14 ± 0,115	15,1214,18 ± 0,150,10	32,39 29,40 ± 0,392,55	52,4956,42 ± 0,122,49

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2026).

~~3.2 Rendimento da pirólise~~

A Figura 2~~Tabela 3~~ apresenta o~~s~~ rendimento~~os~~ gravimétrico~~s~~ da~~s~~ fração solida ~~ões obtidas~~ obtida no ~~no~~ processo de pirólise da palha de café a 450 °C.

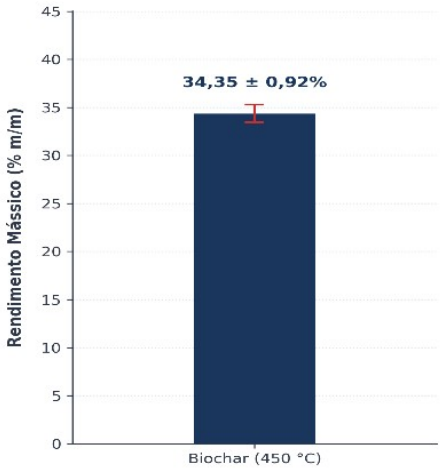
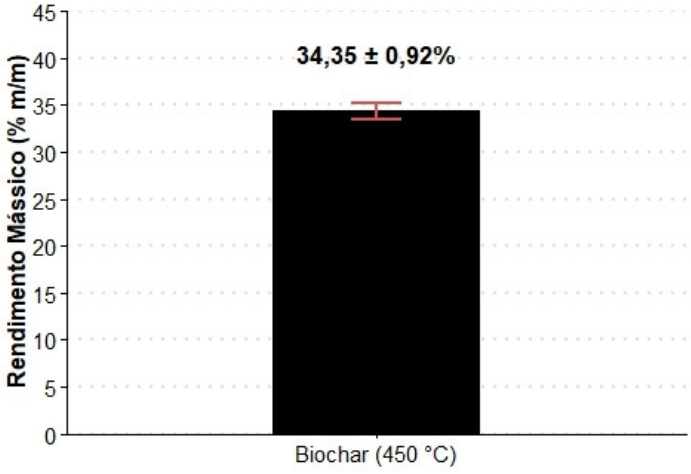


Figura 2 ~~Tabela 3 —~~ **Rendimento das frações da pirólise a 450 °C.**

~~Fração~~	~~Rendimento (%)~~
~~Biochar~~	~~35~~
~~(R_{cv})~~	



Fonte: elaborado pelo próprio autor (2026).

Discussão

O processo de pirólise da palha de café a 450 °C, com taxa de aquecimento de 3 °C/min, resultou em rendimentos de 3~~4~~5% de biochar conforme a Figura 2. A distribuição relativamente equilibrada entre as três frações é coerente com o regime de pirólise lenta empregado: a taxa de 3 °C/min está bem abaixo do limiar de 10 °C/min comumente usado para diferenciar pirólise lenta de processos intermediários e rápidos, favorecendo reações mais completas de carbonização e um rendimento sólido proporcionalmente maior do que o observado em processos conduzidos a taxas de aquecimento mais altas.

Na literatura sobre pirólise de casca de café à mesma temperatura empregada neste estudo, Domingues et al. (2017) e Setter e Oliveira (2022) convergem para rendimentos sólidos semelhantes, de 37,7% e 40,9%, respectivamente. Setter e Oliveira (2022) atribuem esse patamar de rendimento à decomposição incompleta da lignina a 450 °C, componente termicamente mais resistente da biomassa lignocelulósica, cuja degradação completa exige temperaturas mais altas. Essa explicação é compatível com o observado por Bispo (2018), cujo estudo, conduzido a 700 °C, resultou em rendimento sólido bem inferior, de 29,36%. Essa análise evidencia um padrão consistente na literatura: quanto maior a temperatura final de pirólise, menor o rendimento de biochar, em razão da intensificação das reações de craqueamento térmico secundário, que convertem parte do material carbonizado em compostos voláteis e gases.

Além de determinar o balanço de massa do processo, a pirólise promoveu alterações expressivas na composição da palha de café, evidenciadas pela comparação entre a química imediata da biomassa in natura e a do biochar produzido (Tabela 2). De forma geral, o processo converteu um material rico em matéria volátil em um material concentrado em carbono fixo e cinzas.

