



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



Potencial Energético do Biochar Produzido a partir de Bagaço de Cana-de-açúcar

Clérison Moura Vieira Júnior^{1,2}, Isabella de Andrade Garrett³, Sergio Peres Ramos da Silva⁴, Yaicel Ge Proenza³, Raquel Milani^{1,2}, Antônio Celso Dantas Antonino^{1,2}, Emmanuel Damilano Dutra^{2,3}, Yelina González Pérez³, Georgiana Feitosa da Cruz⁵

¹ Observatório Nacional da Dinâmica da Água e do Carbono no Bioma Caatinga – ONDACBC, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE 50.740-545, Brasil; cleriston.vieira@ufpe.br, <https://orcid.org/0000-0002-5424-6378>; raquel.milani@ufpe.br, <https://orcid.org/0000-0001-8076-6118>; antonio.antonino@ufpe.br, <https://orcid.org/0000-0002-4120-9404>; ² Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife, PE 50.740-545, Brasil; yaicel.geproenza@ufpe.br, <https://orcid.org/0000-0003-3894-8326>; yelina.gonzalez@ufpe.br, <https://orcid.org/0009-0009-1431-5314>; ³ Grupo de Pesquisa em Energia da Biomassa, Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife, PE 50.740-545, Brasil; isabella.garrett@ufpe.br; <https://orcid.org/0000-0003-1683-2023>, emmanuel.dutra@ufpe.br; <https://orcid.org/0000-0002-3245-2795>; ⁴ Departamento de Engenharia Mecânica e Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas, Universidade de Pernambuco, Rua Benfica, 455, Madalena, Recife, PE 50.720-001, Brasil; sergperes@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2235-3507>; ⁵ Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo – LENEP, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, Macaé, RJ, 27.925-310, Brasil; georgiana@lenep.uenf.br, <https://orcid.org/0000-0003-2116-2837>.

Artigo recebido em 03/08/2025 e aceito 11/11/2026

RESUMO

A conversão de resíduos agroindustriais em fontes de energia renovável tem ganhado destaque no contexto da bioeconomia e da sustentabilidade. Neste estudo, avaliou-se o potencial energético do biochar produzido a partir do bagaço de cana-de-açúcar por pirólise em temperaturas entre 200 °C e 600 °C, com tempo de residência de 60 minutos, por meio de análises de rendimento, umidade, teor de cinzas, matérias voláteis, carbono fixo, composição elementar, poder calorífico e razão estequiométrica ar-combustível. Os resultados mostram que o aumento da temperatura intensifica a liberação de matérias voláteis e favorece a concentração de carbono no biochar, sendo a condição mais promissora observada a 300 °C, com rendimento gravimétrico de 41,36%, carbono fixo de 41,02% e poder calorífico superior de 17,34 MJ kg⁻¹, valores comparáveis aos de outras biomassas utilizadas na geração de energia. A composição elementar estimada permitiu calcular a equação de combustão e uma razão ar-combustível de 2,26 m³ de ar por quilograma de biomassa. Além do uso energético, a valorização do bagaço de cana-de-açúcar via pirólise contribui para o reaproveitamento de resíduos e para a mitigação de emissões de gases de efeito estufa devido à elevada retenção de carbono no biochar, evidenciando seu potencial como vetor estratégico para energia e sustentabilidade.

Palavras-chave: Pirólise Lenta, Caracterização Termoquímica, Bioenergia Sólida, Retenção de Carbono, Sustentabilidade Ambiental.

Energy Potential of Biochar Produced from Sugarcane Bagasse

ABSTRACT

The conversion of agro-industrial residues into renewable energy sources has gained prominence within the context of bioeconomy and sustainability. In this study, the energy potential of biochar produced from sugarcane bagasse through pyrolysis at temperatures ranging from 200 °C to 600 °C and a residence time of 60 minutes was evaluated by analyzing yield, moisture content, ash content, volatile matter, fixed carbon, elemental composition, calorific value, and the stoichiometric air–fuel ratio. The results show that increasing the pyrolysis temperature intensifies the release of volatile matter and promotes carbon enrichment in the biochar. The most favorable condition was observed at 300 °C, with a gravimetric yield of 41.36%, fixed carbon content of 41.02%, and a higher heating value of 17.34 MJ kg⁻¹, which are comparable to values reported for other biomass sources used for energy generation. The estimated elemental composition allowed the combustion equation and an air–fuel ratio of 2.26 m³ of air per kilogram of biomass to be determined. Beyond its energy applications, the valorization of sugarcane bagasse through pyrolysis contributes to waste reuse and to the mitigation of greenhouse gas emissions due to the high carbon retention in the biochar, highlighting its potential as a strategic vector for energy and sustainability.

Keywords: Slow Pyrolysis, Thermochemical Characterization, Solid Bioenergy, Carbon Retention, Environmental Sustainability.

Introdução

A busca por fontes energéticas sustentáveis tem impulsionado pesquisas voltadas à avaliação da viabilidade do aproveitamento de resíduos de biomassa para geração de energia e obtenção de produtos de maior valor agregado (Haeldermans et al., 2020). Dentre as diversas tecnologias de conversão de biomassa, o processo de pirólise destaca-se como uma das mais relevantes rotas de conversão termoquímica, permitindo a transformação da biomassa em biocombustíveis por meio da geração de frações gasosas e líquidas, além de uma fração sólida de biocarvão, também conhecido como biochar (Chen et al., 2014; Zimmerman, 2010). O biochar, além de ter uma composição rica e essencialmente carbonácea, apresenta grupos funcionais superficiais e propriedades físico-químicas vantajosas como elevada estabilidade térmica, alta porosidade, baixa densidade, alta capacidade de troca catiônica, intervalo amplo de pH e, geralmente, uma grande área superficial, tornando-o uma opção viável para diversas aplicações industriais e ambientais (Murtaza et al., 2024).

Os biochars também têm-se destacado como solução multifuncional na área agrícola, sendo promissor por sua capacidade de aumentar a produtividade e melhorar a qualidade e fertilidade do solo (Lehmann, 2007). Além disso, biocarvões de várias biomassas têm sido utilizados para o sequestro de carbono, filtração de gases, adsorção de contaminantes, redução da emissão de gases de efeito estufa (GEEs) e como fonte alternativa de energia (Nosenzo, 2024). Entretanto, o rendimento, a qualidade e as aplicações do biochar produzido estão diretamente relacionados às condições do processo de pirólise, ao tipo de reator utilizado e à natureza da biomassa empregada (Ferreira et al., 2019; Nanda et al., 2016). Em particular, o grau de aromaticidade, o tamanho das camadas carbonáceas e a morfologia da estrutura gráfica do biochar variam significativamente com a temperatura da pirólise e o tempo de residência (Valenga et al., 2024). Temperaturas mais baixas (300 °C – 400 °C) tendem a preservar grupos funcionais oxigenados, úteis para adsorção e reatividade, enquanto temperaturas mais elevadas (> 500 °C) favorecem a carbonização, resultando em materiais mais estáveis e com maior teor de carbono fixo (Valenga et al., 2024). Com isto, se faz necessário o refinamento do processo de

pirólise para cada biomassa e a caracterização do biochar em função da aplicação.

