



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

MARCOS LUIZ MELO CHAVES FONTES

**EFEITO DA TEMPERATURA DE PIRÓLISE NAS PROPRIEDADES DO BIOCHAR
DA CASCA DE CASTANHA-DE-AJU E EM SEU POTENCIAL DE SEQUESTRO DE
CARBONO E ADSORÇÃO DE Cd^{2+} E Pb^{2+}**

MOSSORÓ

2025

MARCOS LUIZ MELO CHAVES FONTES

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PIRÓLISE NAS PROPRIEDADES FÍSICO-
QUÍMICAS NO POTENCIAL DE SEQUESTRO DE CARBONO E NA ADSORÇÃO DE
CD²⁺ E PB²⁺ PELO BIOCHAR DA CASCA DA CASTANHA DE CAJU**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em engenharia química

Orientador: Prof. Dra. Poliana Pinheiro da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Frederico Ribeiro do Carmo

MOSSORÓ

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

F682e Fontes, Marcos Luiz Melo Chaves.
 Efeito da temperatura de pirólise nas
 propriedades do biochar da casca de castanha-de-
 caju e em seu potencial de sequestro de carbono e
 adsorção de Cd²⁺ e Pb²⁺ / Marcos Luiz Melo Chaves
 Fontes. - 2025.
 72 f. : il.

 Orientadora: Poliana Pinheiro da Silva.
 Coorientador: Frederico Ribeiro do Carmo.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
 Química, 2025.

 1. Biomassa. 2. Tratamento térmico. 3. Resíduo
 agrícola. 4. Metais pesados. 5. Eficiência de
 remoção. I. Silva, Poliana Pinheiro da, orient.
 II. Carmo, Frederico Ribeiro do, co-orient. III.
 Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

MARCOS LUIZ MELO CHAVES FONTES

**EFEITO DA TEMPERATURA DE PIRÓLISE NAS PROPRIEDADES DO BIOCHAR
DA CASCA DE CASTANHA-DE-CAJU E EM SEU POTENCIAL DE SEQUESTRO DE
CARBONO E ADSORÇÃO DE CD^{2+} E PB^{2+}**

Monografia apresentada à Universidade Federal
Rural do Semi-Árido como requisito para
obtenção do título de Bacharel em engenharia
química

Defendida em: 17/12 /2025.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Poliana Pinheiro da Silva (UFERSA)
Presidente

Prof. Dr. Frederico Ribeiro do Carmo (UFERSA)
Co-orientador

Prof. Dr. Bruno Caio Chaves Fernandes (UFERSA)
Membro Examinador

Dr. Alanderson Arthu Araújo Alves (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Aos meus coorientadores, Frederico Ribeiro e Bruno Caio, agradeço por todas as oportunidades ao longo deste processo. Em uma das aulas de Operações Unitárias II, o professor Frederico ressaltou a importância de definirmos nossos caminhos para o futuro, algo que foi decisivo para que eu direcionasse minhas energias à pesquisa. Já Bruno esteve ao meu lado desde o início, oferecendo suporte constante, disposição para ajudar e dedicação em compartilhar conhecimento ao longo de toda a jornada. Meu sincero agradecimento a ambos.

Ao apoio financeiro do Programa de Capacitação em Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-ANP), sob a gestão da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

A todos os amigos que fiz durante a graduação, sempre vou lembrar dos momentos difíceis em provas, trabalhos e apresentações. Acredito muito que a vida precisa ser mais leve, e todos vocês, até mesmo sem saberem, deixaram minha caminhada muito mais simples e divertida. Obrigado por arrumarem mais uma família para eu guardar no coração, amo todos vocês.

A todos os amigos que fiz durante minha vida, amigos que conheci no Alvorada ou no Ceamo, amigos que conheci durante aleatoriedades da vida, amigos que conheci pelo meu primo, amigos que conheci na academia, todos vocês são essenciais em minha jornada. Obrigado por tudo, vocês são parte da minha família, amo todos vocês.

A uma parte da minha família, de Mossoró e Fortaleza. Sei que não há uma aproximação muito grande da minha família nos últimos anos, mas os poucos que estão perto de mim são incríveis, obrigado por toda ajuda e amor. Amo todos vocês.

As minhas duas irmãs: Maria Cecília e Maria Luiza. Não acho que consigo, mas tento ser um exemplo para vocês, é gratificante chegar em casa e sempre ser acolhido com muito amor por vocês duas. A Maria Luiza, é impossível não me inspirar em toda sua dedicação e preocupação comigo no dia a dia, te amo muito. A Maria Cecília, desde que você chegou na minha vida aprendi novamente o que é o amor, obrigado por tudo, te amo muito.

Aos dois trapalhões Lucas Vinnicius e Paulo Danton, vocês são um dos maiores motivos da minha dificuldade em estudar fora. Se eu valorizo viver a vida de maneira leve, vocês representam totalmente o que eu penso. Obrigado pela força, jamais conseguiria sozinho, amo muito vocês.

Para duas mulheres muito especiais que conheci durante o período da graduação, minha grande amiga Lara Beatriz e minha orientadora/amiga Poliana Pinheiro. Obrigado por toda paciência que as duas tiveram comigo, por me ensinarem tudo que eu sei sobre pesquisa, e sobretudo, por dedicarem-se a tudo isso com amor genuíno. Não sei se minha caminhada seria a mesma coisa sem vocês, obrigado por tudo, amo muito vocês.

Aos meus pais, Sônia Maria e Glidersanchio por todo apoio durante minha vida, independente de qualquer escolha sempre estiveram comigo. Ao meu pai, obrigado por sempre lutar por mim e fornecer todas as melhores condições para estudar, entendo que o senhor faz de tudo por mim, te amo muito. A minha mãe, não caberia em todo o meu tcc tudo que a senhora fez e faz por mim. Obrigado por dar sentido a minha vida, por colorir todos os meus sonhos e muitas vezes me colocar em um patamar que eu duvido estar. Sem a senhora, eu provavelmente teria desistido, minha vida não faria sentido, meus sonhos não seriam mais coloridos, tudo seria apenas cinza. Você é tudo pra mim, prometo que, daqui a poucos anos, estaremos viajando e realizando todos os nossos sonhos. Mais uma vez, obrigado, te amo infinito.

Depois da minha mãe, apenas Deus. O senhor sabe que evito ao máximo demonstrar minha fé em público, como também sabe o quão foi difícil essa caminhada. Somente o senhor para conseguir quantificar as vezes que abri uma oração chorando, reclamando, buscando um sentido para o que estava acontecendo em minha vida. Porém, sempre o senhor sabe o que faz, não sei porque acreditar e sempre mandar diversos anjos na vida de alguém que só deve te dar dor de cabeça, mas fico feliz por todo amor que o senhor tem por mim. Para mim, Deus sempre será sinônimo de amor, então posso afirmar tranquilamente que o senhor está completamente imerso na minha vida, e na vida dos meus pais, amigos/família. Te amo infinito.

RESUMO

A casca da castanha do caju é um resíduo agroindustrial gerado em grandes volumes durante o processamento da castanha, cujo descarte inadequado representa um passivo ambiental. A sua valorização como biochar surge como alternativa sustentável para mitigação de impactos ambientais e aplicação em processos de remediação. Este estudo avaliou o efeito da temperatura de pirólise (300, 500 e 700 °C) nas propriedades físico-químicas e térmicas de biochars derivados da casca da castanha de caju (CCC). As caracterizações incluíram análises elementares e imediatas, razões atômicas H/C e O/C (diagrama de Van Krevelen), propriedades de superfície (pH, PCZ, EC), grupos funcionais (FTIR), morfologia e composição inorgânica (SEM, XRD) e estabilidade térmica (TGA/DTG/DSC). O aumento da temperatura de pirólise elevou o teor de carbono (de 48,3 % para 76,4 %) e reduziu as razões H/C e O/C, indicando maior condensação aromática e recalcitrância estrutural, classificando BC500 e BC700 como biochars de grau premium segundo o padrão EBC. As propriedades de superfície tornaram-se mais alcalinas, acompanhadas da perda de grupos oxigenados, maior desordem estrutural e aprimoramento da resistência térmica. Os testes de adsorção de metais pesados mostraram que o BC500 superou o carvão ativado comercial, com remoções de 58,16 % para Cd^{2+} e 69,44 % para Pb^{2+} , enquanto o BC700 apresentou os melhores desempenhos (76,32 % para Cd^{2+} e 98,61 % para Pb^{2+}). A avaliação do sequestro de carbono, baseada nos modelos de Woolf e Puro.Earth (2025), revelou um aumento significativo na captura estimada de CO_2 equivalente, passando de 0,65 t CO_2 eq t^{-1} a 300 °C para 2,75 t CO_2 eq t^{-1} a 700 °C, com a fração de carbono estável aumentando de 46,7 % para 88,6 %. Esses resultados confirmam que a pirólise em temperaturas elevadas gera uma matriz carbônica altamente aromática e resistente à oxidação, capaz de reter carbono por longos períodos (>100 anos). De forma geral, os biochars derivados de CCC combinam alta capacidade de adsorção com excepcional estabilidade do carbono, posicionando esse abundante resíduo agroindustrial como uma matéria-prima de alto valor para remediação de efluentes e aplicações certificadas de remoção de carbono.

Palavras-chave: Biomassa; Tratamento térmico; Resíduo agrícola; Metais pesados; Eficiência de remoção.

ABSTRACT

Cashew nut shell is an agro-industrial residue generated in large quantities during cashew nut processing, and its improper disposal represents an environmental liability. Its valorization as biochar emerges as a sustainable alternative for mitigating environmental impacts and for application in remediation processes. This study evaluated the effect of pyrolysis temperature (300, 500, and 700 °C) on the physicochemical and thermal properties of biochars derived from cashew nut shell (CCC). Comprehensive characterizations included ultimate and proximate analyses, H/C and O/C atomic ratios (Van Krevelen diagram), surface properties (pH, PCZ, EC), functional groups (FTIR), morphology and inorganic composition (SEM, XRD), and thermal stability (TGA/DTG/DSC). Increasing the pyrolysis temperature enhanced the carbon content (from 48.3 % to 76.4 %) and reduced H/C and O/C ratios, indicating greater aromatic condensation and structural recalcitrance, which classified BC500 and BC700 as premium-grade biochars (EBC standard). Surface properties shifted toward alkaline values, with the loss of oxygenated groups, higher disorder in the carbon structure, and improved thermal resistance. Heavy-metal adsorption tests demonstrated that BC500 outperformed commercial activated carbon, achieving 58.16 % Cd^{2+} and 69.44 % Pb^{2+} removal efficiencies, while BC700 showed the highest values (76.32 % for Cd^{2+} and 98.61 % for Pb^{2+}). The carbon-sequestration assessment, performed using the models of Woolf and Puro.Earth (2025), revealed a marked increase in the estimated CO_2 -equivalent capture from 0.65 t CO_2 eq t^{-1} at 300 °C to 2.75 t CO_2 eq t^{-1} at 700 °C, with the stable-carbon fraction (PF) rising from 46.7 % to 88.6 %. These results confirm that high-temperature pyrolysis produces a highly aromatic and oxidation-resistant carbon matrix capable of long-term carbon retention (>100 years). Overall, CCC derived biochars combine strong adsorption capacity and exceptional carbon stability, positioning this abundant agro-industrial residue as a high-value feedstock for effluent remediation and certified carbon-removal applications.

Keywords: Biomass; Thermal treatment; Agricultural residue; Heavy metals; Removal efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de van krevelen produzidos em diferentes temperaturas de pirólise. BIN = biomassa bruta (in natura), BC300, BC500 e BC700 = biocarvões produzidos a 300, 500 e 700 °C, respectivamente.....	36
Figura 2 - Rendimento (%) e teor de materiais voláteis (%) dos biocarvões produzidos em diferentes temperaturas de pirólise (BC300, BC500 e BC700).....	38
Figura 3 - Valores de pH da biomassa bruta (BIN) e dos biocarvões produzidos em diferentes temperaturas de pirólise (BC300, BC500 e BC700).....	39
Figura 4 - Condutividade elétrica (CE) dos biocarvões de casca da castanha de caju produzidos em diferentes temperaturas de pirólise. BIN = biomassa bruta (in natura); BC300, BC500 e BC700 = biocarvões produzidos a 300, 500 e 700 °C, respectivamente.	40
Figura 5 - Valores de ponto de carga zero (pcz) dos biocarvões de casca da castanha de caju (BIN, BC300, BC500 e BC700) em função do pH da solução.....	41
Figura 6 - Espectros de ftir dos biocarvões de casca da castanha de caju produzidos em diferentes temperaturas de pirólise: biomassa bruta (BIN), BC300 (300 °c), BC500 (500 °c) e BC700 (700 °C).....	43
Figura 7 - Micrografias por sem com mapeamento elemental por EDS e espectros em diferentes estágios de pirólise: (a) biomassa bruta (BIN), (b) biocarvão produzido a 300 °C, (c) biocarvão produzido a 500 °C e (d) biocarvão produzido a 700 °C.....	46
Figura 8 - Difrátogramas de DRX dos biocarvões de casca da castanha de caju produzidos em diferentes temperaturas de pirólise: biomassa bruta (BIN), BC300 (300 °C), BC500 (500 °C) e BC700 (700 °C).	48
Figura 9 - (a) Análise termogravimétrica (TG) e (b) curvas derivadas termogravimétricas (DTG) dos biocarvões de casca da castanha de caju produzidos em diferentes temperaturas de pirólise: biomassa in natura (BIN), BC300 (300 °C), BC500 (500 °C) e BC700 (700 °C).	49
Figura 10 - Curvas de calorimetria exploratória diferencial (DSC) dos biocarvões de casca da castanha de caju produzidos em diferentes temperaturas de pirólise: biomassa in natura (BIN), BC300 (300 °C), BC500 (500 °C) e BC700 (700 °C).....	51
Figura 11 - Desempenho de adsorção de (a) Cd^{2+} e (b) Pb^{2+} por biocarvões de casca da castanha de caju (BC300, BC500 e BC700) e carvão ativado (CA).	53

Figura 12 - Potencial estimado de sequestro de CO₂ (kg co₂-eq por tonelada de biocarvão) para a biomassa in natura de casca da castanha de caju (BIN), BC300, BC500 e BC700..... 55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo de estudos que produziram biochar da CCC.....	28
Tabela 2 - Composição elementar e razões atômicas dos biochars de casca da castanha de caju obtidos em diferentes temperaturas de pirólise. BIN = biomassa bruta (in natura); BC300, BC500, BC700 = biochars produzidos a 300, 500 e 700 °C, respectivamente.	35
Tabela 3 - Composição imediata e rendimento dos biocarvões de casca da castanha de caju produzidos em diferentes temperaturas de pirólise. BIN = biomassa bruta (in natura), BC300, BC500 e BC700 = biocarvões produzidos a 300, 500 e 700 °C, respectivamente.	37
Tabela 4 - Atribuição das bandas de FTIR dos biocarvões de casca da castanha de caju. A tabela apresenta as faixas características de número de onda (cm^{-1}) e seus respectivos modos vibracionais, indicando os grupos funcionais presentes.	43
Tabela 5 - Parâmetros estimados de estabilidade e sequestro de carbono para biocarvões de casca da castanha de caju produzidos em diferentes temperaturas de pirólise.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCC	Casca da castanha de caju
RN	Rio Grande do Norte
GEE	Gases de efeito estufa
LCC	Líquido da casca da castanha de caju
CE	Condutividade elétrica
pH _{pcz}	Ponto de carga zero
FTIR	Transformada de Fourier
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
EDS	Espectroscopia de raios X por dispersão de energia
DRX	Difração de raios X
TGA	Análise termogravimétrica
DTG	Derivada termogravimétrica
DSC	Calorimetria diferencial de varredura
CHN	Análise elementar
CO ₂	Dióxido de carbono
BIN	Biomassa natural da casca da castanha de caju
BC300	Biochar sintetizado na temperatura de 300 °C
BC500	Biochar sintetizado na temperatura de 500 °C
BC700	Biochar sintetizado na temperatura de 700 °C
MV	Teor de material volátil
CZ	Teor de cinzas
CF	Teor de Carbono fixo
C	Teor de carbono
H	Teor de hidrogênio
N	Teor de nitrogênio
S	Teor de enxofre
Pb ²⁺	Íons chumbo
Cd ²⁺	Íons cádmio
FAAS	Espectrometria de absorção atômica