A casca de café já se destaca, na condição in natura, por um teor de umidade consideravelmente reduzido, de 5,545,54%, em relação a outras biomassas lignocelulósicas. Característica vantajosa do ponto de vista energético, pois reduz as perdas associadas à evaporação de água durante o aquecimento e eleva a eficiência do processo pirolítico. O valor encontrado é inferior ao relatado por Lima (2018), de 11,33%, e por Resende et al. (2025), de 13,90% para palha de café. Em ambos os casos, os valores da literatura permanecem acima do observado neste trabalho, o que indica que a biomassa aqui utilizada estava relativamente mais seca do que a média reportada. Após a pirólise, o biochar apresentou umidade de 6,146,15%, valor próximo ao da biomassa original, uma vez que a umidade residual do biochar tende a refletir principalmente a reidratação higroscópica do material durante o resfriamento e a manipulação, e não a umidade original da biomassa, que é removida já nas etapas iniciais do aquecimento.

O teor de cinzas da biomassa deste trabalho (6,302%) está em excelente concordância com o relatado por Lima (2018) para a casca de café conilon (6,01%), enquanto Resende et al. (2025) encontraram um valor moderadamente superior (7,52%) — divergência que, tomada em conjunto com a diferença de umidade observada por esse mesmo grupo, sugere que a amostra utilizada por Resende et al. (2025) possa ter uma origem ou composição mineral distinta. Após a pirólise, esse teor mais que dobrou, atingindo 15,1214,18% no biochar, já que as cinzas correspondem à fração mineral inorgânica que não se decompõe termicamente, sendo relativamente concentrada à medida que a matéria orgânica é volatilizada. Domingues et al. (2017) encontraram teor de cinzas próximo, de 12,9%, no biochar de casca de café a 450 °C, e atribuem esse patamar comparativamente elevado — em relação a biochars de madeira, por exemplo — à riqueza mineral da casca de café, associada a espécies alcalinas como carbonatos de potássio e cálcio. Do ponto de vista de aplicação, essa concentração de minerais reforça o potencial de uso do biochar de casca de café como corretivo de solos ácidos e fonte de nutrientes, especialmente quando produzido em temperaturas mais baixas, antes que a capacidade adsortiva do material seja reduzida em temperaturas mais elevadas (Domingues et al., 2017).

Os dois estudos consultados para a biomassa in natura relataram teores de matéria volátil próximos entre si e ligeiramente superiores ao encontrado neste trabalho: 73,64% em Lima (2018) e 74,35% em Resende et al. (2025), contra 67,60% 71,61% na amostra aqui utilizada. Essa pequena diferença é coerente com o próprio teor de carbono fixo mais elevado observado nesta biomassa, já que ambos os parâmetros são complementares na composição da massa seca. Após a pirólise, o teor de matéria volátil caiu de forma acentuada para 29,4032,39 ± 2,550,39% no biochar — a maior variação percentual entre os quatro parâmetros analisados —, refletindo a remoção térmica dos compostos voláteis, convertidos em bio-óleo e gases não condensáveis durante o processo. Domingues et al. (2017) relataram valor próximo, de 26,2%, para o biochar de casca de café a 450 °C, reforçando que a magnitude dessa queda é característica do próprio processo de pirólise nessa faixa de temperatura, e não uma particularidade da amostra estudada.

O carbono fixo da biomassa in natura (22,7116,18 ± 0,111,70%) foi inferior superior aos valores relatados por Lima (2018), de 20,05%, e por Resende et al. (2025), de 18,13% — sendo este último, novamente, o mais distante, na mesma direção observada para umidade e cinzas, o que reforça a hipótese de uma amostra de origem distinta naquele estudo. Após a pirólise, o carbono fixo mais que dobrou, atingindo 56,4252,49 ± 2,490,12% no biochar, resultado mais expressivo da transformação promovida pelo processo de pirólise, e reflexo direto e complementar da queda na matéria volátil e do

incremento nas cinzas discutidos anteriormente. Esse comportamento acompanha o padrão relatado por Domingues et al. (2017), que encontraram carbono fixo de 60,9% no biochar de casca de café produzido nas mesmas condições de temperatura. O aumento do carbono fixo é consistente com o processo de carbonização esperado na pirólise e representa uma vantagem para o uso do biochar, tanto na retenção estável de carbono no solo, com benefícios à fertilidade e ao potencial de sequestro de carbono, quanto no seu aproveitamento energético, dado o maior poder calorífico normalmente associado a teores mais altos de carbono fixo.