O resíduo proveniente da colheita da cana-de-açúcar é um material com alto potencial energético, candidato à produção de biocombustíveis e produtos químicos de alto valor agregado (Chieng & Kuan, 2022; Kumar et al., 2021). A cana-de-açúcar é uma das culturas mais representativas mundialmente, devido à sua ampla utilização na indústria alimentícia e na produção de biocombustíveis. Durante a safra 2023/2024, o Brasil, maior produtor mundial dessa cultura, produziu aproximadamente 713,2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (CONAB, 2024). No entanto, essa expressiva produção também resulta na geração de grandes volumes de resíduos, dentro os quais se encontra o bagaço, cuja destinação eficiente pode contribuir significativamente para a sustentabilidade do setor. Em média, cada tonelada de cana-de-açúcar in natura gera cerca de 280 kg de bagaço após processamento para extração de açúcar o álcool, e grande parte desse resíduo ainda permanece subutilizado (Nosenzo, 2024; Zafeer et al., 2024).

Juntando a necessidade de gestão sustentável de resíduos, a crescente demanda mundial por energias alternativas às energias fósseis, e o fato de que o bagaço de cana-de-açúcar (BCA) tem potencial para ser transformado em energia, minerais e produtos químicos diversos, a pirólise vem se afixando como estratégia para a conversão desses resíduos em biochar (Zafeer et al., 2024). Estudos recentes demonstram que biochars derivados da cana-de-açúcar podem adsorver hidróxido de ciprofloxacina e sulfametoxazol (Prasannamedha & Kumar, 2022), remover Pb^{2+} e Cr^{6+} de soluções aquosas (Abdelhafez & Li, 2016). Inclusive, biochars ativados quimicamente têm sido utilizados como sensor eletroquímico para a determinação de metais pesados em água, evidenciando seu caráter multifuncional (Valenga et al., 2024). Do ponto de vista energético, o BCA é um relevante insumo energético no Brasil, frequentemente utilizado para alimentar caldeiras de usinas de biomassa, gerando energia em maior parte usada pela própria usina (Barbosa da Silva et al., 2023); e ao biochar derivado do BCA após torrefação tem sido atribuído um alto valor calórico (de Almeida et al., 2022).

Este trabalho apresenta a caracterização do biochar produzido a partir do bagaço de cana-de-

açúcar (BCA) via pirólise e discute seu desempenho como potencial fonte renovável de energia, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre alternativas sustentáveis na matriz energética brasileira. O estudo avalia o efeito da temperatura de pirólise em um intervalo de 200 °C a 600 °C, com incrementos de 100 °C, mantendo-se a temperatura final constante por 60 minutos. Paralelamente, foram caracterizadas tanto a biomassa *in natura* quanto o biochar obtido, por meio da determinação de parâmetros como teor de umidade, teor de cinzas, teor de voláteis, carbono fixo, composição elementar e poder calorífico. Essas análises são fundamentais para compreender as propriedades físico-químicas do material e, portanto, avaliar seu potencial energético.

Material e métodos

A parte experimental foi conduzida no Laboratório de Combustíveis e Energia (POLICOM) da Escola Politécnica de Pernambuco, vinculado à Universidade de Pernambuco (UPE). Todos os ensaios foram realizados em triplicata, de modo a garantir a confiabilidade estatística dos resultados. A cana-de-açúcar utilizada foi coletada no campus da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), na Cidade Universitária. O material de interesse consistiu exclusivamente no BCA, previamente separado do restante da biomassa, mantido *in natura* e posteriormente moído em micro moinho de facas. Todas as amostras analisadas, tanto antes quanto após a pirólise, foram obtidas a partir desse material, incluindo aquelas destinadas à determinação das propriedades físico-químicas avaliadas neste estudo.

Teor de umidade

O teor de umidade nas amostras (U , em %) foi determinado seguindo a norma ABNT NBR 14.929/2017 (ABNT, 2017a). Os cadinhos foram previamente lavados, secados em estufa, resfriados em dessecador e pesados (m_1). Em cada cadinho foi colocado 1 g de biomassa ($\pm 1\%$) e a massa final do cadinho mais a amostra foi pesada (m_2). Os recipientes foram levados à estufa para secagem mantendo a temperatura em 105 ± 2 °C. O peso das amostras foi acompanhado a cada 2 horas durante o processo, até que a variação na massa fosse de no máximo 0,5%. A fim de se obter um resfriamento apropriado, as amostras ficaram em um dessecador a base de sílica ativada depois de cada secagem, durante 40 minutos.

$$U = \left(\frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

em que m_1 é a massa do cadinho seco (g); m_2 é a massa do cadinho com a amostra antes da secagem (g); e m_3 é a massa do cadinho com a amostra após a secagem (g).

Teor de voláteis

O teor de materiais voláteis (MV , em %) foi determinado pela norma ABNT NBR 16.587/2017 (ABNT, 2017c). Os cadinhos junto com as tampas foram esterilizados e mantidos em dessecador até o momento da análise. Aproximadamente 1 g de biomassa (m_a) foi colocada em cada um de três cadinhos (testes em triplicata), preparados conforme a ABNT NBR 16.507, e o peso inicial dos cadinhos fechados com as amostras foi registrado (m_1).

Estas amostras foram incineradas em forno-mufla à temperatura de 950 ± 20 °C durante 7 minutos, distribuídos em 2 minutos na entrada do forno e os restantes 5 minutos no interior do forno, com a porta fechada. A tolerância de variação da temperatura do forno foi de ± 5 °C. Após retirados do forno-mufla, os cadinhos foram colocados em dessecador até atingir a temperatura ambiente e finalmente foram pesados (m_2). As frações de matéria volátil foram calculadas através das Equações 2 e 3.

$$MV_{bu} = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_a} \right) \cdot 100 - U_H \quad (\text{Eq. 2})$$

$$MV_{bs} = \left(\frac{MV_{bu}}{100 - U_H} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

em que MV_{bu} é o teor de matérias voláteis em base úmida (%); MV_{bs} é o teor de matérias voláteis em base seca (%); m_a é a massa de biomassa seca (g); m_1 é a massa do cadinho com a amostra tampado (g); m_2 é a massa do cadinho com a amostra tampado após a calcinação (g); U_H é a porcentagem da umidade de análise, conforme ABNT NBR 16.508.