R	Eficiência de remoção
C _i	Concentração final
C _f	Concentração inicial
Na	Teor de sódio
K	Teor de potássio
Si	Teor de silício
CA	Carvão ativado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	17
2.1 Gerais	17
2.2 Específicos	17
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1 Geração de resíduo agrícola no Brasil	18
3.2 Geração de resíduo agrícola no Nordeste	20
3.2.1 Geração de Resíduos Agrícolas no Rio Grande do Norte.....	20
3.3 Rotas integradas para transformação de resíduos agrícolas.....	21
3.3.1 Pirólise	22
3.3.2 Biochar	23
3.3.2.1 Caracterização.....	24
3.3.3 Aplicações.....	25
3.3.3.1 Sequestro de carbono	26
3.3.3.2 Bioadsorvente	27
3.3.3.2.1 Bioadsorvente de CCC.....	28
4 METODOLOGIA	30
4.1 Preparação do biochar	30
4.2 Caracterização do biochar.....	30
4.2.1 Análise aproximada	30
4.2.2 Composição elementar.....	31
4.2.3 Características físico-químicas	31
4.2.4 Caracterização estrutural.....	32
4.3. Aplicações potenciais.....	32
4.3.1. Avaliação do biochar como bioadsorvente	32
4.3.2. Estabilidade do biochar e potencial de sequestro	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
5.1 Análise elementar, análise imediata e rendimento sólido do biochar	35
5.2 Propriedades físico-químicas de superfície	39
5.3 Caracterização dos grupos funcionais de superfície	42
5.4 Análise morfológica e da composição inorgânica	44
5.5 Análises TGA/DTG/DSC da biomassa bruta e dos biocarvões.....	48
5.6 Desempenho de adsorção e potencial de sequestro de carbono.....	52

5.7 Potencial de sequestro de carbono dos biocarvões de casca da castanha de caju	54
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
7 REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a crescente preocupação com as mudanças climáticas e com a gestão sustentável de resíduos tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias capazes de atuar tanto na mitigação das emissões de gases de efeito estufa quanto na remediação ambiental. Paralelamente, o descarte inadequado de resíduos agroindustriais permanece como um desafio relevante no Brasil, especialmente na região Nordeste, onde a cadeia produtiva do caju desempenha papel socioeconômico fundamental (Lomonaco; Mele; Mazzetto, 2017).

Em 2020, a área mundial colhida de castanha de caju foi de 7,1 milhões de hectares, os países que lideraram a produção foi a Costa do Marfim (28,6%), Índia (15,7%) e Tanzânia (11,5%). As áreas colhidas do Brasil (a sexta maior área) contribuem com 6% do total mundial, com 426,1 mil hectares plantados com cajueiro, sendo o Nordeste a região que concentra a maior parte da produção nacional, responsável por 99,7% das áreas colhidas (Carneiro, 2019). A casca da castanha de caju é um subproduto rico em fenóis insaturados de cadeia longa. Entretanto, seu aproveitamento para consumo humano é limitado e não contribui de forma significativa para reduzir o descarte inadequado dessa biomassa (Yuliana *et al.*, 2014). Assim, torna-se essencial o desenvolvimento de alternativas para o aproveitamento da casca da castanha de caju (CCC), visando reduzir os impactos do descarte incorreto e promover a agregação de valor a esses resíduos.

Diante desse cenário, a conversão termoquímica da CCC para produção de biochar surge como alternativa promissora para agregar valor ao resíduo, reduzir passivos ambientais e apoiar estratégias de sequestro de carbono. O biochar é um material carbonáceo obtido por pirólise em condições anóxicas ou com baixa disponibilidade de oxigênio (Chia *et al.*, 2014; Su *et al.*, 2023; Yu *et al.*, 2017). Suas propriedades físico-químicas conferem ampla aplicabilidade, incluindo uso como adsorvente, condicionador de solos, suporte catalítico e agente de estocagem de carbono (Varkolu *et al.*, 2025). No que se refere às duas últimas aplicações, diversas pesquisas buscam otimizar a tecnologia do biochar, avaliando diferentes matérias-primas e propriedades físico-químicas capazes de potencializar tanto o tratamento de águas residuais contendo impurezas orgânicas e inorgânicas quanto o sequestro de carbono no solo (Ahmad *et al.*, 2012; Galinato; Yoder; Granatstein, 2011; Li; Tasnady, 2023a; Smith, 2016; Song *et al.*, 2023; Tomczyk; Sokołowska; Boguta, 2020a).

O desempenho do biochar nessas aplicações é fortemente influenciado pelas condições de pirólise, especialmente a temperatura, que afeta sua estrutura aromática, porosidade, composição elementar e grupos funcionais superficiais. Pesquisas demonstram que temperaturas mais elevadas tendem a favorecer tanto o potencial de sequestro de carbono quanto a adsorção de contaminantes, como metais pesados (Rajendran *et al.*, 2024; Zou *et al.*, 2024). A otimização das propriedades físico-químicas do biochar depende diretamente da seleção adequada da biomassa e do controle rigoroso dos parâmetros de pirólise. Variações na matéria-prima e na faixa de temperatura de pirólise influenciam de forma decisiva a qualidade final do biochar e sua aplicabilidade em diferentes contextos (Balmuk *et al.*, 2023; Handiso; Pääkkönen; Wilson, 2024).

A heterogeneidade estrutural faz com que cada tipo de matéria-prima responda de maneira distinta aos processos termoquímicos, o que ressalta a importância de uma caracterização abrangente e criteriosa do produto sólido obtido (Abbas *et al.*, 2018). Tais características são influenciadas pelo tipo de matéria-prima, temperatura de tratamento, tempo de residência, atmosfera de pirólise, entre outros fatores (Zhao *et al.*, 2013). Anand et al. (2023) ressaltam a necessidade de uma caracterização sistemática do biochar, incluindo análises imediatas e elementares, análises morfológicas, identificação de grupos funcionais e análises térmicas (Anand; Gautam; Ram, 2023).

Na região Nordeste, a casca da castanha de caju constitui uma biomassa de alta disponibilidade, gerada em grandes volumes ao longo da cadeia produtiva do caju, especialmente durante as etapas de beneficiamento da castanha. Dessa forma, a escassez de pesquisas voltadas à caracterização e às aplicações do biochar derivado da casca da castanha de caju motivou a realização deste estudo. Até onde sabemos, não há estudos comparativos de diferentes temperaturas de pirólise com a biomassa bruta da CCC, caracterizações detalhadas do material, associadas à avaliação de aplicações potenciais, conferem relevância e originalidade ao presente trabalho.

2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

2.1 Gerais

Avaliar o efeito da temperatura de pirólise nas propriedades físico-químicas e estruturais do biochar obtido a partir da casca da castanha de caju (BIN), bem como determinar seu potencial de sequestro de carbono e sua capacidade de remoção dos íons Pb^{2+} e Cd^{2+} .

2.2 Específicos

- Produzir biochars a partir da BIN por pirólise a 300, 500 e 700 °C
- Realizar a caracterização abrangente dos bioadsorventes estudados, incluindo análises elementar e imediata, avaliação das propriedades físico-químicas, identificação dos grupos funcionais, além de análises morfológicas e térmicas;
- Avaliar a capacidade de adsorção de Pb^{2+} e Cd^{2+} em soluções sintéticas, bem como determinar a eficiência de remoção desses íons metálicos;
- Comparar o desempenho dos biochars com o carvão ativado comercial;
- Estimar o potencial de sequestro de carbono dos biochars e sua estabilidade a longo prazo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A geração de resíduos agrícolas no Brasil tem aumentado de forma significativa nas últimas décadas, impulsionada pela expansão das atividades agroindustriais e pela intensificação da produção agrícola. Esse crescimento resulta em grandes volumes de biomassa residual, cuja gestão adequada é essencial para reduzir impactos ambientais, promover o uso sustentável dos recursos naturais e fortalecer cadeias produtivas regionais. No Nordeste brasileiro, a cajucultura destaca-se como uma das principais atividades agroindustriais, gerando expressiva quantidade de resíduos, entre eles a casca da castanha de caju (CCC), um material lignocelulósico de grande potencial para valorização tecnológica.

Considerando a necessidade de aproveitamento eficiente desses resíduos, diferentes rotas de conversão têm sido estudadas, com destaque para a pirólise, processo termoquímico capaz de transformar biomassa em produtos de maior valor agregado, como o biochar. A compreensão dos parâmetros operacionais da pirólise, bem como das propriedades físicas, químicas e estruturais do biochar, é fundamental para direcionar sua aplicação em remediação ambiental, manejo de carbono e outras finalidades de interesse científico e tecnológico.

3.1 Geração de resíduo agrícola no Brasil

No Brasil, uma das principais destinações dos resíduos ainda é o envio para aterros, que não atendem aos padrões ambientais de qualidade. Sendo assim, a reutilização de resíduos apresenta-se como a melhor opção do ponto de vista econômico e socioambiental (Pires Moreno M. A; Mattiazzo Emilia M, 2008). Conceitualmente, os resíduos agrícolas são subprodutos lignocelulósicos resultantes da atividade agrícola, como restos de culturas, palha, folhas e cascas, gerados durante o cultivo, colheita e processamento das plantas, na qual essas biomassas representam 24% do consumo energético e 8% da energia elétrica gerada no Brasil (Crotman; Barros; Oliveira, 2024; Forster-Carneiro *et al.*, 2013).

O setor agroflorestal contribui significativamente para a economia nacional, promovendo a produção sustentável e diversificação de renda, destinando adequadamente os resíduos agroflorestais gerados. Em 2020, o setor agrícola respondeu por cerca de 6% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, enquanto o setor florestal contribuiu com aproximadamente 1,2%, evidenciando a relevância econômica desses segmentos para o país (Alves *et al.*, 2023). Globalmente, o setor agrícola gera cerca de 140 bilhões de toneladas de biomassa por ano, volume

que pode ser aproveitado como fonte significativa de energia e matéria-prima (Forster-Carneiro *et al.*, 2013).

Em 2024, as principais produções da agricultura no Brasil foram a soja, cana-de-açúcar, milho em grão e o café, destacando-se a soja e a cana-de-açúcar com os maiores valores de produção, com valor de 260.233.510 mil reais e 104.971.298 mil reais, respectivamente (IBGE, 2024a). Devido à grande variabilidade de resíduos produzidos no Brasil, são utilizadas classificações que distinguem os diferentes tipos como os resíduos de colheita (palha, folhas, espigas), resíduos de processamento industrial (bagaço, cascas e tortas), resíduos pecuários (esterco) e de frutas (Gonçalves *et al.*, 2025). Ressalta-se que os resíduos vegetais constituem o foco principal deste estudo, embora os resíduos da produção animal também possuam potencial de reaproveitamento. Sath, Duhan e Duhan (2018) classificam os resíduos agrícolas em apenas dois tipos, resíduos de campo e processamento, adicionando que a escolha do resíduo é baseado de acordo com sua disponibilidade local (Sath; Duhan; Duhan, 2018).

O manejo adequado desses resíduos promove a sua transformação em produtos de valor agregado. Diversas rotas de destinação têm sido estudadas pela comunidade científica, incluindo a produção de biofertilizantes por meio de compostagem, a síntese de biocombustíveis, a alimentação animal, o crescimento da biomassa microbiana, a produção de enzimas, de bioativos e de ácidos orgânicos, entre outros. Entretanto, para agregar valor a esses resíduos, diversas rotas tecnológicas podem ser empregadas, sendo a pirólise uma das mais utilizadas (Ferrari *et al.*, 2025).

No contexto brasileiro, o setor agrícola enfrenta desafios significativos no atual sistema econômico, relacionados ao atendimento da demanda global, ao uso da terra, às emissões de gases de efeito estufa, à poluição, à geração de efluentes, à produção e à disposição de resíduos e às limitações nos processos de reciclagem. Dentre esses desafios, o descarte de resíduos agrícolas destaca-se pelo seu alto custo, favorece a contaminação do solo, emissões de gases de efeito estufa (GEE), contaminante de águas locais, impactando negativamente o ambiente, a qualidade de vida e a segurança alimentar regional (Siqueira *et al.*, 2022).

A indústria de alimentos e o setor agrícola contribuem significativamente para a geração e a dispersão de grandes volumes de resíduos agrícolas, principalmente por desperdício de alimentos. Assim, busca-se estratégias que visam minimizar o desperdício de produtos agrícolas em todas as fases produtivas, desde o plantio e a colheita até a distribuição e o consumo (Lackner; Besharati, 2025). Dessa forma, esses fatores ressaltam a necessidade de políticas integradas e de

ferramentas tecnológicas eficazes que promovam uma gestão mais eficiente, sustentável e economicamente viável dos resíduos agrícolas no país.

3.2 Geração de resíduo agrícola no Nordeste

A região Nordeste do Brasil, que ocupa cerca de 18,2% do território nacional e abrange nove estados, é caracterizada por solos pobres e de baixa fertilidade, além de alta demanda por recursos vegetais. O clima apresenta forte irregularidade na distribuição das chuvas, com precipitações anuais frequentemente abaixo de 800 mm no semiárido e concentradas em poucos meses. A evapotranspiração potencial pode ultrapassar 2.000 mm/ano, intensificando o déficit hídrico. Os solos são, em geral, rasos, arenosos, pouco retentores de água e suscetíveis à erosão. Em conjunto, esses fatores impõem limitações ao uso agrícola e tornam os sistemas produtivos mais vulneráveis às variações climáticas (EMBRAPA, 2021; Ribaski; Menezes, 1994).

O Nordeste possui uma produção agrícola diversificada, com destaque para a cana-de-açúcar, seguida por culturas como soja, milho e algodão. A região também abriga importantes lavouras permanentes, como banana, laranja, coco, manga, uva, mamão e cacau. Apesar dessa diversidade, sua participação na produção agrícola nacional diminuiu de 15,5% em 2002 para 7,6% em 2017. Essa queda está relacionada à expansão agrícola do Centro-Oeste e aos impactos das secas recentes, que afetaram principalmente as culturas do semiárido (Carneiro, 2019).

Dados registrados de 2009 a 2013 da geração de resíduos agrícolas nos principais estados do Nordeste (Sergipe, Bahia, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí, Maranhão e Alagoas) apontam um valor aproximado de 9,8 milhões de toneladas de resíduos apenas da cana-de-açúcar (palha ou bagaço), já o de milho em grão aproxima-se de 6,1 milhões de toneladas (Oliveira *et al.*, 2019). Os grandes volumes de resíduos agrícolas no Nordeste tornam seu manejo complexo, agravado pela escassez hídrica, solos pouco férteis e infraestrutura limitada, o que favorece práticas inadequadas de descarte. Ainda assim, a região possui potencial para valorizar esses resíduos por meio de tecnologias como bioenergia, compostagem, produção de biochar e outras aplicações industriais.

3.2.1 Geração de Resíduos Agrícolas no Rio Grande do Norte

Em 2024, o Rio Grande do Norte (RN) obteve aproximadamente 3,6 milhões de toneladas apenas da produção de cana-de-açúcar, o que foi o recorde do ano. Outros cultivos de lavoura temporária destacam-se como a mandioca e o melão, com valores de produção (em toneladas) de

276.245 e 505.212, respectivamente (IBGE, 2024b). Em relação à quantidade de resíduos gerados, dados de 2009 a 2013 registraram 204.665,34 toneladas de resíduo gerado para a mandioca, e 556.594,50 toneladas para a cana-de-açúcar (palha ou bagaço) (Oliveira *et al.*, 2019).

Além dos cultivos temporários, o Rio Grande do Norte também se destaca na produção de culturas permanentes, especialmente o caju. O estado figura entre os principais produtores da fruta no Brasil, e o processamento da castanha gera quantidades significativas de resíduos lignocelulósicos, sobretudo a casca (BRAINER, 2022). De forma semelhante ao que ocorre nas cadeias da cana-de-açúcar e da mandioca, nas quais a palha, o bagaço e outros subprodutos correspondem a frações expressivas da biomassa produzida, a cadeia do caju também contribui de forma relevante para a geração de resíduos agrícolas no estado.