Conclusão

~~Submeta seu artigo respeitando a data limite para tal, que será rigorosamente respeitada.~~

Os resultados obtidos permitem concluir que a pirólise se mostrou uma rota eficaz para a valorização termoquímica da palha de café, atendendo ao objetivo proposto de caracterizar a biomassa in natura e o biochar resultante. A comparação entre a química imediata da biomassa in natura e a do biochar evidenciou a transformação característica promovida pela pirólise evidenciando que o processo converteu com um material rico em compostos voláteis em um material concentrado em carbono fixo, com potencial para aplicação tanto como condicionador de solo e agente de sequestro de carbono quanto como insumo energético.

Dessa forma, o biochar produzido a partir da palha de café apresenta características físico-químicas favoráveis à sua valorização, reforçando o potencial dessa rota como alternativa sustentável de destinação para um resíduo agroindustrial gerado em larga escala pela cafeicultura brasileira. Estudos futuros podem se concentrar na avaliação de outras temperaturas de pirólise e na caracterização mais aprofundada das propriedades adsortivas e agronômicas do biochar obtido.

Referências

~~Exemplos de Referências, que devem ser elaboradas de acordo com a NBR6023/2018.~~

ABELLA-SEGURA, S.; CORAL, D. F.; RODRIGUEZ, J. E. Physicochemical characterization of biochar obtained from coffee husk: a circular economy approach. In: WORLD CONGRESS ON RECENT ADVANCES IN NANOTECHNOLOGY (RAN), 10., 2025, Barcelona. Proceedings [...]. Barcelona, 2025. Paper ICNNFC 128.

AHMAD, M.; RAJAPAKSHA, A. U.; LIM, J. E.; ZHANG, M.; BOLAN, N.; MOHAN, D.; VITHANAGE, M.; LEE, S. S.; OK, Y. S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. Chemosphere, v. 99, p. 19-33, 2014.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1762-84: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

BISPO, M. D. Aproveitamento de resíduos agroindustriais de coco e de café através da pirólise: caracterização da fração líquida e aplicação analítica do biochar do coco. 2018. Tese (Doutorado em Biotecnologia Industrial) – Universidade Tiradentes, Aracaju, 2018.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de café. v. 13, safra 2026, n. 1. Brasília: CONAB, 2026.

DOMINGUES, R. R.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, C. A.; DE MELO, I. C. N. A.; MELO, L. C. A.; MAGRIOTIS, Z. M.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A. 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.

FAHMY, T. Y. A.; FAHMY, Y.; MOBARAK, F.; EL-SAKHAWY, M.; ABOU-ZEID, R. E. Biomass pyrolysis: past, present, and future. Environment, Development and Sustainability, v. 22, p. 17-32, 2018.

LIMA, M. J. Determinação da cinética de reação e condições operacionais da pirólise da casca de café em leito fixo. 2018. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2018.

PONGSIRIYAKUL, K.; WONGSURAKUL, P.; KIATKITTIPONG, W.; PREMASHTHIRA, A.; KULDILOK, K.; NAJDANOVIC-VISAK, V.; ADHIKARI, S.; COGNET, P.; KIDA, T.; ASSABUMRUNGRAT, S. Upcycling coffee waste: key industrial activities for advancing circular economy and overcoming commercialization challenges. Processes, v. 12, n. 2851, 2024.

RESENDE, R. da S.; SILVA, R. H. da; YAMAJI, F. M. Aproveitamento da casca de café como fonte de energia: incentivando a consciência ambiental com o ensino de Química. Química Nova na Escola, v. XX, n. YY, p. 1-7, 2025.

SETTER, C.; OLIVEIRA, T. J. P. Evaluation of the physical-mechanical and energy properties of coffee husk briquettes with kraft lignin during slow pyrolysis. 2022. ~~[periódico/volume/páginas incompletos]~~

Agradecimentos

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro. Agradecemos também ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e ao Laboratório de Fenômenos de Transporte, campus de Alegre, pelo apoio institucional e pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.