Teor de cinzas

Ensaio realizado de acordo com a norma ABNT NBR 16.586/2017 (ABNT, 2017b). Após a pesagem dos cadinhos (m_1), as amostras ($m_a \approx 1$ g) foram colocadas neles e levados ao forno mufla à 775 ± 25 °C durante 2 horas, onde considera-se que toda a matéria orgânica foi queimada. Após retiradas do forno, esperou-se o esfriamento das amostras até 105 ± 2 °C e foram colocadas em dessecador com sílica ativada até chegar à

temperatura ambiente. Para encontrar o teor de cinzas foram utilizadas as Equações 4 e 5.

$$CZ_{bu} = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_a} \right) \cdot 100 - U_H \quad (\text{Eq. 4})$$

$$CZ_{bs} = \left(\frac{MV_{bu}}{100 - U_H} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

em que CZ_{bu} é o teor de cinzas em base úmida (%); CZ_{bs} é o teor de cinzas em base seca (%); m_a é a massa de biomassa seca (g); m_1 é a massa do cadinho (g); m_2 é a massa final do cadinho com a biomassa queimada (g); U_H é a porcentagem da umidade de análise, conforme ABNT NBR 16.508.

Carbono fixo

O teor de carbono fixo (CF , em %) foi determinado pela norma ABNT NBR 16.702/2018, baseada no somatório dos teores de cinzas (Equação 5) e matérias voláteis (Equação 3) em base seca (ABNT, 2018).

$$CF = 100 - (CZ_{bs} + MV_{bs}) \quad (\text{Eq. 6})$$

Análise imediata

Os teores de matéria volátil (MV), cinzas (CZ) e de carbono fixo (CF) da biomassa *in natura* foram determinados de acordo com a norma ABNT NBR 8.112/1986 (ABNT, 1986), utilizando uma balança termogravimétrica Shimadzu, modelo DTG-60. Para estimar a material volátil e o carbono fixo, as amostras foram aquecidas até 900 °C com uma taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹. Para criar uma atmosfera não reativa no forno, foi imposta uma corrente de arraste de nitrogênio durante o aquecimento. Alcançando os 900 °C, injetou-se oxigênio no forno para queimar o carbono fixo da amostra e o oxigênio remanescente, gerando apenas dióxido de carbono e cinzas na composição final. Os resultados são apresentados nos gráficos do equipamento na forma de curvas termogravimétricas e diferencial-termogravimétrica.

Composição química elementar

Os teores de C, H, N e O (composição elementar) foram determinados conforme as normas ASTM D5373/2008 (ASTM, 2008) e ASTM D4208/2007 (ASTM, 2007), realizando os ensaios em um equipamento Vario Macro, modelo CHNOS-CI. As amostras foram trituradas, peneiradas e posteriormente prensadas em cápsulas de folha de estanho padrão. A leitura do equipamento foi verificada com uma amostra branco: cápsula contendo apenas sulfanilamida. A medição foi realizada com três cápsulas vazias, três

padrões contendo sulfanilamida e três de biomassa *in natura*. Para cada caso foram consideradas três amostras (ensaio em triplicada).

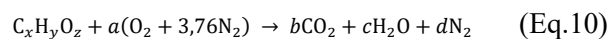
Os teores de C, H e O (em %) para as amostras de BCA, podem ser estimados também a partir da composição imediata, utilizando as Equações 7, 8 e 9 resultantes de análises de regressão e correlação com dados experimentais de 250 biomassas. Estas equações têm sido aplicadas com erros absolutos de 3,21%, 4,79% e 3,4% para carbono, hidrogênio e oxigênio, respectivamente, sendo utilizadas no presente estudo como estimativas adequadas para comparação (Parikh et al., 2005):

$$C = 0,637CF + 0,455MV \quad (\text{Eq.7})$$

$$H = 0,052CF + 0,062MV \quad (\text{Eq. 8})$$

$$O = 0,304CF + 0,476MV \quad (\text{Eq. 9})$$

O equipamento determina os teores de nitrogênio, enxofre e cloro por diferença, obtendo-se a composição química elementar e, por tanto, a fórmula molecular simplificada da biomassa ($C_xH_yO_z$). Com esta composição é possível calcular a quantidade estequiométrica mínima de ar (a) que fornece o oxigênio necessário para a combustão completa de todo C e H presentes no material, a partir da Equação 10 (Geraldo, 2013; Moran et al., 2005); e depois calcular a razão ar-combustível estequiométrica (AC_e) para a combustão completa usando a Equação 11.



$$AC_e = \frac{\text{mol de ar}}{\text{mol de combustível}} \quad (\text{Eq. 11})$$

em que a , b , c e d são os números de mol de oxigênio, dióxido de carbono, água e nitrogênio, respectivamente.

Poder calorífico

Foi utilizado um Calorímetro Digital Automático IKA- WERKE, modelo C2000A, para determinar o poder calorífico do biochar, sob a norma ABNT NBR 8.633/1984 (ABNT, 1984), com o auxílio de bomba adiabática de oxigênio, vaso de decomposição, e unidade de armazenamento de água destilada. O ensaio consistiu na combustão controlada de aproximadamente 300 mg de amostra seca peletizada, em cadinho dentro de cápsula metálica de combustão.

A bomba adiabática foi preenchida com água destilada à temperatura constante e padronizada de 19 °C, e o oxigênio puro foi injetado no interior do vaso de decomposição a uma pressão de 30 bar.

Uma vez iniciada a combustão, o calor é transferido para a água e o equipamento registra a temperatura final durante o processo, o que permite calcular o poder calorífico superior (PCS) de acordo com a Equação 12, usada internamente pelo equipamento. Após o ensaio calorimétrico, a água presente no vaso de decomposição é utilizada para determinar o poder calorífico inferior (PCI).

$$PCS = \frac{m_{H_2O} c_p \Delta T}{m_a} \quad (\text{Eq. 12})$$

em que m_{H_2O} é a massa de água utilizada pelo equipamento (g); m_a é a massa inicial da amostra (g); c_p é a capacidade calorífica da água a pressão constante ($J \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); $\Delta T = T_f - T_i$ é a variação de temperatura final menos inicial (em $^\circ\text{C}$).

Pirólise e obtenção de biochar

Para obter o biochar do BCA foi utilizado um forno mufla marca QUIMIS, modelo G318M24. Um cadinho de porcelana foi completamente cheio de biomassa (em média 5g), tampado e colocado dentro da mufla. Foram realizadas cinco pirólises, a temperaturas finais de 200 $^\circ\text{C}$, 300 $^\circ\text{C}$, 400 $^\circ\text{C}$, 500 $^\circ\text{C}$ e 600 $^\circ\text{C}$, sempre a uma taxa de aquecimento de 10 $^\circ\text{C}$ por minuto. Uma vez atingida a temperatura máxima em cada caso, a isoterma foi mantida durante 60 minutos e depois o equipamento foi desligado para esfriamento natural

até 100 $^\circ\text{C}$, quando as amostras de biochars foram retiradas e pesadas. Cada ensaio foi feito em triplicata para estimar o rendimento gravimétrico médio (RG, em %) conforme a Equação 13.

$$RG = \frac{m_f}{m_i} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 13})$$

em que m_i e m_f são as massas de BCA *in natura*

colocada no cadinho e a massa de biochar obtida após a pirólise (g).