O cajueiro (*Anacardium occidentale* Lin) é uma espécie bem cultivada em países tropicais como Vietnã, Brasil, Índia, Nigéria, entre outros (Nguyen *et al.*, 2022). O principal produto explorado do cajueiro é a castanha, sua casca representa cerca de 70% do peso da castanha, utilizado para extração do líquido da casca da castanha de caju (LCC), que corresponde a cerca de 25% do peso da casca da castanha (EMBRAPA, 2018).

Dentre a região do Nordeste, destaca-se os 3 principais estados produtores da castanha de caju, o Ceará (CE) com 63,5% das áreas colhidas, Piauí (PI) e Rio Grande do Norte (RN) somando 28,7%, o restante (7,8%) é distribuído entre os demais produtores da região Nordeste (BRAINER, 2022). Em 2022 o RN apresentou uma produção de 18.169 toneladas de castanha de caju com 48.378 de área colhida e rendimento de 376 kg/ha, sobressaindo-se nessa produção os municípios do oeste potiguar como a cidade Serra do Mel (EMBRAPA, 2023).

O processamento da castanha de caju gera uma ampla variedade de subprodutos e resíduos, incluindo a testa, a maçã de caju, o bagaço da maçã e o LCC. Diversos estudos têm investigado o aproveitamento de resíduos agroindustriais da castanha de caju, com ênfase no líquido e na casca, por meio de diferentes tratamentos biotecnológicos. Esses resíduos apresentam potencial para aplicações futuras, incluindo a produção de insumos e compostos químicos utilizados nas indústrias de tintas e revestimentos, desinfetantes e sanitizantes, e no setor farmacêutico (Nguyen *et al.*, 2022).

3.3 Rotas integradas para transformação de resíduos agrícolas

A destinação adequada de resíduos depende de rotas tecnológicas que permitam sua valorização e geração de produtos de maior valor agregado. Resíduos agrícolas e florestais

possuem grande potencial nesse contexto, podendo ser convertidos em produtos especializados por rotas químicas verdes, biotecnológicas ou integradas a biorrefinarias. As biorrefinarias, por meio de processos como digestão anaeróbica, fermentação e compostagem, transformam resíduos orgânicos em produtos energéticos e comerciais com bom custo-benefício. A extração também é uma alternativa relevante, permitindo obter compostos bioativos, biopolímeros e fitoquímicos diretamente da biomassa. Esses componentes isolados podem ser destinados a setores de maior valor, como alimentos, nutracêuticos, cosméticos e aplicações terapêuticas (Capanoglu; Nemli; Tomas-Barberan, 2022).

Os métodos convencionais de tratamento de resíduos enfrentam restrições como altos custos, necessidade de grandes áreas, longos prazos e geração de subprodutos, o que exige alternativas mais eficientes e sustentáveis. O processamento termoquímico, especialmente a pirólise, surge como alternativa promissora por reduzir volumes, otimizar tempos, recuperar energia e tratar diversas matérias-primas, sendo simples, viável economicamente e versátil (Kim *et al.*, 2020).

3.3.1 Pirólise

A pirólise é uma decomposição térmica de materiais orgânicos em condições de baixa concentração de oxigênio ou anóxicas. Como coprodutos, a pirólise gera biochar sólido, bio-óleo e gás de síntese, cuja eficiência do processo varia conforme as características da matéria-prima e com os parâmetros operacionais empregados, como taxa de aquecimento, tempo de residência e faixa de temperatura (Cisse *et al.*, 2022).

A pirólise pode ser classificada em lenta, rápida e instantânea, conforme as condições operacionais. A pirólise lenta, realizada em baixas temperaturas, baixas taxas de aquecimento e longos tempos de residência, favorece a produção de biochar, mas limita a qualidade do bio-óleo devido ao craqueamento secundário e à baixa transferência de calor. Já a pirólise rápida utiliza altas taxas de aquecimento e curtos tempos de residência, aumentando significativamente o rendimento de bio-óleo. Essa tecnologia tem ganhado destaque pela produção de combustíveis líquidos e compostos químicos de maior valor agregado, além de permitir armazenamento e transporte mais simples. Também apresenta boa eficiência energética e menores custos de capital, especialmente em plantas de pequena escala (Jahirul *et al.*, 2012).

A pirólise instantânea distingue-se da pirólise lenta, que utiliza baixas taxas de aquecimento e longos tempos de residência, o que favorece reações secundárias e resulta principalmente na

formação de carvão e em quantidades moderadas de alcatrão. Também denominada pirólise ultrarrápida, a pirólise instantânea ocorre em taxas e temperaturas de aquecimento extremamente elevadas, com tempos de residência dos vapores inferiores a um segundo, resfriamento quase instantâneo dos produtos voláteis e remoção acelerada do carvão formado (Ighalo *et al.*, 2022).

3.3.2 Biochar

O biochar, um adsorvente eficiente e de baixo custo, pode ser produzido a partir de biomassa submetida a tratamento térmico. A biomassa utilizada como precursor pode incluir diversos tipos de resíduos orgânicos, como resíduos agrícolas e florestais, cavacos de madeira, algas, lodo de esgoto, esterco e resíduos sólidos urbanos orgânicos. (Mukherjee; Zimmerman; Harris, 2011; Xiang *et al.*, 2020; Xiong *et al.*, 2019). O biochar é um produto de alto valor agregado com múltiplas aplicações, incluindo geração de energia, remediação e fertilização de solos, redução de emissões de gases de efeito estufa, sequestro de carbono, adsorção de metais/metaloídes e purificação de água (Sher *et al.*, 2020). Dentre essas aplicações, o presente estudo concentra-se especificamente na adsorção e no sequestro de carbono.

No que diz respeito à adsorção, a funcionalidade do biochar como bioadsorvente é amplamente valorizada devido à presença de grupos funcionais voláteis em sua superfície e ao método de tratamento térmico, que resulta em elevada área superficial e volume de poros significativo, favorecendo o processo de adsorção (Eissa *et al.*, 2024). Pesquisadores da área de adsorção que utilizaram biochar não modificado observaram que dois parâmetros são determinantes para a obtenção de um adsorvente de elevada eficiência: o tipo de biomassa e a temperatura de pirólise (Adesemuyi *et al.*, 2020a; Alsewaileh; Usman; Al-Wabel, 2019; Bakly; Al-Juboori; Bowtell, 2019; Fatima *et al.*, 2021; Fseha; Sizirici; Yildiz, 2022).

No contexto do sequestro de carbono, o biochar destaca-se por sua capacidade de armazenar carbono de forma estável no solo, resultado da formação de estruturas aromaticamente condensadas durante a pirólise (Crombie; Mašek, 2015). Valores mais elevados de temperatura aumentam o grau de carbonização e reduzem as razões H/C e O/C, produzindo materiais mais recalcitrantes e com maior estabilidade, embora com menor rendimento sólido (Liu *et al.*, 2024). Já temperaturas mais baixas preservam frações mais lábeis, úteis agronomicamente, porém menos eficazes para o sequestro duradouro (Crombie; Mašek, 2015).

Entre os parâmetros operacionais da pirólise, a temperatura desempenha um papel central tanto na eficiência do processo quanto na definição das propriedades finais dos produtos. O

aumento da temperatura intensifica as transformações térmicas dos constituintes da biomassa, resultando na redução do rendimento de biochar e no aumento dos teores de carbono e de cinzas. Esses efeitos decorrem da decomposição progressiva de celulose, hemicelulose e lignina, bem como de fenômenos associados, como a separação de sais alcalinos e o avanço das etapas de carbonização (Gai *et al.*, 2014; Mariyam *et al.*, 2023). A taxa de aquecimento e o tempo de residência também contribuem para moldar as características do biochar e os rendimentos de bio-óleo e biogás, influenciando a velocidade das reações e o grau de degradação da biomassa (Qureshi *et al.*, 2022). Contudo, a escolha da temperatura de pirólise permanece especialmente determinante para o controle da qualidade e das propriedades funcionais do biochar.

3.3.2.1 Caracterização

A análise elementar do biochar concentra-se na quantificação de C, H, N, O e S, os principais elementos da fração orgânica do material. Em muitos casos, os teores de S e N são baixos, conforme a matéria-prima empregada. As razões atômicas H/C e O/C derivadas dessa análise são amplamente utilizadas como indicadores do grau de aromaticidade, estabilidade e recalcitrância do biochar, permitindo relacionar sua estrutura carbonácea ao desempenho em aplicações ambientais diversas (Igalavithana *et al.*, 2017).

A análise imediata é uma etapa fundamental da caracterização do biochar e envolve a determinação dos teores de umidade, matéria volátil, cinzas e carbono fixo. Esses parâmetros fornecem uma visão geral da composição do material e do desempenho da pirólise: a matéria volátil indica o grau de degradação térmica da biomassa, o teor de cinzas reflete a fração mineral remanescente e o carbono fixo está associado ao nível de carbonização e à estabilidade estrutural do biochar, sendo especialmente relevante para aplicações como adsorção e sequestro de carbono (Igalavithana *et al.*, 2017).

As propriedades físico-químicas do biochar, determinadas pela matéria-prima e pelas condições de produção, são tradicionalmente avaliadas por meio de métodos adaptados de análise de solos, carvões e compostos. Nesse contexto, as medições de pH, condutividade elétrica (CE) e pH_{pcz} fornecem informações essenciais sobre o comportamento químico superficial do biochar em suspensão aquosa. Enquanto pH e CE refletem a disponibilidade de íons e a influência de minerais de cinzas, o pH_{pcz} indica a faixa de pH na qual a superfície tende a assumir carga positiva ou negativa, permitindo prever interações eletrostáticas relevantes em processos de adsorção e na dinâmica do solo (Igalavithana *et al.*, 2017).

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) é amplamente empregada para investigar os grupos funcionais e a mineralogia do biochar. Esses grupos desempenham um papel fundamental nos mecanismos de adsorção e nas reações do biochar no solo. Além disso, a técnica permite avaliar mudanças estruturais decorrentes das condições de pirólise, como a redução de grupos oxigenados e o aumento da aromaticidade (Igalavithana *et al.*, 2017).

A caracterização morfológica do biochar envolve técnicas que revelam tanto sua estrutura física quanto sua composição superficial. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) permite visualizar diferenças morfológicas entre amostras, evidenciando a distribuição e o arranjo de micro e mesoporos que influenciam diretamente suas propriedades de adsorção e reatividade. Em seguida, a espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS), acoplada ao MEV, é utilizada para estimar a composição elementar da superfície, permitindo identificar minerais e heteroátomos associados à matriz carbonácea. Por fim, a difração de raios X (DRX) é empregada para determinar fases cristalinas e avaliar o grau de organização estrutural do carbono e dos minerais presentes no biochar (Igalavithana *et al.*, 2017).

A caracterização térmica do biochar é conduzida por meio das técnicas de TGA/DTG e DSC, que fornecem uma descrição abrangente do comportamento do material sob aquecimento. As análises de TGA (Análise termogravimétrica) e DTG (Derivada termogravimétrica) fornecem informações sobre a estabilidade térmica, a variação de massa e as principais faixas de degradação, identificando as temperaturas de transição das reações e a resistência térmica do material. Já a calorimetria diferencial de varredura (DSC) permite identificar eventos endotérmicos e exotérmicos associados a transformações físico-químicas, oferecendo uma visão mais detalhada dos processos térmicos que ocorrem durante o aquecimento (Meysami *et al.*, 2025).

3.3.3 Aplicações

O biochar apresenta ampla gama de aplicações devido à sua elevada área superficial, porosidade e abundância de grupos funcionais. No meio ambiental, destaca-se como bioadsorvente na remoção de íons metálicos e compostos orgânicos, além de atuar como catalisador heterogêneo em processos como a produção de biodiesel. Na agricultura, funciona como corretivo, melhorando a fertilidade, a retenção de água e as propriedades do solo. Sua estrutura estável também favorece o sequestro de carbono a longo prazo. Em aplicações energéticas, pode ser usado como combustível ou aditivo em compostagem, estimulando a atividade microbiana. Ademais, materiais

à base de biochar vêm sendo utilizados na produção de baterias, servindo como fonte de carbono amorfo para ânodos (Sakhiya; Anand; Kaushal, 2020; Zhang *et al.*, 2018).

Dessa forma, embora o biochar apresente um amplo e crescente conjunto de aplicações, este trabalho direciona sua atenção para o emprego como adsorvente de metais pesados e como potencial sequestrante de carbono.

3.3.3.1 Sequestro de carbono

O sequestro de carbono promovido pelo biochar está diretamente relacionado às suas propriedades físico-químicas, que determinam sua estabilidade e permanência no solo. O elevado teor de carbono, aliado à sua natureza recalcitrante, é um dos fatores mais importantes para que o biochar atue como um reservatório de longo prazo, capaz de reter carbono e evitar sua devolução à atmosfera de dióxido de carbono (CO₂). Durante a pirólise, sobretudo em altas temperaturas, ocorre a eliminação das frações lábeis e de elementos voláteis como hidrogênio e oxigênio, por desidratação e descarboxilação. Esse enriquecimento em carbono fixo gera estruturas altamente aromatizadas e resistentes à decomposição microbiana, resultando em materiais mais persistentes no solo (Li; Tasnady, 2023b).

Razões atômicas H/C e O/C são usadas para avaliar a estabilidade do biochar $H/C < 0,7$ indica predominância aromática e $H/C < 0,4$ revela elevado grau de carbonização e maior potencial de sequestro de carbono. Além da composição elementar, propriedades como área superficial, porosidade e distribuição de poros, pH, capacidade de troca catiônica e granulometria influenciam a interação com o solo e a proteção do carbono. Por isso, alta aromaticidade, estabilidade térmica e características físico-químicas favoráveis tornam o biochar estratégico para aumentar o estoque de carbono no solo (EBC, 2023; Li; Tasnady, 2023b).

Os mecanismos de sequestro de carbono pelo biochar incluem a estabilização do carbono lábil por sorção, alterações na dinâmica microbiana e melhorias nas propriedades físico-químicas do solo. O biochar pode modificar a comunidade microbiana, reduzir a decomposição da matéria orgânica e favorecer o acúmulo de necromassa. Suas características físicas também aumentam a retenção de água e nutrientes, fortalecem os agregados e protegem o carbono da decomposição. Em solos manejados, biochars ricos em carbono recalcitrante ampliam o estoque de carbono, enquanto sua influência sobre enzimas do ciclo do carbono tende a diminuir a mineralização e prolongar a permanência do carbono no solo (Enebe; Ray; Griffin, 2025; Li; Tasnady, 2023b).

Dado o potencial de sequestro e as interações do biochar com o solo, é crucial enfrentar os desafios da produção em larga escala, garantindo fornecimento sustentável de biomassa que não concorra com alimentos nem prejudique ecossistemas. Economicamente viável por aproveitar abundantes resíduos florestais e agrícolas (convertíveis em biochars de alto poder calorífico para usos como metalurgia e geração de energia), o processo ainda contribui para reduzir emissões locais de CO₂, fortalecendo o papel do biochar como alternativa sustentável (Li; Tasnady, 2023b).

3.3.3.2 Bioadsorvente

Os bioadsorventes, especialmente o biochar, destacam-se pela sustentabilidade e pelo baixo custo, podendo ter seu desempenho adsorptivo aprimorado por diferentes modificações. As modificações físicas elevam a área superficial e a porosidade, as modificações químicas, como tratamentos ácido-base e impregnação com metais ou nanomateriais, adicionam grupos funcionais ativos, já os métodos biológicos promovem alterações estruturais por meio da ação microbiana (Liu, Zhixin *et al.*, 2022).