Resultados e discussão

Bagaço de cana-de-açúcar

Parâmetros da análise imediata

A Tabela 1 exhibe os teores de umidade (U) e cinzas (CZ) de diferentes biomassas em base seca, extraídos da literatura, e do BCA utilizado como biomassa neste trabalho. A comparação permite avaliar a influência destes parâmetros na conversão termoquímica durante o processo de pirólise e fazer correlações com a qualidade final do biochar produzido.

Tabela 1. Teor de umidade (U) e teor de cinzas (CZ) em base seca de diferentes biomassas.

Biomassa	U (w%)	CZ (w%)	Referência
Bagaço de cana	6,82 ± 0,33	6,20 ± 0,07	Autor
Sabugo	9,13 ± 0,55	1,63 ± 0,01	(Vieira Júnior, 2019)
Amêndoa da manga	36,38 ± 0,01	3,10 ± 0,00	(Cavalcanti, 2017)
Eucalipto	8,51 ± 0,03	3,14 ± 0,06	(Santos, 2019)
Avelós	7,64 ± 0,12	3,11 ± 0,06	(Santos, 2019)

Observa-se que o BCA tem U inferior a 7%, sendo significativamente menor em comparação às biomassas de sabugo, amêndoa de manga, eucalipto e avelós. Esse baixo U é um fator determinante para a sua viabilidade em processos de conversão termoquímica, uma vez que reduz a necessidade de etapas prévias de secagem e melhora a eficiência energética do processo (Vieira Júnior, 2019). O CZ do BCA é estatisticamente superior ao das biomassas de sabugo, eucalipto, amêndoa de manga e avelós, entre outras reportadas na literatura. Esse resultado pode estar associado à maior concentração de sais minerais

presentes na biomassa do BCA, as quais influenciam diretamente na quantidade de resíduos inorgânicos gerados durante os processos de conversão termoquímica (Santos, 2019).

A Tabela 2 apresenta a análise imediata do BCA *in natura* obtida neste trabalho e a de outras biomassas obtidas da literatura, a fim de comparação. A divergência observada no teor de cinzas (CZ) em relação ao valor estabelecido pela norma ABNT NBR 16.586/2017 pode ser atribuída à injeção de oxigênio durante o processo de pirólise.

Tabela 2. Carbono fixo (*CF*), teor de matéria volátil (*MV*) e teor de cinzas (*CZ*) de diferentes biomassas em base seca, determinados a partir da composição química imediata.

Biomassa	CF (w%)	MV (w%)	CZ (w%)	Referência
Bagaço de cana	9,01 ± 1,08	85,42 ± 0,50	9,33 ± 0,08	Autor
Casca de coco	2,26 ± 0,30	94,15 ± 0,40	5,39 ± 0,42	(Santos et al., 2021)
Eucalipto	2,06 ± 0,16	96,36 ± 0,14	1,57 ± 0,25	(Santos, 2019)
Avelós	1,09 ± 0,39	96,45 ± 0,48	2,46 ± 0,06	(Santos, 2019)
Bambu	4,08 ± 0,60	92,74 ± 0,60	2,97 ± 0,81	(Lacerda Filho, 2015)
Amêndoa da manga	0,82 ± 0,22	97,18 ± 0,25	2,00 ± 0,12	(Cavalcanti, 2017)

O percentual de carbono fixo (*CF*) em uma amostra de biomassa está diretamente relacionado à quantidade de calor gerado, sendo que valores mais elevados indicam uma queima mais lenta do combustível (Sturion et al., 1988). Por outro lado, a fração da biomassa volatilizada durante o aquecimento, composta por gases e vapores orgânicos condensáveis, corresponde aos materiais voláteis (*MV*) determinados na análise imediata (Froehlich & Moura, 2014; Rendeiro et al., 2008). Com o aumento da temperatura de carbonização, há uma intensificação da liberação de gases, resultando em um menor teor de voláteis e um maior percentual de carbono fixo (Pinheiro & Sèye, 1998).

No presente estudo, o BCA apresentou o menor *MV* (85,42% ± 0,50%) em comparação com as demais biomassas analisadas e, conseqüentemente, o maior percentual de *CF* (9,01% ± 1,08%). Esse comportamento também foi identificado por Marques et al. (2021), que

observaram tendência semelhante ao utilizar palha de cana-de-açúcar para a produção de biocarvão em temperaturas de pirólise variando entre 200 °C e 350 °C.

Composição química elementar

Os teores de hidrogênio (*H*) e enxofre (*S*) na biomassa do BCA, determinados neste trabalho, estão na mesma ordem de grandeza de outras biomassas, sem diferenças estatisticamente significativas entre si, conforme mostra a Tabela 3. A partir da metodologia proposta por (Parikh et al., 2005), os teores elementares (porcentagem em massa) de carbono (*C*), hidrogênio (*H*) e oxigênio (*O*) foram determinados em 45,96%, 5,68% e 42,12%, respectivamente. Esses valores são fundamentais para a caracterização das biomassas e influenciam diretamente no seu potencial energético e comportamento em processos termoquímicos.

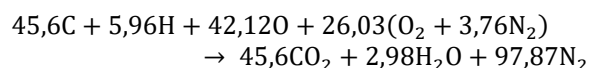
Tabela 3. Composição elementar em base seca de diferentes biomassas: carbono (*C*), hidrogênio (*H*), nitrogênio (*N*), enxofre (*S*) e oxigênio (*O*). Valores em % mássico.

Biomassa	C	H	N	S	O
Bagaço de cana	38,91 ± 0,72	4,55 ± 0,11	3,51 ± 0,11	0,43 ± 0,05	59,51 ± 0,85
Amêndoa de manga ^a	50,93 ± 2,21	6,47 ± 0,16	0,61 ± 0,04	1,09 ± 0,15	40,88 ± 2,31
Eucalipto ^b	33,02 ± 0,45	5,90 ± 0,06	0,09 ± 0,01	0,61 ± 0,02	60,39 ± 0,52
Avelós ^b	34,78 ± 0,67	6,25 ± 0,03	0,1 ± 0,01	0,77 ± 0,13	58,11 ± 1,77
Casca de coco ^c	44,93 ± 0,22	7,05 ± 0,05	0,09 ± 0,01	1,35 ± 0,03	22,84 ± 0,48
Bambu ^d	44,97 ± 0,36	6,12 ± 0,06	0,76 ± 0,03	0,32 ± 0,06	47,84 ± 0,43

Fonte: ^a(Cavalcanti, 2017); ^b(Santos, 2019); ^c(Santos et al., 2021); ^d(Lacerda Filho, 2015).