Os metais pesados especialmente cádmio (Cd²⁺) e chumbo (Pb²⁺) são altamente tóxicos mesmo em baixas concentrações, e o biochar modificado tem se mostrado promissor para sua remoção em água. Tratamentos ácidos/básicos, impregnação com íons/metais ou oxidantes introduzem grupos funcionais, aumentam a porosidade e alteram a superfície (mais hidrofílica e com ponto isoelétrico favorável), reforçando interações físico-químicas e eletrostáticas com Cd²⁺ e Pb²⁺. Biochars funcionalizados, portanto, costumam apresentar maior afinidade e capacidade de retenção; recomenda-se, para frente, desenvolver modificações mais sustentáveis e testar desempenho em misturas de contaminantes e condições de campo. (Kumari *et al.*, 2025; Liu, Tianqi *et al.*, 2022).

O biochar modificado apresenta grande potencial para o tratamento de águas residuais contendo metais pesados como Pb e Cd, porém ainda enfrenta desafios importantes que limitam sua aplicação prática. A variabilidade nas matérias-primas, condições de pirólise e protocolos experimentais dificulta a comparação de capacidades e mecanismos reportados na literatura, o que compromete a consolidação de critérios de desempenho. Além disso, há lacunas quanto à transformação de componentes tóxicos durante a produção por pirólise e incertezas sobre a possibilidade de poluição secundária gerada por agentes químicos usados na modificação (Liu, Tianqi *et al.*, 2022).

3.3.3.2.1 Bioadsorvente de CCC

Alguns estudos adotaram a CCC como matéria-prima para a produção do biochar (Tabela 1). Ábrego et al. (2018) caracterizaram as frações sólida, líquida e gasosa da CCC, os biochars foram produzidos a temperaturas de 400, 500 e 600 °C, avaliou-se que boa parte dos produtos da pirólise pode ser utilizado para combustão (Ábrego *et al.*, 2018). Já Moreira et al. (2017) produziram biochar a partir da CCC em um reator com gradiente de temperatura entre 400 e 700 °C. Os produtos da pirólise (biochar, bio-óleo e gás de síntese) foram caracterizados e avaliados como alternativa para regiões com baixa taxa de eletrificação (Moreira *et al.*, 2017).

Kaur et al. (2023) caracterizaram os produtos da pirólise de três diferentes resíduos de caju: cashew skin, cashew shell de-oiled e cashew shell waste. A pirólise ocorreu na faixa de temperatura de 300-500 °C (Kaur *et al.*, 2023). Kadjo et al. (2024) produziram biochar a partir da CCC apenas na temperatura de 300 °C, como também caracterizaram o material bruto (Kadjo *et al.*, 2024). Kazawadi et al. (2023) otimizaram o processo de pirólise intermediária, utilizando como matéria-prima a CCC, com metodologia de superfície de resposta do método Box-Behnken, variando os tamanhos de partículas, tempos de residência, taxas de aquecimento e temperaturas de pirólise (400 a 600 °C) (Kazawadi; Ntalikwa; Kombe, 2025). Nam et al. (2020) realizaram um estudo paramétrico da CCC, investigando a influência dos diferentes parâmetros da pirólise, a faixa de temperatura analisada foi de 450 a 900 °C (Nam *et al.*, 2020).

Tabela 1 - Resumo de estudos que produziram biochar da CCC.

Autor e ano	Temperatura de pirólise (°C)	Categoria do Estudo	Referências
Ábrego et al., 2018	400, 500 e 600	Caracterização e balanço energético	(Ábrego <i>et al.</i> , 2018)
Moreira et al., 2017	400-700	Caracterização e balanço energético	(Moreira <i>et al.</i> , 2017)
Kaur et al., 2023	300-500	Caracterização e balanço energético	(Kaur <i>et al.</i> , 2023)
Kadjo et al., 2024	300	Caracterização e balanço energético	(Kadjo <i>et al.</i> , 2024)

Kazawadi et al., 2023	400-600	Caracterização e modelagem	(Kazawadi; Ntalikwa; Kombe, 2025)
Nam et al. 2020	450-900	Caracterização e balanço energético	(Nam <i>et al.</i> , 2020)

4 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo compreende as etapas de preparação, caracterização e avaliação das aplicações potenciais de biochars obtidos a partir da casca da castanha de caju (CCC). Inicialmente, a biomassa foi submetida a pré-tratamento e pirólise sob diferentes condições de temperatura, visando à obtenção dos biochars. Em seguida, as amostras foram caracterizadas por técnicas elementares, físico-químicas, estruturais e térmicas. Por fim, foram conduzidos ensaios para avaliar o desempenho do biochar em aplicações ambientais, bem como estimativas de estabilidade e potencial de sequestro de carbono, conforme metodologias reconhecidas na literatura.

4.1 Preparação do biochar

A CCC, fornecida já sem o LCC, foi inicialmente seca em estufa a 105 °C por 4 h, em seguida foi triturada e peneirada para remover frações indesejadas e obter partículas menores que 0,5 mm, garantindo uniformidade granulométrica (N. S. Chauhan, 2021). A biomassa preparada foi pirolisada em atmosfera de baixo teor de oxigênio, a três temperaturas: 300 °C (BC300), 500 °C (BC500) e 700 °C (BC700). A pirólise foi realizada em uma mufla (EDG, modelo 3000) com taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹ e tempo de residência de 60 min na temperatura alvo (Nguyen *et al.*, 2024; Vilas-Boas *et al.*, 2023).

4.2 Caracterização do biochar

A caracterização do biochar foi conduzida de forma abrangente para avaliar suas propriedades físico-químicas, estruturais e funcionais, com ênfase em seu potencial para aplicações em adsorção de metais e sequestro de carbono.

4.2.1 Análise aproximada

A Análise Imediata (Proximate Analysis) do biochar foi realizada de acordo com a norma ASTM D3172-13, e o teor de matéria volátil (MV) seguiu a norma ASTM D3175-18 (Silva *et al.*, 2023). De forma resumida, a matéria volátil foi determinada como a perda de massa após aquecer o biochar em um cadinho coberto a 950 °C por 7 minutos, seguida de resfriamento à temperatura ambiente e pesagem. O teor de umidade foi medido como a perda de massa após aquecer o biochar em um cadinho aberto a 105 °C, mantendo-se a temperatura até atingir peso constante. O teor de cinzas (CZ) foi determinado aquecendo o biochar preparado em uma mufla a 600 °C, com taxa de

aquecimento de aproximadamente $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, mantendo por 3 horas até atingir peso constante. O teor de carbono fixo (CF, % em massa) foi calculado pela Equação (1).

$$CF\% = 100\% - CZ\% - MV\% \quad (1)$$

O rendimento do biochar (Rendimento, %) foi calculado com base na massa inicial da biomassa e na massa final de biochar obtida após a pirólise, de acordo com a Equação (2) (Vilas-Boas *et al.*, 2023) :

$$\text{Rendimento (\% em massa)} = \frac{\text{massa de biochar (g)}}{\text{massa de biomassa (g)}} \cdot 100\% \quad (2)$$

A caracterização térmica do material foi realizada por meio de análise termogravimétrica (TGA) e termogravimetria derivada (DTG) para determinar o perfil de degradação térmica. Além disso, a calorimetria exploratória diferencial (DSC) foi empregada para identificar eventos endotérmicos e exotérmicos durante o aquecimento. As análises foram conduzidas em uma termobalança TG/DTG Netzsch (Modelo STA 449 F3 Jupiter), com taxa de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, sob atmosfera inerte de nitrogênio (N_2). A pirólise foi monitorada no intervalo de temperatura de 30–900 $^{\circ}\text{C}$ utilizando aproximadamente 10 mg de amostra.

4.2.2 Composição elementar

Um analisador elementar (EA3000, Itália) foi utilizado para determinar a composição elementar (C, H e N) do biochar preparado. Aproximadamente 2 mg de amostra foram colocados em cápsulas de estanho prensadas por extrusão, e o analisador foi utilizado para medir diretamente os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio. O teor de oxigênio (O) foi obtido por diferença, conforme expresso na Equação (3). As razões atômicas H/C e O/C foram calculadas com base nos resultados da composição elementar.

$$O (\%) = 100 (\%) - C (\%) - H (\%) - N (\%) - CZ (\%) \quad (3)$$

4.2.3 Características físico-químicas

O pH do biochar foi medido em duplicata utilizando uma amostra de 1,0 g misturada com 20 mL de água deionizada. A suspensão foi agitada por 1,5 h para garantir o equilíbrio adequado entre a solução e a superfície do biochar. Em seguida, a condutividade elétrica (CE) foi

determinada utilizando um condutímetro Orion Model 115A Plus (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA) (Rajkovich *et al.*, 2012). Na determinação do ponto de carga zero, foram utilizados 15 mL de uma solução de NaCl 0,05 mol/L em tubos do tipo falcon, com valor de pH variando de 2 a 10, ajustadas com solução de 0,1 mol/L de HCl e/ou NaOH. Em seguida, foram adicionados 50 mg do adsorvente nos tubos, em triplicata, posteriormente agitados a temperatura 25 ± 2 °C por 24 h. Em seguida, os tubos foram centrifugados em uma incubadora shaker (sp222, Splabor) e feitas as leituras do pH em equipamento de medição de potencial de hidrogênio (PH140, Simpla) (Akkaya; Güzel, 2014).

4.2.4 Caracterização estrutural

Os grupos funcionais presentes na superfície do biochar foram identificados por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) utilizando um acessório ATR (Agilent Cary 630), adquirindo espectros na faixa de $4000\text{--}550\text{ cm}^{-1}$. A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (Tescan Vega 3, Tescan, República Tcheca) foi empregada para analisar a morfologia superficial das amostras. Para identificação elementar qualitativa, foi realizada espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) utilizando o sistema SEM-EDS acoplado.

A análise por difração de raios X (XRD) foi realizada para avaliar a cristalinidade e o tamanho de cristalito, permitindo comparação com os resultados de microscopia. As medições foram conduzidas em um difratômetro de pó de raios X X'Pert MPD (Panalytical) em uma faixa de 2θ de $20\text{--}100^\circ$, utilizando radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,54059\text{ \AA}$) a 40 kV e 30 mA. Os padrões de difração foram registrados em geometria Bragg-Brentano no modo contínuo, com velocidade de varredura de $0,5^\circ\cdot\text{min}^{-1}$ e passo de $0,02^\circ$ (2θ). Os dados foram interpretados por meio do método de refinamento de Rietveld no software Maud® e o tamanho de cristalito foi calculado pela equação de Scherrer.

4.3. Aplicações potenciais

4.3.1. Avaliação do biochar como bioadsorvente

Os experimentos de adsorção foram realizados para avaliar a capacidade dos biochars produzidos a diferentes temperaturas de pirólise de remover íons de chumbo (Pb^{2+}) e cádmio (Cd^{2+}) de soluções aquosas. Os testes foram conduzidos em modo batelada, em triplicata, utilizando tubos Falcon de 50 mL contendo 20 mL da solução metálica com concentração inicial de $75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Cada tubo recebeu 40 mg de biochar, e as suspensões foram agitadas em um shaker (Splabor

SP222) a 180 rpm, sob temperatura controlada (25 ± 2 °C), por 24 h, para garantir o equilíbrio de adsorção. Após o tempo de contato, as amostras foram filtradas em filtros de seringa de 0,22 µm, e os sobrenadantes foram coletados para análise (Adesemuyi *et al.*, 2020b).

As concentrações residuais de Pb^{2+} e Cd^{2+} em solução foram determinadas por espectrometria de absorção atômica por chama (FAAS) (Shimadzu AA-7000). A eficiência de remoção (R, %) foi calculada de acordo com a Equação (4), em que C_i e C_f representam, respectivamente, as concentrações iniciais e finais do metal ($mg \cdot L^{-1}$).

$$R (\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} \cdot 100 \quad (4)$$

Os dados obtidos foram essenciais para avaliar o potencial de remoção de metais pesados dos biochars e demonstrar sua aplicabilidade no tratamento de águas contaminadas.

4.3.2. Estabilidade do biochar e potencial de sequestro

A estabilidade de longo prazo do biochar em solos é um indicador fundamental de seu potencial para o sequestro de carbono. Neste estudo, a estabilidade foi quantificada por meio de duas abordagens complementares: o método de Woolf *et al.* (Woolf *et al.*, 2021) E a metodologia voltada à certificação da Puro.Earth (Standard, 2025). Ambas são baseadas na relação entre a razão atômica hidrogênio/carbono orgânico (H/C_{org}), um indicador indireto da condensação aromática, e a fração do carbono do biochar que permanece estável ao longo do tempo.

O modelo de Woolf estima a fração de carbono estável F_{perm} após 100 anos como uma função linear de H/C_{org} e da temperatura média anual do solo (Eq. 4).

$$F_{perm} = c_{hc} + m_{hc} \cdot (H/C_{org}) \quad (4)$$

em que c_{hc} e m_{hc} são coeficientes empíricos. A massa de dióxido de carbono equivalente sequestrada por tonelada de biochar é calculada conforme a Eq. (5).

$$CO_{2e} = M_{bc} \cdot F_C \cdot (44/12) \cdot F_{perm} \quad (5)$$

em que M_{bc} é a massa de biochar (t), F_C é a fração de carbono orgânico, e 44/12 é o fator de conversão de massa molar de carbono para CO₂.

A metodologia da Puro.Earth estima a fração de carbono persistente (CP) e o total de CO₂ estável como uma função linear de H/C_{org} , incorporando ajustes conservadores (Eq. 6):

$$CP = M - a \cdot (H/C_{org}) \quad (6)$$

Onde: M e a são coeficientes empíricos dependentes da temperatura do solo e do horizonte temporal. O armazenamento correspondente de CO₂ é calculado conforme a Eq. 7:

$$C_{stored} = Q_{biochar} \cdot C_{org} \cdot (44/12) \cdot (CP/100) \quad (7)$$

Onde: C_{stored} é a massa total de CO₂ equivalente estável armazenada por tonelada de biochar, e $Q_{biochar}$ é a massa seca de biochar aplicada (t).

Adotou-se um horizonte temporal de 100 anos para ambas as metodologias, o que permitiu a comparação direta entre o modelo de Woolf e o framework da Puro.Earth e garantindo consistência com as avaliações padrão de estabilidade do biochar. Em conjunto, essas abordagens fornecem perspectivas complementares: o modelo de Woolf oferece uma base mecanística e revisada por pares para estimar a persistência do carbono, enquanto o método da Puro.Earth traduz esse conceito em um framework padronizado alinhado aos esquemas de certificação do mercado de carbono.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise elementar, análise imediata e rendimento sólido do biochar

A Tabela 2 apresenta a composição elementar dos bioadsorventes. O teor de carbono (C) da biomassa bruta (BIN) foi menor do que o dos biochars, aumentando progressivamente à medida que as temperaturas de pirólise aumentavam. Por outro lado, os teores de hidrogênio (H) e de oxigênio (O) diminuíram à medida que a temperatura aumentava. Essas tendências são atribuídas à quebra de ligações C-H e C-O mais fracas e à formação de ligações C-C mais estáveis durante a carbonização (Das *et al.*, 2021a; Tu *et al.*, 2022). Resultados semelhantes foram relatados por Kazawadi et al. (Kazawadi; Ntalikwa; Kombe, 2025) para o biochar de casca da castanha de caju nas temperaturas de 400-600 °C, com 49,71% de C, 42% de O e 4,12% de H. O teor de nitrogênio (N) aumentou até 500 °C, seguido por uma ligeira diminuição aos 700 °C, padrão também observado em estudos anteriores (Tu *et al.*, 2022).

Tabela 2 - Composição elementar e razões atômicas dos biochars de casca da castanha de caju obtidos em diferentes temperaturas de pirólise.

Amostras	Análise elementar				Proporção molecular	
	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	H/C	O/C
BIN	48,29 ± 0,008	7,01 ± 0,078	0,31 ± 0,007	42,92 ± 0,021	1,73 ± 0,022	0,67 ± 0,001
BC300	65,09 ± 0,014	5,86 ± 0,057	0,72 ± 0,014	25,51 ± 0,240	1,07 ± 0,011	0,29 ± 0,003
BC500	75,12 ± 0,658	1,26 ± 0,233	0,87 ± 0,028	18,00 ± 0,318	0,20 ± 0,039	0,18 ± 0,005
BC700	76,41 ± 0,318	0	0,66 ± 0,007	15,52 ± 0,375	0	0,15 ± 0,004

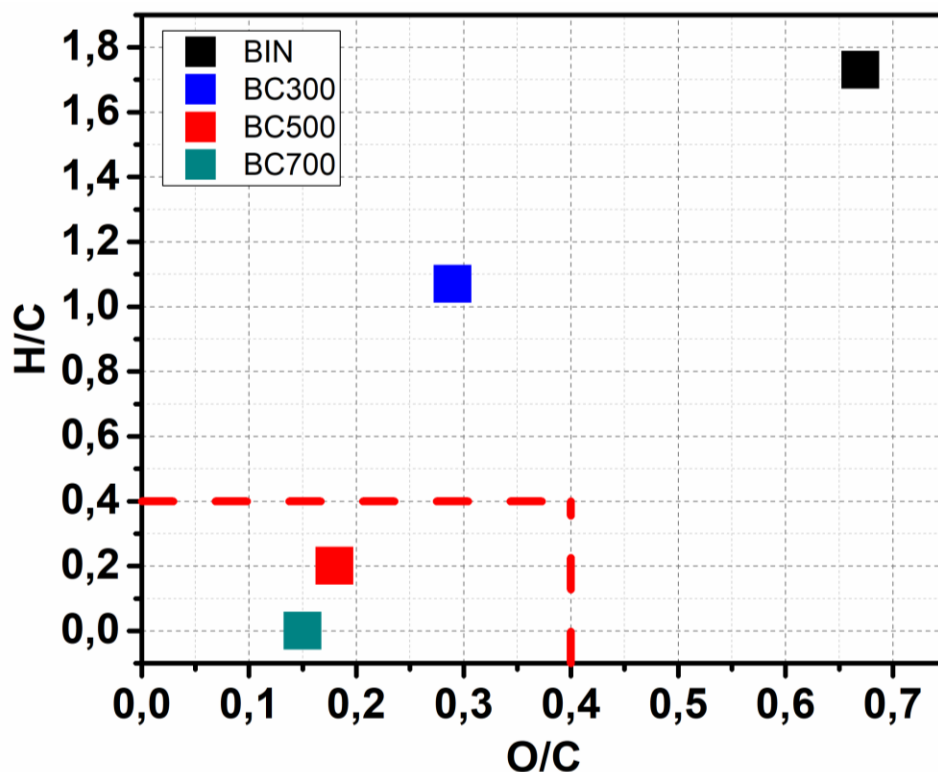
BIN = biomassa bruta (in natura); BC300, BC500, BC700 = biochars produzidos a 300, 500 e 700 °C, respectivamente. Não foram identificados presença de enxofre (S) em nenhuma amostra.

As razões molares H/C e O/C foram determinadas para a biomassa bruta e para os biochars produzidos sob diferentes tratamentos térmicos. Como esperado, as razões para a BIN foram consideravelmente mais altas do que as dos biochars, refletindo o aumento do teor de carbono resultante da degradação térmica da biomassa lignocelulósica e da remoção da maior parte dos elementos não carbonáceos durante a pirólise (Ábrego *et al.*, 2018; Rahmat *et al.*, 2024).

A Figura 1 apresenta um diagrama característico de Van Krevelen, no qual as razões molares H/C e O/C indicam, respectivamente, a estabilidade e o grau de envelhecimento dos biochars (Dhar; Sakib; Hilary, 2022; Moiseenko *et al.*, 2021; Rodriguez *et al.*, 2020). De acordo com os critérios de classificação, o biochar WBC-Premium, caracterizado por alta pureza e

segurança ambiental, deve apresentar razões H/C e O/C inferiores a 0,4 no diagrama de Van Krevelen (WBC, 2023; Zhang *et al.*, 2022).

Figura 1 - Diagrama de Van Krevelen produzidos em diferentes temperaturas de pirólise. BIN = biomassa bruta (in natura), BC300, BC500 e BC700 = biocarvões produzidos a 300, 500 e 700 °C, respectivamente.



A menor razão H/C foi observada para o BC700, seguida por BC500, BC300 e BIN, confirmando que o BC700 é o material mais termicamente estável. O aumento da temperatura de pirólise impactou positivamente a estabilidade do biochar, à medida que maiores graus de carbonização foram alcançados (Das *et al.*, 2021b). De forma semelhante, o BC700 também apresentou a menor razão O/C, próxima à do BC500. Ambas as amostras exibiram valores de O/C inferiores a 0,2, indicando meias-vidas estimadas superiores a 1.000 anos. O BC300, com valores de O/C entre 0,2 e 0,6, apresentou meia-vida estimada de 100 a 1.000 anos, enquanto a BIN apresentou meia-vida inferior a 100 anos (Rodriguez *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2022).

O elevado teor de carbono e as baixas razões H/C_{org} e O/C observadas em BC500 e BC700 indicam maior condensação aromática, recalcitrância química e aptidão para o sequestro de carbono a longo prazo. Essas amostras apresentaram meias-vidas estimadas superiores a 1.000 anos, confirmando seu potencial para armazenamento duradouro de carbono. Já o BC300, por

apresentar uma razão H/C_{org} mais elevada, exibiu menor aromaticidade e estabilidade, o que pode reduzir sua eficácia no aprisionamento de carbono.

Essas interpretações preliminares, derivadas das razões elementares, foram posteriormente avaliadas por meio de modelos quantitativos de permanência, especificamente a abordagem de 100 anos proposta por Woolf et al. (Woolf *et al.*, 2021) e o correspondente framework de 100 anos estabelecido pela Puro.Earth (Standard, 2025) para cada tipo de biocarvão.

A Tabela 3 resume os resultados da análise imediata para a biomassa bruta e para os biocarvões produzidos em diferentes temperaturas de pirólise. Os valores obtidos para BIN são consistentes com aqueles reportados em estudos anteriores sobre casca da castanha de caju (CCC) (Ábrego *et al.*, 2018; Kadjo *et al.*, 2024; Kaur *et al.*, 2023). O teor de materiais voláteis diminuiu de forma acentuada após o tratamento térmico e continuou a reduzir com o aumento da temperatura de pirólise. Além da fração sólida, os compostos voláteis são convertidos em gás de síntese e bio-óleo, dependendo da temperatura, uma vez que temperaturas mais elevadas promovem maior decomposição desses constituintes (Mokrzycki; Magdziarz; Rutkowski, 2022).

Tabela 3 - Composição imediata e rendimento dos biocarvões de casca da castanha de caju produzidos em diferentes temperaturas de pirólise. BIN = biomassa bruta (in natura), BC300, BC500 e BC700 = biocarvões produzidos a 300, 500 e 700 °C, respectivamente.

Amostras	Análise imediata			
	Carbono fixo (%)	Material volátil (%)	Cinzas (%)	Umidade (%)
BIN	11,02 ± 0,010	81,17 ± 0	1,49 ± 0,028	6,32 ± 0,038
BC300	32,54 ± 2,715	60,38 ± 2,164	2,82 ± 0,269	4,26 ± 0,820
BC500	62,51 ± 3,854	28,36 ± 3,479	4,77 ± 0,134	4,37 ± 0,509
BC700	63,53 ± 0,750	22,07 ± 1,365	7,43 ± 0,049	6,98 ± 0,566

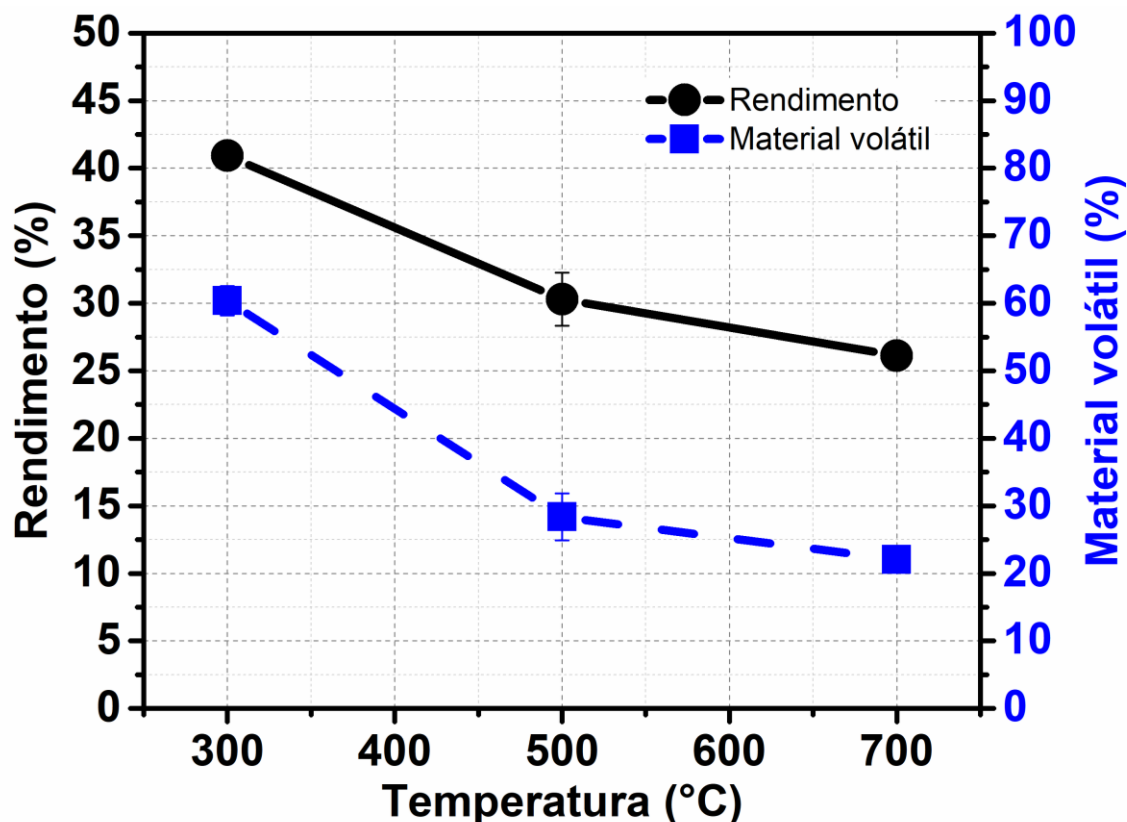
Por outro lado, os teores de carbono fixo e cinzas aumentaram com a temperatura, seguindo a mesma tendência observada em outros estudos. O aumento do carbono fixo é atribuído ao maior grau de polimerização e à condensação aromática da matriz carbonácea, enquanto o acréscimo no teor de cinzas resulta da maior concentração relativa de constituintes inorgânicos e da presença de resíduos de combustão. (Tomczyk; Sokołowska; Boguta, 2020b).

O teor de umidade geralmente diminuiu após o tratamento térmico, mas apresentou um leve aumento na temperatura mais elevada. Esse comportamento, também relatado por outros autores, pode ser explicado pela formação de poros adicionais capazes de reter água na superfície

dos biocarvões produzidos em temperaturas elevadas (Hyvältuoma *et al.*, 2018; Uchimiya *et al.*, 2011).

A Figura 2 ilustra o efeito da temperatura de pirólise sobre o rendimento e o teor de materiais voláteis dos biocarvões. O biocarvão produzido a 300 °C apresentou o maior rendimento e o maior teor de voláteis, seguido pelas amostras obtidas a 500 °C e 700 °C. O rendimento diminuiu de 40,67% (BC300) para 31,68% (BC500), uma redução de 22,1%, e, posteriormente, para 26,42% (BC700), correspondendo a uma queda de 35,0% em relação ao BC300. Ainda assim, observou-se uma tendência de estabilização do rendimento acima de 500 °C.

Figura 2 - Rendimento (%) e teor de materiais voláteis (%) dos biocarvões produzidos em diferentes temperaturas de pirólise (BC300, BC500 e BC700).



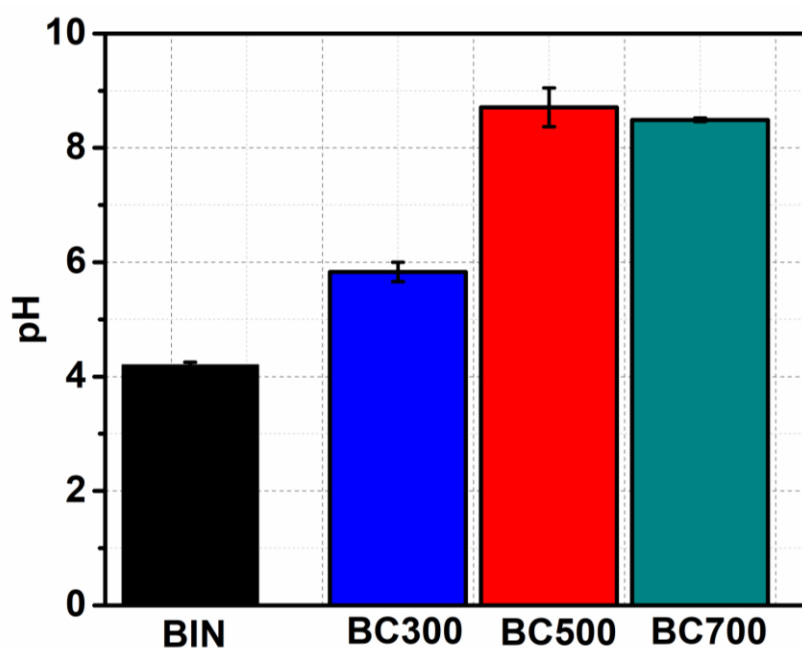
De acordo com a literatura, o aumento da temperatura na faixa de 400–800 °C reduz significativamente o rendimento do biocarvão, enquanto a estabilização costuma ocorrer entre 600–800 °C (Chen *et al.*, 2022). Essa redução é atribuída ao aumento da degradação térmica da matéria orgânica, que promove a liberação de compostos voláteis e diminui a formação de fase sólida em temperaturas mais elevadas (Yakout, 2017a). Nam *et al.* (2020) relataram tendências

semelhantes, com rendimentos de 28,95% e 23,59% a 450 °C e 750 °C, respectivamente (Nam *et al.*, 2020).

5.2 Propriedades físico-químicas de superfície

A Figura 3 apresenta os valores de pH da biomassa bruta e dos biocarvões produzidos a diferentes temperaturas de pirólise. O pH aumentou de $4,2 \pm 0,05$ para BIN para $5,83 \pm 0,17$ para BC300, com aumento mais pronunciado para BC500 ($8,71 \pm 0,34$) e BC700 ($8,49 \pm 0,03$). O caráter ácido do BC300 provavelmente está associado à menor degradação térmica dos componentes voláteis remanescentes no material.

Figura 3 - Valores de pH da biomassa bruta (BIN) e dos biocarvões produzidos em diferentes temperaturas de pirólise (BC300, BC500 e BC700).

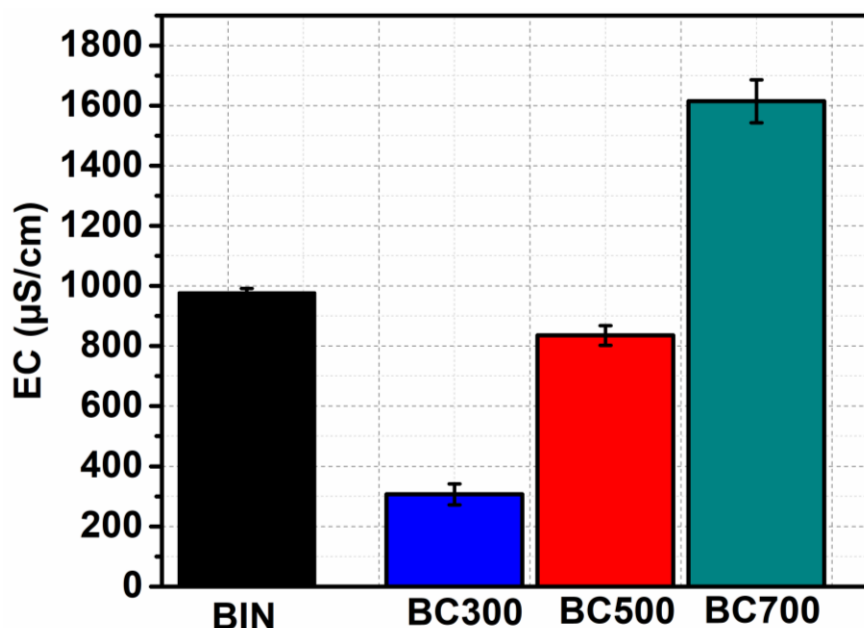


De modo geral, os biocarvões apresentam comportamento alcalino, especialmente quando produzidos a temperaturas superiores a 400 °C, devido à maior concentração relativa de elementos inorgânicos que não são volatilizados durante a pirólise (Angin; Şensöz, 2014a; Li; Chen, 2018a; Ma *et al.*, 2017). O aumento do pH está de acordo com os resultados de teor de cinzas, que aumentaram significativamente com a temperatura. BC500 e BC700 apresentaram os maiores valores de pH, indicando um caráter básico atribuído à presença de cinzas minerais, cuja dissolução de carbonatos e (hidro)óxidos contribui para a neutralização do meio (Angin; Şensöz, 2014b; Bolan *et al.*, 2023; Roshan; Ghosh; Maiti, 2023). Portanto, BC500 e BC700 também podem ser

considerados materiais promissores para a correção da acidez do solo, combinando elevada alcalinidade com grande estabilidade.