Com base na composição obtida por meio da análise elementar, foi possível propor uma fórmula molecular simplificada para a biomassa do BCA, substituindo os parâmetros *x*, *y*, *z* da Equação 10 com os respectivos teores de *C*, *H* e *O* informados na Tabela 3, explicitamente, C_{45,6}H_{5,96}O_{42,12}. Com esta fórmula molecular simplificada, os coeficientes estequiométricos da Equação 10 foram ajustados para satisfazer a combustão completa e o consumo de 100% do ar disponível. Os melhores parâmetros foram *a* = 26,03 kmol, *b* = 45,6 kmol,

c = 2,98 kmol, e *d* = 97,87 kmol, de ar, CO₂, H₂O e N₂, respectivamente. Então:



A razão ar-combustível para o BCA baseada nessa estequiometria foi calculada conforme a Equação 11, utilizando a soma dos componentes fundamentais da biomassa (*x*, *y*, *z*) dados pela fórmula molecular simplificada (93,68 kmol =

1227,08 kg) e a quantidade de ar necessária na reação (123,90 kmol = 3573,4 kg). A fração obtida foi $AC_e = 1,32$ kmol de ar por kmol de BCA (ou 2,26 m³ de ar por kg de BCA, como é reportado comumente na escala industrial). Esse parâmetro é essencial para a avaliação da eficiência da combustão, influenciando diretamente a conversão energética e a formação de produtos da queima.

Em um estudo de caso, realizado em uma caldeira no interior de Minas Gerais, modelo Meppan MDS/GF de 1985, com capacidade de vapor de 15,7 toneladas por hora a 17,6 bar, a queima de BCA resultou em um biocarvão contendo 48,5% de carbono, 7,0% de hidrogênio, 0,5% de nitrogênio e 44,0% de oxigênio, respectivamente (Silva et al., 2018). A relação ar-combustível calculada por Silva et al. (2018) foi de 4,701 m³ por kg de biomassa. Esta proporção é

duas vezes maior do que a calculada neste trabalho, devido a caldeira queimava o BCA com um excesso de 22% de ar.

Poder calorífico

A Tabela 4 apresenta os valores do poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI) determinados para a biomassa do BCA e outras reportadas na literatura. O PCS representa a quantidade total de energia liberada na combustão da biomassa, considerando a energia na forma de calor e a energia gasta na vaporização da água resultante da combustão. O PCI é quantidade de energia liberada apenas em forma de calor durante a combustão da biomassa. Dessa forma, quanto maior a energia liberada, maiores são os valores de PCS e PCI, o que resulta em um processo mais eficiente.

Tabela 4. Poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) do BCA e outras biomassas.

Biomassa	PCS (MJ kg ⁻¹)	PCI (MJ kg ⁻¹)	Referência
Bagaço de cana	16,90 ± 0,02	16,70 ± 0,03	Autor
Sabugo	17,68 ± 0,09	17,68 ± 0,09	(Vieira Júnior et al., 2021)
Amêndoa da manga	18,15 ± 0,05	17,95 ± 0,06	(Cavalcanti, 2017)
Eucalipto	16,47 ± 0,07	16,27 ± 0,12	(Santos, 2019)
Avelós	18,24 ± 0,13	17,84 ± 0,16	(Santos, 2019)
Casca de coco	17,26 ± 0,09	17,12 ± 0,11	(Santos et al., 2021)
Bambu	17,52 ± 0,24	17,29 ± 0,23	(Lacerda Filho, 2015)

Os valores obtidos para o BCA não são estatisticamente diferentes aos das outras biomassas. Conforme os dados apresentados na Tabelas 4, observa-se que o BCA tem valores ligeiramente menores de PCS (16,90 ± 0,02 MJ kg⁻¹) e PCI (16,70 ± 0,03 MJ kg⁻¹), salvo para Eucalipto, que apresenta o menor poder calórico segundo ambos os índices. No entanto, ressalta-se que os valores de PCS e PCI obtidos são compatíveis com aqueles comumente utilizados em processos de gaseificação (Santos et al., 2021). Especificamente, o PCI do BCA é similar ao da casca de arroz (15,89 MJ/kg), biomassa amplamente empregada como fonte energética no estado do Rio Grande do Sul (García et al., 2014).

Biochar

A Figura 1 mostra o rendimento gravimétrico (RG) da pirólise do BCA a temperaturas entre 200 °C e 600 °C. Observa-se que há uma diminuição do RG com a elevação de temperatura, com uma queda mais acentuada de 200 °C para 300 °C, e atenuada até os 600 °C. Isto é devido à perda gradativa de substâncias químicas quando o material é aquecido (Róz et al., 2015). Esta

tendência foi observada também na pirólise da palha de cana-de-açúcar às temperaturas de 200 °C, 300 °C e 400 °C, onde foram obtidos RGs de 55,16%, 30,40% e 25,12%, respectivamente, para um tempo de residência de 3 horas (Pires et al., 2018); e tal diminuição foi ainda mais acentuada para um tempo de residência de 2 horas, com a mesma biomassa (palha de cana-de-açúcar) no intervalo de 200 °C a 350 °C (Marques et al., 2022).

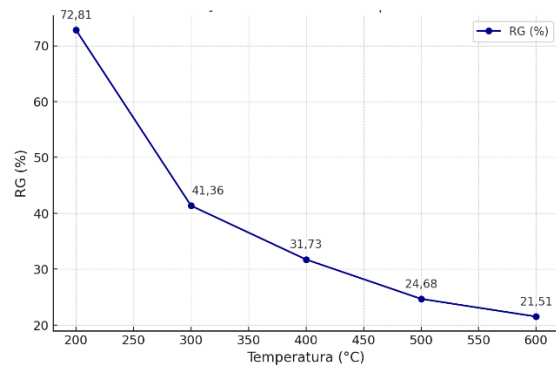


Figura 1: Rendimento gravimétrico (RG, % em massa) da pirólise do bagaço de cana-de-açúcar a diferentes temperaturas, para produção de biochar.

O biochar foi obtido em maior quantidade a 600 °C, apresentando um teor de cinzas (CZ) de 37,19% (Figura 2). Observou-se um aumento progressivo no CZ com a elevação da temperatura de pirólise, uma vez que esse parâmetro está diretamente relacionado à fração de material inorgânico presente na biomassa (Pires et al., 2018), a qual permanece constante no BCA. Esse incremento percentual em CZ ocorre devido à redução do RG com o aumento da temperatura, uma vez que a fração de matéria volátil (MV) da biomassa é gradualmente eliminada durante a pirólise (Figura 3). Esse comportamento é o mais comum quando se trata de pirólise de biomassas de origem vegetal (Jeong et al., 2016; Katyal et al., 2006; Marques et al., 2022). Em particular, o mesmo efeito foi observado para biocarvões obtidos a partir da palha de cana-de-açúcar, e também do bagaço, com um tempo de residência de 1 hora (Piccolla, 2013). Nesse caso, os CZs chegaram a 15,7%, 23,25% e 33,8% nas pirólises realizadas às temperaturas de 250 °C, 450 °C e 650 °C, respectivamente. Ou seja, o aumento do CZ com a elevação da temperatura da pirólise neste trabalho, mantendo o tempo de residência de 1 hora, foi superior.

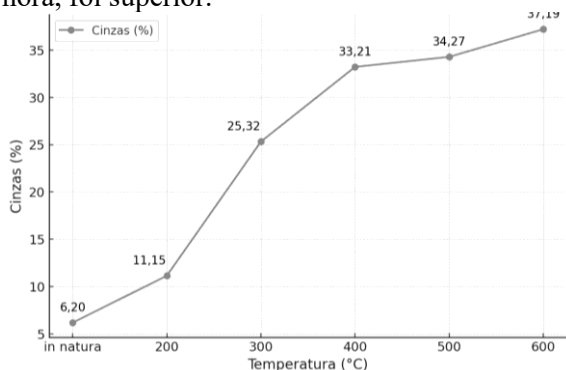


Figura 1: Teor de cinzas para o biochar a 200, 300, 400, 500 e 600 °C (m.m⁻¹)

O BCA *in natura* apresentou 77,34% de MV (Figura 3). Para o biochar produzido a 200 °C, esse valor foi de 59,93%, reduzindo progressivamente até atingir 14,51% a 600 °C. Essa diminuição está diretamente relacionada ao aumento da temperatura de pirólise, que intensifica a liberação de gases e, por conseguinte, reduz a fração MV da biomassa, conforme observado. É de destacar que os resultados obtidos no presente estudo são superiores aos relatados por (Pires et al., 2018), sendo que sob um tempo de residência de 3 horas, esses autores registraram MV de 49,05% para o biochar pirolisado a 200 °C, que é 10 unidades percentuais inferior ao observado neste trabalho.

Para temperaturas de 300 °C e 400 °C, os autores reportaram MV de 25,10% e 17,19%, respectivamente, também inferiores aos apresentados aqui. A redução expressiva de MV com o aumento da temperatura de pirólise é um comportamento geral na produção de biochar e reforça a veracidade dos resultados e das técnicas utilizadas neste trabalho (Piccolla, 2013).

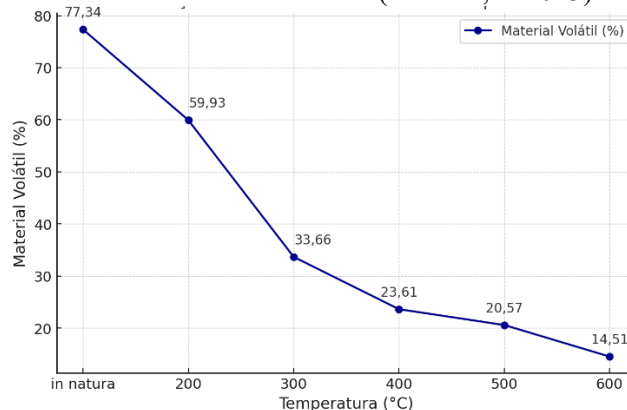


Figura 2: Teor de voláteis para o biochar a 200, 300, 400, 500 e 600 °C (m.m⁻¹)

O BCA *in natura* apresentou 16,47% de CF. Conforme ilustrado na Figura 4, observa-se que, à medida que a temperatura de pirólise aumenta, há uma maior concentração de carbono fixo no biochar. Esse comportamento ocorre devido à degradação térmica dos compostos voláteis, resultando em uma maior retenção de carbono na estrutura sólida do material. Dessa forma, o CF se apresenta diretamente proporcional à elevação da temperatura de pirólise, conforme relatos na literatura (Maia, 2017; Marques et al., 2022; Pires et al., 2018). O impacto da temperatura na composição do biochar e sua aplicação potencial em processos de conversão energética e sequestro de carbono foi verificado também em biocarvões da mesma origem, observando-se um aumento no CF de 41,98% a 200 °C para 64,77% a 400 °C (Pires et al., 2018).

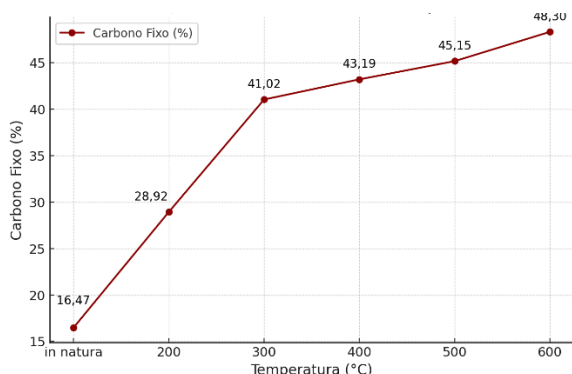


Figura 4. Teor de carbono fixo (CF, % em massa) no bagaço de cana-de-açúcar e o seu biochar obtido a diferentes temperaturas.

A produção otimizada de biochar a partir do BCA deve considerar simultaneamente a maximização do rendimento gravimétrico (RG) e o teor de carbono fixo (CF), sendo indispensável a avaliação conjunta desses parâmetros para definir a condição ideal de pirólise (Pires et al., 2018). A Figura 5 apresenta a variação de RG e CF em função da temperatura, permitindo identificar a faixa de 250 °C a 350 °C como a mais adequada para obter um biochar com elevado rendimento sem comprometer sua qualidade termoquímica. Dentro desse intervalo, a temperatura de 300 °C se destaca como a condição mais favorável, resultando em RG de 41,36%, CZ de 25,32%, voláteis de 33,66% e CF de 41,02%.

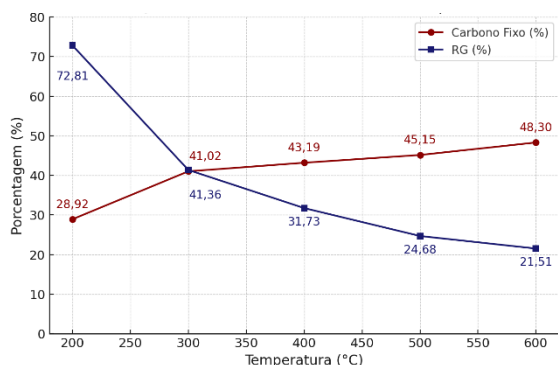


Figura 5. Teor de carbono fixo (CF) e rendimento gravimétrico (RG), em porcento, no biochar de cana-de-açúcar obtido a diferentes temperaturas.