A Figura 4 apresenta os valores de condutividade elétrica (CE) da biomassa bruta e dos biocarvões produzidos a diferentes temperaturas de pirólise. A CE aumentou, de modo geral, com o aumento da temperatura; entretanto, o BIN apresentou o valor inicial mais elevado ($978 \pm 14,11 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) em comparação com BC300 ($306,67 \pm 35,25 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) e BC500 ($835,33 \pm 32,39 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Esse comportamento pode ser atribuído à elevada condutividade iônica de sais solúveis e compostos extraíveis presentes na casca da castanha de caju in natura.

Figura 4 - Condutividade elétrica (CE) dos biocarvões de casca da castanha de caju produzidos em diferentes temperaturas de pirólise. BIN = biomassa bruta (in natura); BC300, BC500 e BC700 = biocarvões produzidos a 300, 500 e 700 °C, respectivamente.



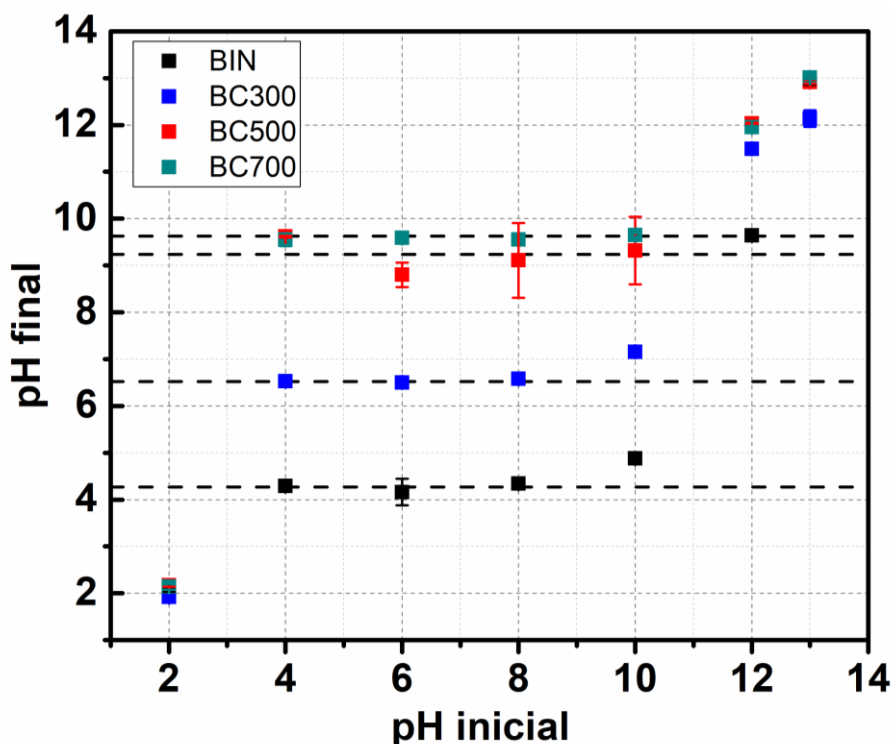
Como relatado na literatura, a CE tende a aumentar com temperaturas de pirólise mais elevadas devido à maior concentração de componentes inorgânicos (Lataf *et al.*, 2022). Entre os biocarvões, o BC700 apresentou o maior valor de CE ($1614,67 \pm 71,60 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), quase o dobro do BC500 e mais de cinco vezes superior ao do BC300. Vale destacar que o BC500 também apresentou um aumento de quase três vezes em comparação ao BC300, apesar do mesmo gradiente de temperatura (200 °C) aplicado entre BC500 e BC700. Essa tendência sugere estabilização dos valores de CE acima de 700 °C.

Achados semelhantes foi relatado em um estudo que analisou a influência do tipo de biomassa e da taxa de aquecimento, nos quais o aumento da temperatura de pirólise de 500 para

700 °C elevou significativamente a CE, enquanto a fonte de biomassa exerceu influência moderada (Bartoli *et al.*, 2022).

A Figura 5 apresenta o ponto de carga zero (pH_{pcz}) da casca da castanha de caju in natura e dos biocarvões produzidos a diferentes temperaturas de pirólise. O pH_{pcz} do material bruto foi de 4,27, enquanto os valores de BC300, BC500 e BC700 foram 6,52, 9,24 e 9,63, respectivamente. O pH_{pcz} representa o valor de pH no qual as concentrações de ânions e cátions se equilibram; valores acima desse ponto indicam uma superfície carregada negativamente (alcalina), ao passo que valores inferiores correspondem a uma superfície carregada positivamente (ácida) (Lu *et al.*, 2013).

Figura 5 - Valores de ponto de carga zero (PCZ) dos biocarvões de casca da castanha de caju (BIN, BC300, BC500 e BC700) em função do pH da solução.



O pH_{pcz} aumentou progressivamente com a intensidade do tratamento térmico e com a elevação da temperatura de pirólise. O BC300 apresentou o menor ponto de carga zero entre os biocarvões, com um acréscimo de 2,25 unidades em relação ao BIN, enquanto BC500 e BC700 exibiram aumentos de 4,97 e 5,36, respectivamente. As diferenças entre BC500 e BC300 (2,72) e entre BC700 e BC300 (3,11) confirmam a forte influência da temperatura de pirólise sobre essa propriedade.

O aumento do ponto de carga zero é atribuído à perda de grupos funcionais ácidos na superfície, causada pela degradação térmica (Sbizzaro *et al.*, 2021). Consequentemente, BIN e BC300 apresentaram comportamento superficial ácido, enquanto BC500 e BC700 exibiram comportamento superficial básico. Como o pH_{pcz} desempenha um papel crucial na definição do pH ótimo de operação em estudos de adsorção, esses resultados oferecem orientações valiosas para aplicações futuras (Tran; You; Chao, 2016).

5.3 Caracterização dos grupos funcionais de superfície

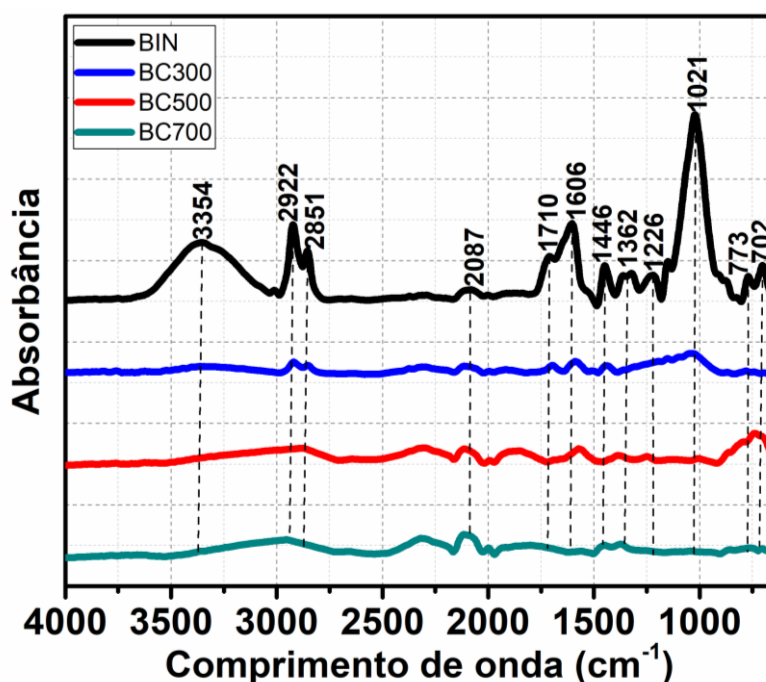
A Figura 6 apresenta os espectros de FT-IR da casca da castanha de caju in natura e dos biocarvões produzidos a diferentes temperaturas de pirólise. A Tabela 4 resume as principais bandas de absorção observadas nos materiais. A banda em 3354 cm⁻¹ apareceu apenas no BIN, correspondendo às vibrações de estiramento –OH (3600–3200 cm⁻¹) (Landrat *et al.*, 2024). Sua ausência nos biocarvões é atribuída à evaporação da água durante o tratamento térmico. As bandas em 2922 e 2851 cm⁻¹ são atribuídas ao estiramento assimétrico de ligações C–H alifáticas, enquanto as absorções em 1446 e 1362 cm⁻¹ correspondem às vibrações de flexão C–H, dentro das faixas de 2800–2960 cm⁻¹ e 1350–1445 cm⁻¹, respectivamente (Rodriguez Ortiz *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2018).

O espectro de BIN apresenta picos mais largos devido à presença de celulose e hemicelulose, enquanto o BC300 ainda exibe vibrações residuais, indicando degradação orgânica incompleta. Nos espectros de BC500 e BC700, o desaparecimento dessas bandas confirma a decomposição extensiva dos componentes lignocelulósicos. Já a absorção em 2087 cm⁻¹ corresponde ao estiramento C≡C de grupos alcinos (2100–2260 cm⁻¹) (Mahmoud Fodah; Ghosal; Behera, 2021), e essa banda foi detectada em todas as amostras, intensificando-se com o aumento da temperatura, o que indica a formação de estruturas carbonáceas mais condensadas, aromáticas e termicamente estáveis.

A banda em 1710 cm⁻¹, atribuída ao estiramento C=O de grupos carbonila presentes em ésteres ou ácidos carboxílicos (1710–1745 cm⁻¹) (Mimmo *et al.*, 2014), apresentou atenuação progressiva com o aumento da temperatura. Foi mais pronunciada em BIN, moderada em BC300 e praticamente ausente em BC500 e BC700, confirmando a perda de grupos oxigenados e corroborando o aumento de pH observado anteriormente (Seção 3.2). A banda em 1606 cm⁻¹ corresponde às vibrações esqueléticas C=C aromáticas de anéis benzênicos (1600–1650 cm⁻¹) (Fan

et al., 2022). Sua intensidade diminuiu com o aumento da temperatura de pirólise, desaparecendo no BC700, provavelmente devido ao rearranjo dos anéis aromáticos em domínios grafíticos.

Figura 6 - Espectros de FTIR dos biocarvões de casca da castanha de caju produzidos em diferentes temperaturas de pirólise: biomassa bruta (BIN), BC300 (300 °C), BC500 (500 °C) e BC700 (700 °C).



A banda em 1226 cm^{-1} é atribuída aos modos de estiramento C–O de éteres aromáticos (1005–1231 cm^{-1}) (Wystalska; Kwarciak-Kozłowska, 2021), sendo mais intensa em BIN, porém significativamente reduzida nos biocarvões, o que evidencia a degradação térmica de grupos oxigenados. De modo semelhante, a banda em 1021 cm^{-1} , relacionada ao estiramento C–O–C das ligações glicosídicas em polissacarídeos (1020–1030 cm^{-1}) [123], foi mais pronunciada em BIN e enfraqueceu gradualmente com o aumento da temperatura, devido à clivagem dessas ligações. Por fim, os picos em 773 e 702 cm^{-1} correspondem às vibrações fora do plano de C–H típicas das vibrações de anéis aromáticos (400–800 cm^{-1}) (Kaur *et al.*, 2023).

Tabela 4 - Atribuição das bandas de FTIR dos biocarvões de casca da castanha de caju. A tabela apresenta as faixas características de número de onda (cm^{-1}) e seus respectivos modos vibracionais, indicando os grupos funcionais presentes.

Comprimento de onda (cm^{-1}) ¹⁾	Atribuição de bandas	Referências
--	----------------------	-------------

3200-3600	Vibração de estiramento –OH	(Landrat <i>et al.</i> , 2024)
2800–2960 / 1350–1445	Vibração de estiramento/flexão C–H	(Rodriguez Ortiz <i>et al.</i> , 2020; Yang <i>et al.</i> , 2018)
2100-2260	Vibração de estiramento C≡C ou C≡N	(Mahmoud Fodah; Ghosal; Behera, 2021)
1710-1745	Vibração de estiramento C=O	(Mimmo <i>et al.</i> , 2014)
1600-1650	Vibração de estiramento C=C	(Fan <i>et al.</i> , 2022)
1005-1231	Vibração de estiramento C–O	(Wystalska; Kwarciak-Kozłowska, 2021)
1020–1030	Vibração de estiramento C–O–C	(Abdoul Magid <i>et al.</i> , 2021)
400-800	Vibração de flexão C–H fora do plano	(Kaur <i>et al.</i> , 2023)

5.4 Análise morfológica e da composição inorgânica

A Figura 7 apresenta as análises por MEV EDS dos biocarvões e da biomassa de casca de castanha de caju não tratada. As composições elementares obtidas por EDS e análise CHN diferem levemente, principalmente devido às distintas metodologias analíticas empregadas (Mishra; Chinnam; Sharma, 2025).

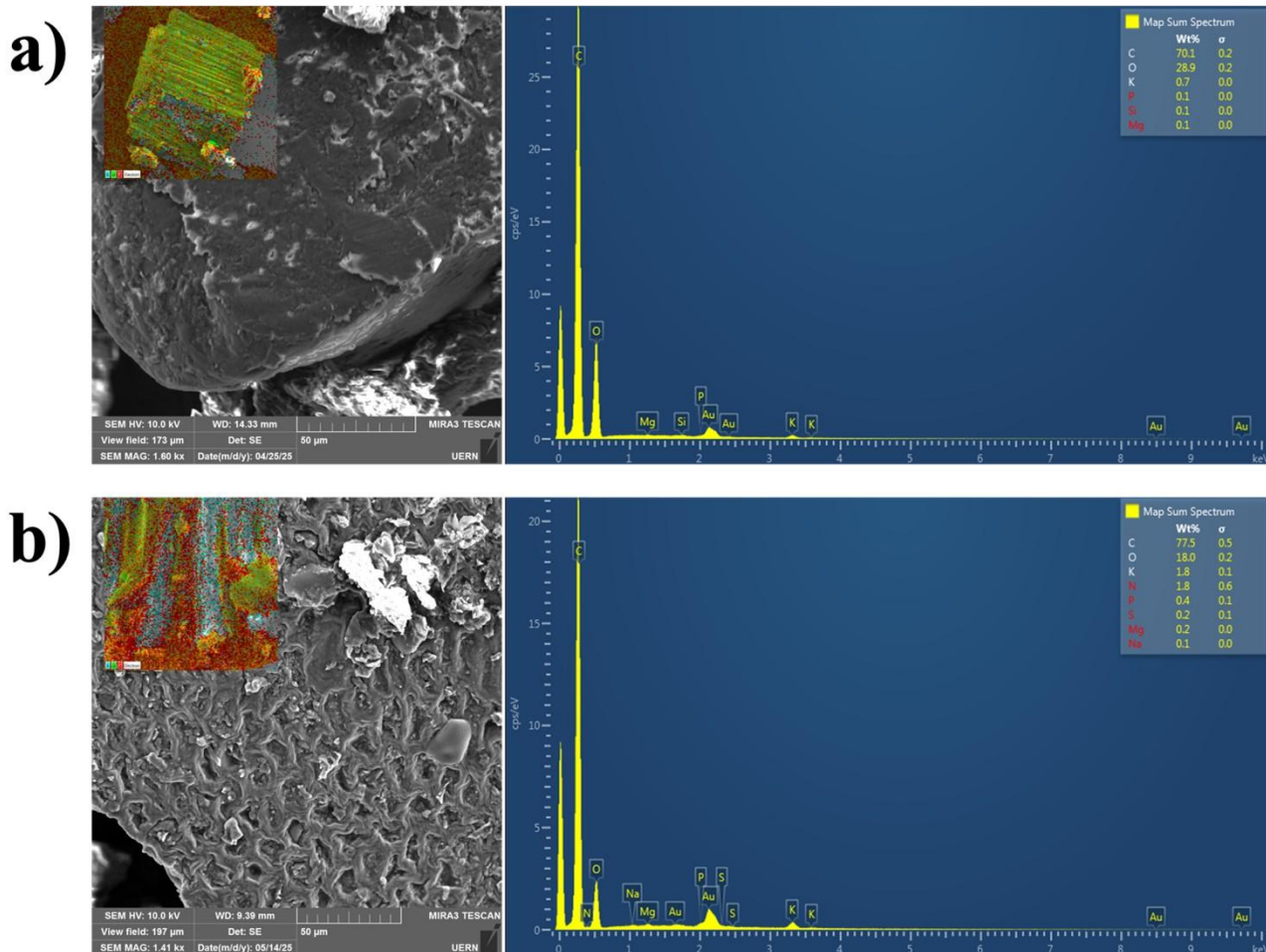
Na Figura 7a, a biomassa bruta (BIN) apresenta uma superfície irregular e heterogênea, sem poros bem definidos, com resíduos orgânicos distribuídos ao longo da superfície. O espectro de EDS confirmou a presença de elementos inorgânicos, notadamente sódio (Na), potássio (K) e silício (Si).