A Figura 6 mostra o poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) determinado pela Equação 12, para todas as amostras analisadas no trabalho. Repara-se que os maiores valores de PCS e PCI correspondem aos biochars obtidos a 300 °C, sendo 17,34 MJ kg⁻¹ e 17,12 MJ kg⁻¹, respectivamente. Ambos os parâmetros mostram um leve aumento com a temperatura em comparação à biomassa *in natura*, até 300 °C, e depois parecia-se um

decréscimo até 600 °C. Uma tendência similar foi observada para a pirólise de borra de café a diferentes temperaturas, com um máximo de poder calorífico no biochar obtido a 300 °C, sendo de 29,01 MJ kg⁻¹ e 28,78 MJ kg⁻¹, superior e inferior, respectivamente (Santos et al., 2020).

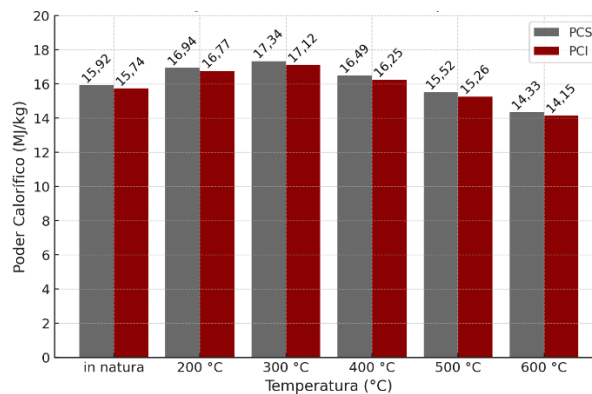


Figura 6. Poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI), em MJ kg⁻¹, do bagaço de cana-de-açúcar *in natura* e o seu biochar obtido a diferentes temperaturas.

Conclusões

O estudo avaliou a produção e a caracterização termoquímica do biochar obtido do bagaço de cana-de-açúcar (BCA) em diferentes temperaturas de pirólise (200–600 °C), evidenciando seu potencial como combustível sólido e estratégia de valorização de resíduos agrícolas. Os resultados mostraram que o aumento da temperatura reduz o teor de voláteis e eleva o carbono fixo, intensificando a carbonização e aprimorando a estabilidade térmica do material. Entre as condições avaliadas, 300 °C apresentou o melhor equilíbrio entre rendimento, composição e desempenho energético, alcançando PCS de 17,34 MJ kg⁻¹ e 41,02% de carbono fixo.

A caracterização elementar possibilitou estimar uma razão ar-combustível de 2,26 m³ kg⁻¹, reforçando a aplicabilidade do biochar em processos de combustão e gaseificação. Além do desempenho energético, a conversão do BCA em biochar contribui para a mitigação de emissões, para o sequestro de carbono e para a economia circular no setor sucoenergético.

Recomenda-se, como desdobramento, investigar o comportamento do biochar em sistemas térmicos reais, sua reatividade e cinética, além de análises de ciclo de vida e

viabilidade econômica, de modo a consolidar seu uso como vetor energético sustentável e alinhado às políticas de descarbonização do país.

Referências

- Abdelhafez, A. A., & Li, J. (2016). Removal of Pb(II) from aqueous solution by using biochars derived from sugar cane bagasse and orange peel. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 61, 367–375. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.01.005>
- ABNT. (1984). *NBR 8.633: Carvão vegetal – Determinação do poder Calorífico – método de ensaio pela bomba calorimétrica.*
- ABNT. (1986). *NBR 8.112: Carvão vegetal– Análise imediata.*
- ABNT. (2017a). *NBR 14.929: Determinação do teor de umidade de cavacos - Método de secagem em estufa.*
- ABNT. (2017b). *NBR 16.586: Determinação mineral do teor de cinzas.*
- ABNT. (2017c). *NBR 16.587: Carvão mineral – Determinação do teor de materiais voláteis (p. 3). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.*
- ABNT. (2018). *NBR 16702: Coque para fundição – Determinação do teor de carbono fixo.*
- ASTM. (2007). *ASTM D4208: Standard Test Method for Total Chlorine in Coal by the Oxygen Bomb Combustion/ Ion Selective Electrode Method.*
- ASTM. (2008). *ASTM Standard D5373 Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal.*
- Barbosa da Silva, R., Antônio Mantese, M., & Florian, F. (2023). O BAGAÇO DA CANA-DE-AÇUCAR NA GERAÇÃO DE ENERGIA. *RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218*, 4(1), e414526. <https://doi.org/10.47820/recima21.v4i1.4526>
- Cavalcanti, S. J. L. (2017). *Estudo do potencial energético do caroço de manga via gaseificação.* Universidade de Pernambuco.
- Chen, Q., Yang, R., Zhao, B., Li, Y., Wang, S., Wu, H., Zhuo, Y., & Chen, C. (2014). Investigation of heat of biomass pyrolysis and secondary reactions by simultaneous thermogravimetry and differential scanning calorimetry. *Fuel*, 134, 467–476. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.05.092>
- Chieng, S., & Kuan, S. H. (2022). Harnessing bioenergy and high value-added products from rice residues: a review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(8), 3547–3571. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00891-y>
- CONAB. (2024). *Produção de cana-de-açúcar na safra 2023/24 chega a 713,2 milhões de toneladas, a maior da série histórica.*
- de Almeida, S. G. C., Tarelho, L. A. C., Hauschild, T., Costa, M. A. M., & Dussán, K. J. (2022). Biochar production from sugarcane biomass using slow pyrolysis: Characterization of the solid fraction. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109054>
- Ferreira, S. D., Manera, C., Silvestre, W. P., Pauletti, G. F., Altafini, C. R., & Godinho, M. (2019). Use of Biochar Produced from Elephant Grass by Pyrolysis in a Screw Reactor as a Soil Amendment. *Waste and Biomass Valorization*, 10(10), 3089–3100. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0347-1>
- Froehlich, P. L., & Moura, A. (2014). Carvão vegetal: propriedades físico-químicas e principais aplicações. *Revista Tecnologia e Tendências*, 9(1), 13–32.
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2014). Spanish biofuels heating value estimation. Part I: Ultimate analysis data. *Fuel*, 117(PARTB), 1130–1138. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.048>
- Geraldo, B. C. A. (2013). *Gaseificação Da Casca E Da Torta Da Mamona Para Produção De Gás Combustível* [Universidade Federal de Pernambuco]. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/10232>
- Haeldermans, T., Campion, L., Kuppens, T., Vanreppelen, K., Cuypers, A., & Schreurs, S. (2020). A comparative techno-economic assessment of biochar production from different residue streams using conventional and microwave pyrolysis. *Bioresource Technology*, 318(Setembro), 124083. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124083>
- Jeong, C. Y., Dodla, S. K., & Wang, J. J. (2016). Fundamental and molecular composition characteristics of biochars produced from sugarcane and rice crop residues and by-products. *Chemosphere*, 142, 4–13. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.05.084>
- Katyal, S., Thambimuthu, K., & Valix, M. (2006). Carbonisation of bagasse in a fixed bed reactor: influence of process variables on

- char yield and characteristics. *Renewable Energy*, 28(2003), 713–725.
- Kumar, A., Chauhan, A. S., Bains, R., & Das, P. (2021). Rice straw (*Oryza sativa* L.) biomass conversion to furfural, 5-hydroxymethylfurfural, lignin and bio-char: A comprehensive solution. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 104, 286–294. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.08.025>
- Lacerda Filho, C. G. (2015). *Produção de gases combustíveis utilizando o bambu em processos de gaseificação*. Universidade de Pernambuco.
- Lehmann, J. (2007). Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, preprint(2007), 1. <https://doi.org/10.1890/060133>
- Maia, A. A. D. (2017). *A biomassa Capsicum spp. como fonte de bioenergia e adsorção de metais*. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
- Marques, C. A., Silva, D. A. da, Apresentação, M. de J. F. de, Nakashima, G. T., & Yamaji, F. M. (2022). Produção de biochar com palha de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.). *Research, Society and Development*, 11(1), e31211124675. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i1.24675>
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Munson, B. R., & DeWitt, D. P. (2005). *Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos: Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor* (1st ed.). LTC.
- Murtaza, G., Ahmed, Z., Valipour, M., Ali, I., Usman, M., Iqbal, R., Zulfiqar, U., Rizwan, M., Mahmood, S., Ullah, A., Arslan, M., Rehman, M. H. ur, Ditta, A., & Tariq, A. (2024). Recent trends and economic significance of modified/functionalized biochars for remediation of environmental pollutants. In *Scientific Reports* (Vol. 14, Issue 1). Nature Publishing Group UK. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50623-1>
- Nanda, S., Dalai, A. K., Berruti, F., & Kozinski, J. A. (2016). Biochar as an Exceptional Bioresource for Energy, Agronomy, Carbon Sequestration, Activated Carbon and Specialty Materials. *Waste and Biomass Valorization*, 7(2), 201–235. <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9459-z>
- Nosenzo, S. G. (2024). Evaluating Sugarcane Bagasse-Based Biochar as an Economically Viable Catalyst for Agricultural and Environmental Advancement in Brazil through Scenario-Based Economic Modeling. *Journal of Power and Energy Engineering*, 12(11), 97–124. <https://doi.org/10.4236/jpee.2024.1211007>
- Parikh, J., Channiwala, S., & Ghosal, G. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, 84(5), 487–494. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.010>
- Piccola, C. Dela. (2013). *Características químicas de biocarvões produzidos a partir do bagaço de cana-de-açúcar e a disponibilidade de fósforo no solo: Vol. Mestrado*. Universidade de Pernambuco.
- Pinheiro, P. C. C., & Sêye, O. (1998). Influência da temperatura de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de Eucalyptus. *Congresso Anual Da ABM*.
- Pires, I. C. S. A., Nakashima, G. T., Padilla, E. R. D., Santos, L. R. O., Varanda, L. D., Alesi, L. S., & Yamaji, F. M. (2018). Biochar de Palha de Cana-de-Açúcar: Caracterização e Estudo do Processo. *Revista Virtual de Química*, 10(4), 892–899.
- Prasannamedha, G., & Kumar, P. S. (2022). Hydrothermal Carbonization of Waste Sugarcane Bagasse for the Effective Removal of Emerging Contaminants from Aqueous Solution. *Adsorption Science and Technology*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8684737>
- Rendeiro, G., Barreto, E. J. F., Nogueira, M. F. M., Brasil, A. C. de M., Cruz, D. O. de A., Guerra, D. R. da S., Macedo, E. N., & Ichihara, J. de A. (2008). *Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia*.
- Róz, A. L. da, Ricardo, J. F. C., Nakashima, G. T., Santos, L. R. O., & Yamaji, F. M. (2015). Maximização do teor de carbono fixo em biocarvão aplicado ao sequestro de carbono. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(8), 810–814. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n8p810-814>
- Santos, S. T. O., Vieira Júnior, C. M., Silva, A. N. da, Nascimento Júnior, A. F. do, Drummond, A. R. F., & Silva, S. P. R. da. (2020). Potencial energético do biocarvão de pirólise a partir da borra de café. *Brazilian Journal of Development*, 6(7), 48662–48670. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-492>
- Santos, H. da S. (2019). *Produção de gás combustível através do processo da gaseificação de biomassa oriunda de solos*

- contaminados com metais*. Universidade de Pernambuco.
- Santos, P. de F., Góis, T. A., & Silva, S. P. R. da. (2021). Caracterização e geração de combustíveis gasosos utilizando folha de coqueiro da produção do coco (Cocos nucifera). *Research, Society and Development*, 10(7), e34610716783. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16783>
- Silva, L. R. S., Finzer, J. R. D., & Begnini, M. L. (2018). Cálculo da relação ar/combustível em caldeira alimentada com bagaço de cana-de-açúcar. *Blucher Chemical Engineering Proceedings*, 1396–1399. <https://doi.org/10.5151/cobeq2018-PT.0371>
- Sturion, J. A., Pereira, J. C. D., & Chemin, M. (1988). Qualidade da madeira de Eucalyptus viminalis para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte. *Boletim de Pesquisa Floresta*, 16, 55–59.
- Valenga, M. G. P., Gevaerd, A., Marcolino-Junior, L. H., & Bergamini, M. F. (2024). Biochar from sugarcane bagasse: Synthesis, characterization, and application in an electrochemical sensor for copper (II) determination. *Biomass and Bioenergy*, 184(March). <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107206>
- Vieira Júnior, C. M. (2019). *Aproveitamento energético a partir da gaseificação de resíduos do cultivo do milho (Zea mays)*. Universidade de Pernambuco.
- Vieira Júnior, C. M., Santos, H. S., Santos, S. T. O. dos, & Silva, S. P. R. da. (2021). Aproveitamento energético a partir da gaseificação de resíduos do cultivo de milho (Zea mays) após três anos em estoque. *Research, Society and Development*, 10(15), e331101522672. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i15.22672>
- Zafeer, M. K., Menezes, R. A., Venkatachalam, H., & Bhat, K. S. (2024). Sugarcane bagasse-based biochar and its potential applications: a review. In *Emergent Materials* (Vol. 7, Issue 1, pp. 133–161). <https://doi.org/10.1007/s42247-023-00603-y>
- Zimmerman, A. R. (2010). Abiotic and Microbial Oxidation of Laboratory-Produced Black Carbon (Biochar). *Environmental Science & Technology*, 44(4), 1295–1301. <https://doi.org/10.1021/es903140c>