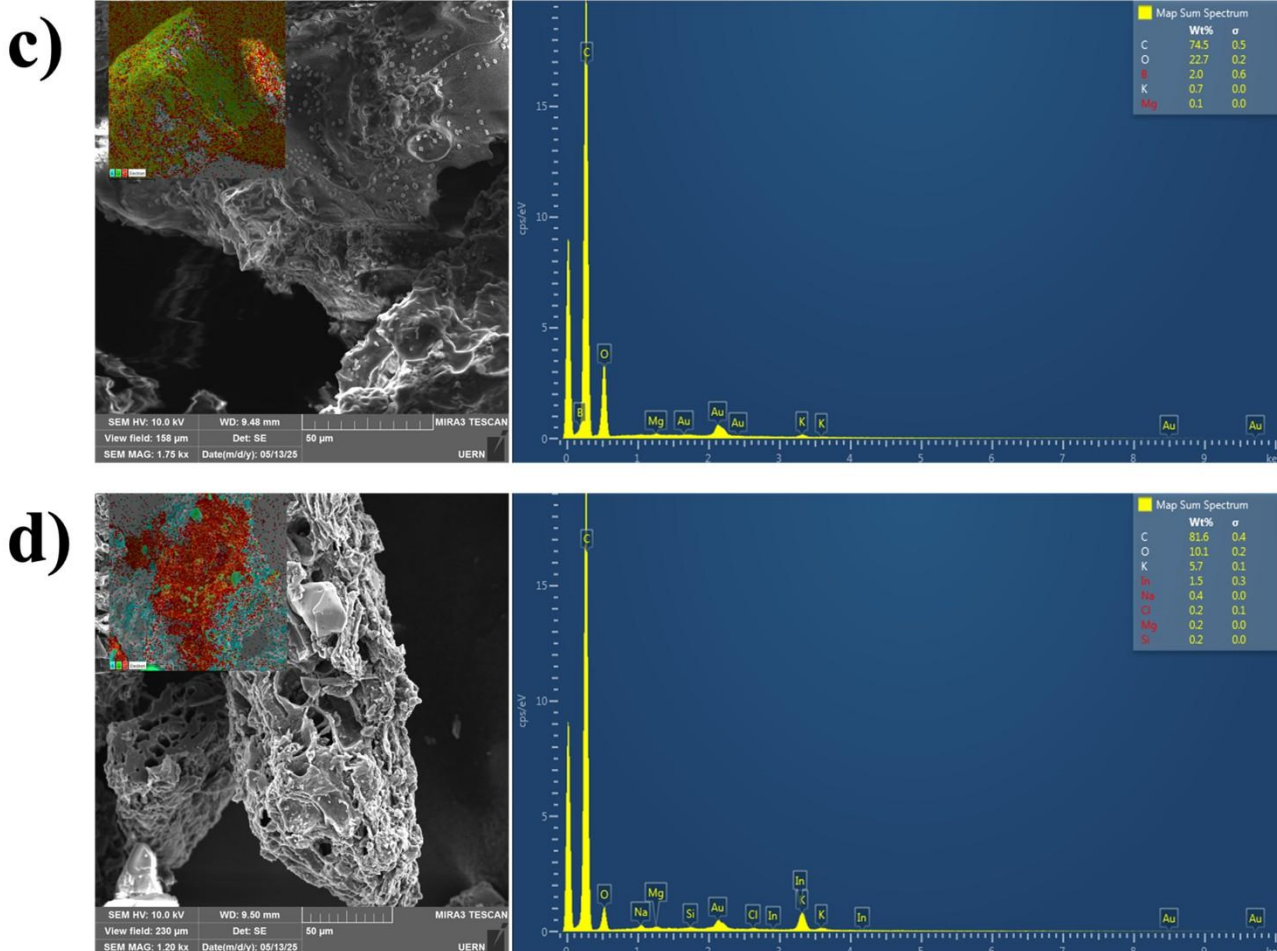
A Figura 7b mostra a micrografia do BC300, que ainda preserva características da matéria-prima, como materiais voláteis aderidos à superfície e uma camada orgânica densa que não foi totalmente degradada. Em comparação com o BIN, observa-se um menor número de fissuras e regiões fragmentadas.

Em contraste, a Figura 7c revela o desenvolvimento de uma estrutura mais porosa no BC500, decorrente da maior degradação térmica dos compostos voláteis. A superfície apresenta maior rugosidade e irregularidade, além de menor densidade orgânica, sugerindo a formação de uma matriz carbonácea típica de biocarvões. A análise por EDS de BC300 e BC500 mostrou um aumento acentuado no teor de carbono (ver Seção 5.1) e uma forte redução das frações inorgânicas, com apenas traços de K detectados e quase total ausência de outros elementos minerais. Esses achados corroboram as tendências de pH e CE discutidas anteriormente (Seção 5.1), particularmente o valor mais elevado de CE do BIN em comparação a BC300 e BC500.

A Figura 7d mostra a micrografia do BC700, nota-se a presença de poros aparentes e maior fissuração superficial em relação às demais amostras. Observações semelhantes foram relatadas para biocarvões de casca da castanha de caju produzidos em temperaturas elevadas (Fonseca-Bermúdez *et al.*, 2024). A alta temperatura de pirólise promoveu a decomposição de celulose, hemicelulose e lignina, resultando em intensa volatilização orgânica e na formação de cavidades bem definidas e irregularidades na superfície do biocarvão.

Figura 7 - Micrografias por SEM com mapeamento elemental por EDS e espectros em diferentes estágios de pirólise: (a) biomassa bruta (BIN), (b) biocarvão produzido a 300 °C, (c) biocarvão produzido a 500 °C e (d) biocarvão produzido a 700 °C.

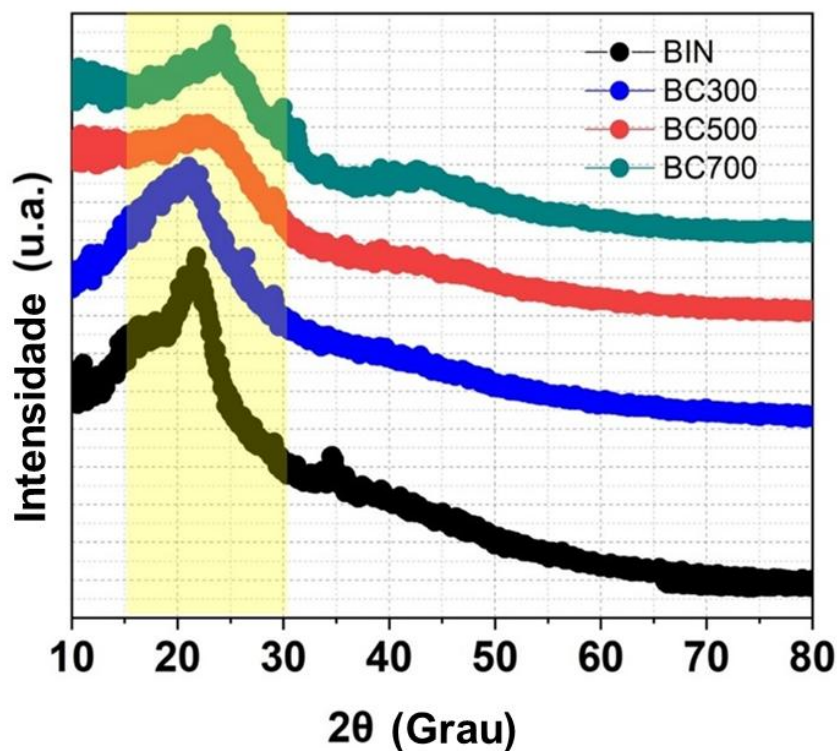




A Figura 8 apresenta os difratogramas de DRX da biomassa bruta e dos biocarvões produzidos a diferentes temperaturas de pirólise. Na faixa de 2θ de 15° – 30° , observa-se um pico de difração largo, característico de materiais carbonáceos amorfos, associado ao plano (002) do carbono turbosétrico (Song *et al.*, 2025). O pico mais largo em BIN indica uma estrutura mais desordenada, provavelmente devido ao elevado teor de celulose, hemicelulose e lignina presente em sua superfície (Yakout, 2017b).

À medida que a temperatura de pirólise aumenta, a intensidade do pico diminui e sua largura se estreita, especialmente para BC500 e BC700, sugerindo um grau mais elevado de grafitização e a formação de estruturas com ordenamento semelhante ao do grafite (Potnuri *et al.*, 2023; Song *et al.*, 2025). Esses resultados confirmam que a degradação térmica progressiva promove a reorganização estrutural do carbono, resultando em materiais com maior ordem interna e cristalinidade.

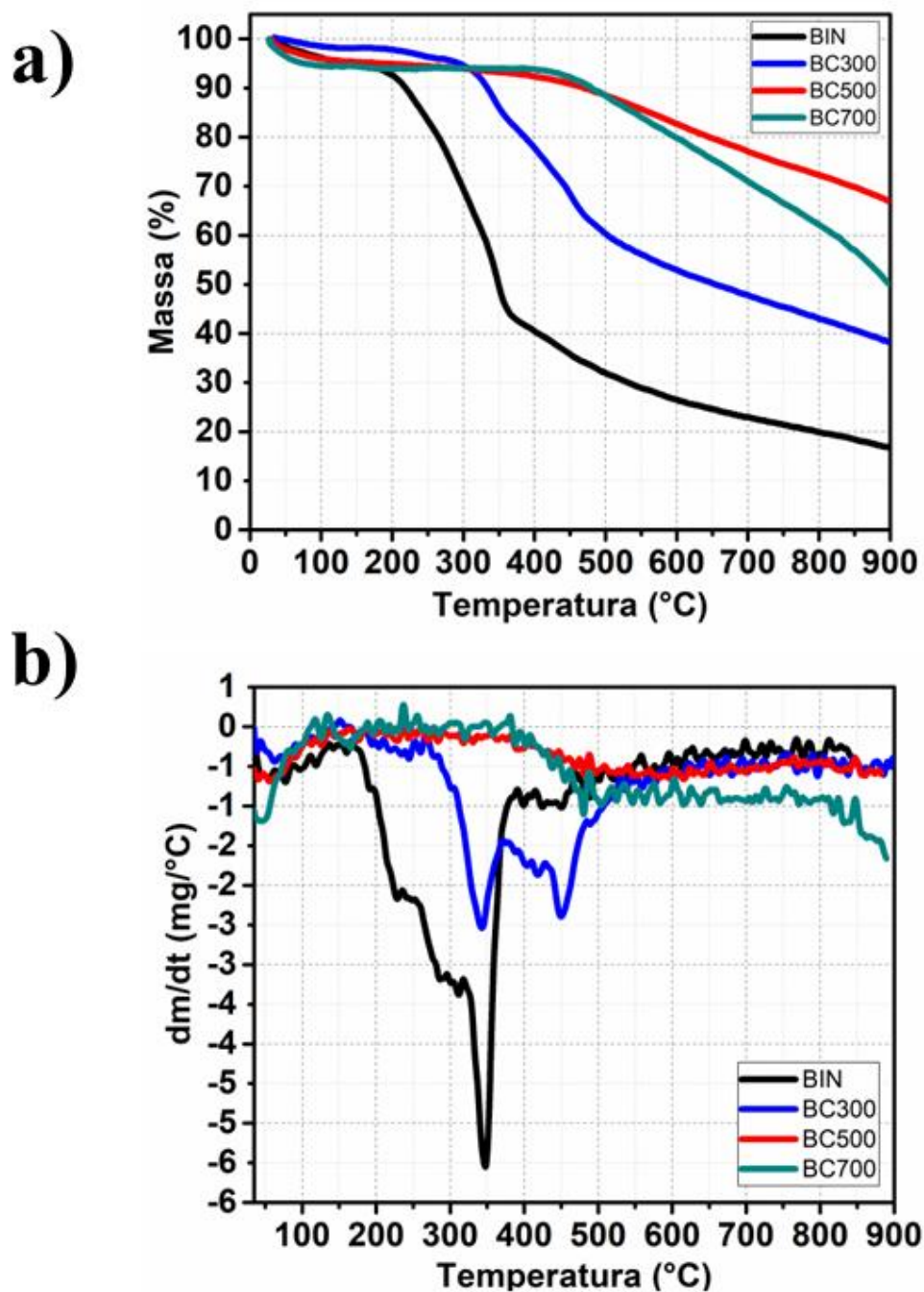
Figura 8 - Difratogramas de XRD dos biocarvões de casca da castanha de caju produzidos em diferentes temperaturas de pirólise: biomassa bruta (BIN), BC300 (300 °C), BC500 (500 °C) e BC700 (700 °C).



5.5 Análises TGA/DTG/DSC da biomassa bruta e dos biocarvões

As Figuras 9a e 9b apresentam as curvas de TG e DTG da biomassa in natura e dos biocarvões, respectivamente, permitindo identificar as regiões de perda de massa e os picos de decomposição térmica associados a cada etapa. Como esperado, a biomassa in natura apresentou a maior perda de massa com o aumento da temperatura, enquanto os biocarvões demonstraram maior estabilidade térmica, especialmente os produzidos a 500 e 700 °C. O aumento da temperatura de pirólise promove a decomposição de compostos orgânicos derivados de celulose, hemicelulose e lignina, conduzindo à formação de estruturas carbonáceas mais termicamente estáveis (Li; Chen, 2018b).

Figura 9 - (a) Análise termogravimétrica (TG) e (b) curvas derivadas termogravimétricas (DTG) dos biocarvões de casca da castanha de caju produzidos em diferentes temperaturas de pirólise: biomassa in natura (BIN), BC300 (300 °C), BC500 (500 °C) e BC700 (700 °C).



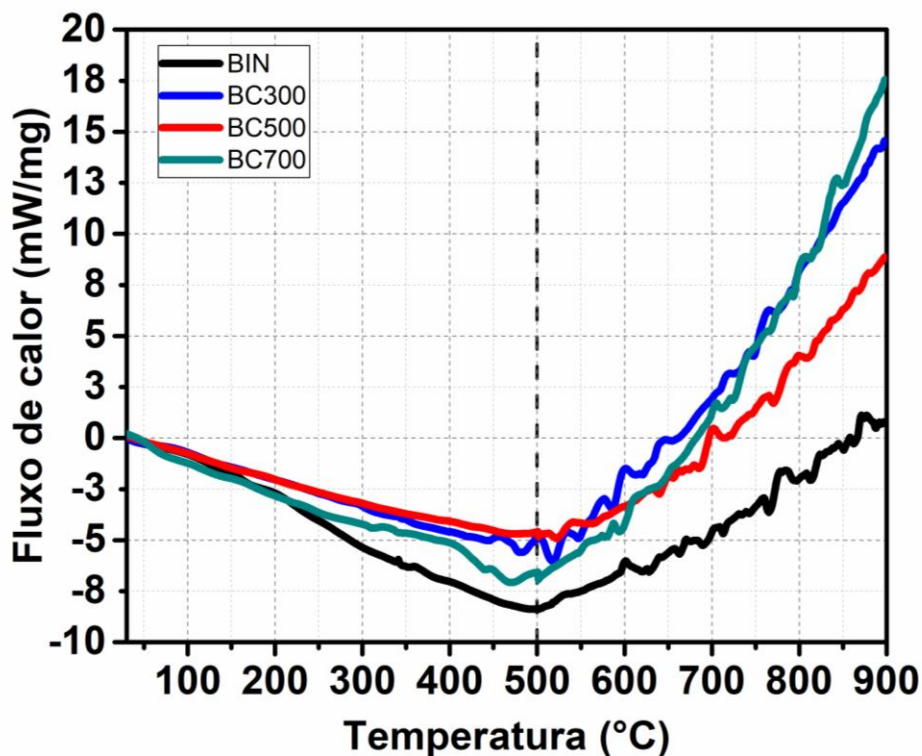
As primeiras perdas de massa (25–150 °C) são atribuídas à evaporação da umidade presente na estrutura do material (Ma *et al.*, 2015). Na BIN, observou-se um declínio acentuado entre 200 e 360 °C, correspondente à decomposição da hemicelulose e da celulose (Wu *et al.*,

2022). Uma redução mais gradual de massa ocorreu entre 360 e 900 °C, relacionada à degradação da lignina (Petrovič *et al.*, 2021).

A amostra BC300 apresentou um perfil semelhante ao da BIN, com um evento distinto de perda de massa entre 312 e 475 °C, atribuído à decomposição de frações orgânicas remanescentes após a pirólise. Acima de 475 °C, a curva apresenta uma região estável, na qual ocorrem apenas pequenas perdas devido à degradação de resíduos de lignina (Maaoui *et al.*, 2025). A semelhança entre as curvas de BC500 e BC700 indica que a estabilidade térmica do biocarvão torna-se praticamente independente da variação de temperatura em níveis mais elevados de pirólise. Na faixa de 500–900 °C, o BC700 apresentou apenas uma leve perda de massa, associada à degradação de resíduos recalcitrantes de lignina, em concordância com relatos que indicam a decomposição da lignina acima de 550 °C para biocarvões obtidos da casca da castanha de caju (Kaur *et al.*, 2023).

De modo geral, o BC500 apresentou a maior resistência térmica, seguido por BC700 e BC300, o que indica um processo de carbonização mais equilibrado. A análise imediata (Seção 5.1) confirmou que BC500 e BC700 possuem teores de carbono fixo praticamente equivalentes, consistentes com seus perfis de estabilidade térmica, o que evidencia a correlação entre o teor de carbono fixo e a resistência estrutural.

Figura 10 - Curvas de calorimetria exploratória diferencial (DSC) dos biocarvões de casca da castanha de caju produzidos em diferentes temperaturas de pirólise: biomassa in natura (BIN), BC300 (300 °C), BC500 (500 °C) e BC700 (700 °C).



A Figura 10 apresenta a análise DSC da biomassa in natura e dos biocarvões produzidos a diferentes temperaturas de pirólise. Todas as amostras exibiram um perfil térmico semelhante, caracterizado por três eventos principais. O primeiro e o segundo correspondem a transições endotérmicas (30–500 °C), ocorrendo na mesma faixa de temperatura observada nas análises TG/DTG. Esses eventos estão associados à evaporação da umidade e à decomposição de compostos voláteis superficiais, sendo este último mais pronunciado na amostra BIN (Dias *et al.*, 2019; Mangerino *et al.*, 2025).

O terceiro evento, uma transição exotérmica (500–900 °C), reflete a formação e consolidação da matriz carbonácea. Durante esta etapa, o biocarvão se forma na amostra BIN, concomitantemente às reações de pirólise secundária que promovem a degradação das frações residuais e a deposição de carbono adicional na estrutura do material (Dai *et al.*, 2022).

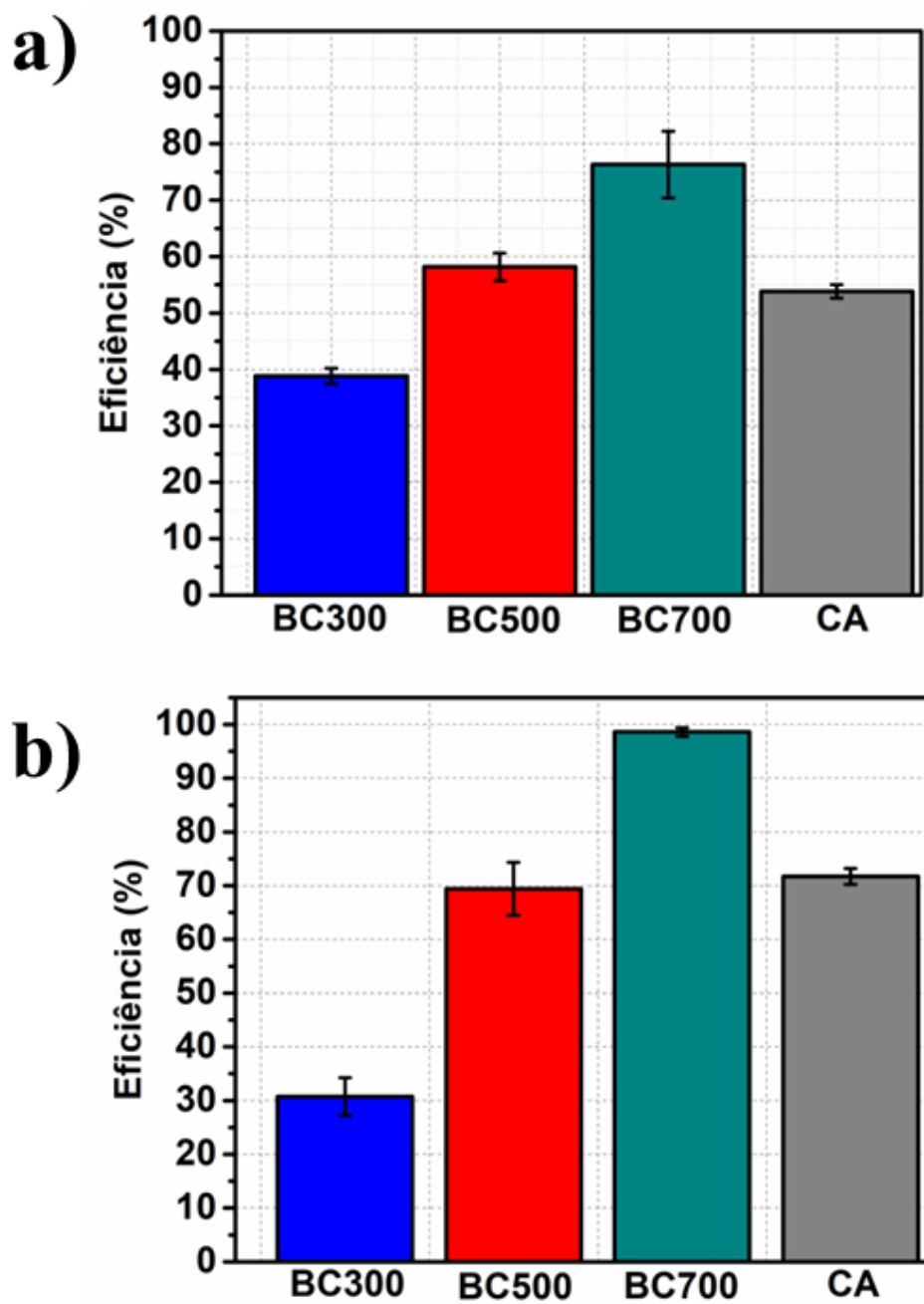
5.6 Desempenho de adsorção e potencial de sequestro de carbono

A Figura 11 mostra as eficiências de remoção dos íons cádmio (Cd^{2+}) e chumbo (Pb^{2+}) por biocarvões produzidos a diferentes temperaturas de pirólise e por carvão ativado comercial (CA). Em ambos os casos, os biocarvões removeram efetivamente os metais pesados, e a eficiência de adsorção aumenta com a temperatura de pirólise. Geralmente, temperaturas mais elevadas resultam em biocarvões com maior área superficial, porosidade, pH e conteúdo mineral. Os principais mecanismos de adsorção para Cd^{2+} e Pb^{2+} incluem complexação, troca catiônica e precipitação (Li *et al.*, 2017; Lin *et al.*, 2025).

Para a remoção de Cd^{2+} (Figura 11a), BC300, BC500 e BC700 atingiram eficiências de 38,83%, 58,16% e 76,32%, respectivamente, enquanto o CA atingiu 53,82%. O desempenho do BC500 foi comparável ao do carvão ativado, sugerindo seu potencial como adsorvente alternativo e economicamente viável. Embora o BC700 tenha apresentado maior eficiência, sua produção requer maior consumo de energia, tornando o BC500 uma opção mais sustentável para aplicações em larga escala.

No caso da remoção de Pb^{2+} (Figura 11b), as eficiências foram, de modo geral, mais elevadas: 30,73% (BC300), 69,44% (BC500) e 98,61% (BC700), em comparação com 71,72% no CA. Tanto os biocarvões quanto o carvão ativado demonstraram maior afinidade pelo Pb^{2+} do que pelo Cd^{2+} , provavelmente devido à complexação mais intensa entre os grupos funcionais da superfície do biocarvão e os íons Pb^{2+} , comportamento consistente com estudos anteriores (Kołodzyńska *et al.*, 2012; Sun *et al.*, 2019).

Figura 11 - Desempenho de adsorção de (a) Cd^{2+} e (b) Pb^{2+} por biocarvões de casca da castanha de caju (BC300, BC500 e BC700) e carvão ativado (CA).



5.7 Potencial de sequestro de carbono dos biocarvões de casca da castanha de caju

O potencial de sequestro de carbono a longo prazo dos biocarvões derivados da casca da castanha de caju (CCC) foi quantificado utilizando os modelos preditivos de Woolf et al. (Woolf *et al.*, 2021) e Puro.Earth (Standard, 2025), ambos estabelecem relações empíricas entre a razão molar H/C e a fração de carbono do biocarvão que permanece estável ao longo de escalas de tempo centenárias. Os resultados, resumidos na Tabela 5 e representados graficamente na Figura 12, revelam um aumento consistente na permanência do carbono à medida que a temperatura de pirólise aumenta.

Segundo o modelo de Woolf, o sequestro estimado em equivalentes de CO₂ aumentou de 0,65 t CO₂ eq t⁻¹ a 300 °C para 2,75 t CO₂ eq t⁻¹ a 700 °C, impulsionado pela aromatização progressiva da matriz de carbono. O framework Puro.Earth apresentou tendências comparáveis, com a fração de carbono persistente (CP) aumentando de 46,7% para 88,6%, corroborando a maior condensação aromática e resistência à oxidação dos biocarvões produzidos sob maior severidade térmica. Essa convergência entre as duas abordagens reforça a robustez dos resultados e evidencia a forte dependência da permanência do carbono em relação à temperatura de pirólise.

A 700 °C, o biocarvão de casca da castanha de caju apresentou parâmetros de estabilidade equivalentes aos relatados para biocarvões de casca da coco (PF ≈ 84–90 %) e superiores aos provenientes de bagaço de cana-de-açúcar (PF ≈ 70 %), confirmando sua classificação como biocarvão de qualidade premium, de acordo com os critérios do Puro.Earth e do IBI (Ibi, 2015; Standard, 2025). Esse nível de estabilidade indica que mais de 85% do seu carbono permanece sequestrado por mais de 100 anos, o que qualifica o material para uso em certificações de créditos de carbono e programas de mitigação climática.

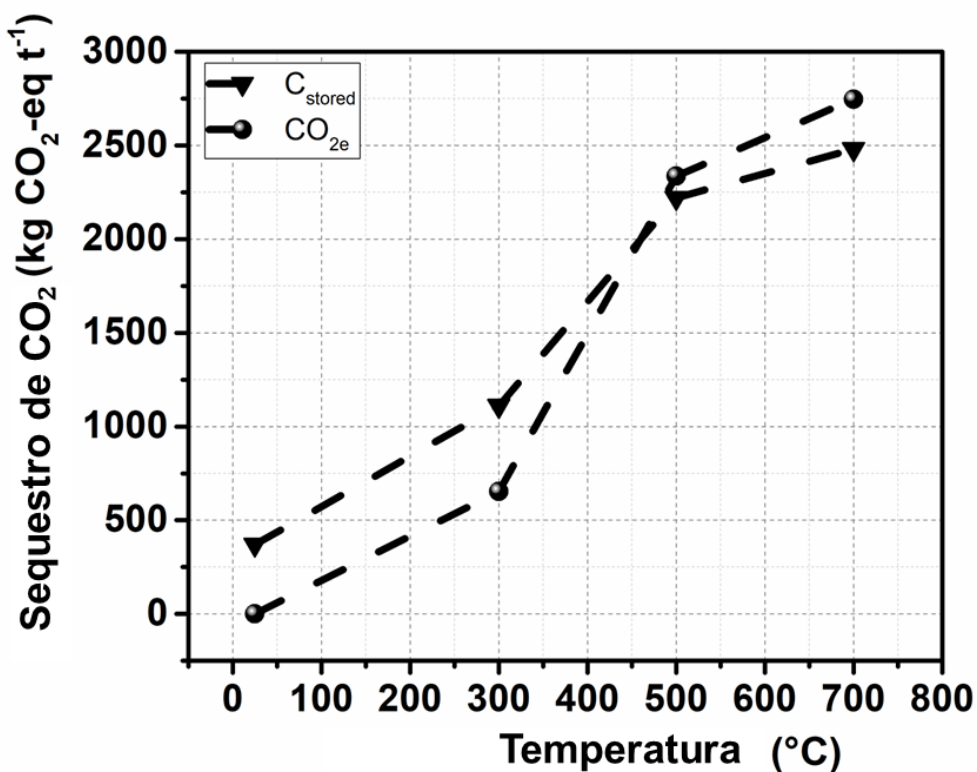
A análise combinada de ambos os modelos demonstra que o biocarvão de casca da castanha de caju produzido a alta temperatura constitui um sumidouro de carbono durável, capaz de imobilizar até 2,5 t CO₂ eq t⁻¹ de material. Esse desempenho posiciona o biocarvão de casca da castanha de caju como uma matéria-prima estratégica para tecnologias de emissões negativas (NETs) e para programas de aumento do carbono do solo. Além de seu potencial como adsorvente, sua integração em estruturas verificadas de remoção de carbono representa uma via escalável e economicamente viável para transformar resíduos agroindustriais em um produto certificadamente carbono-negativo.

Tabela 5 - Parâmetros estimados de estabilidade e sequestro de carbono para biocarvões de casca da castanha de caju produzidos em diferentes temperaturas de pirólise.

Amostras	Woolf et al. (Woolf <i>et al.</i> , 2021)				Pure.Earth (Standard, 2025)			
	C_{hc}	m_{hc}	F_{perm}	CO_{2e}	M	a	CP	C_{stored}
BIN			0	0			20.95	0.37
BC300	0.98	-0.66	0.27	0.65	88,57	39,09	46.74	1.11
BC500			0.85	2.34			80.76	2.22
BC700			0.98	2.75			88.57	2.48

CO_{2e} e C_{stored} : t CO_2eq/t biochar. Valores de F_{perm} abaixo de zero foram ajustados para zero, uma vez que estabilidade de carbono negativa não possui significado físico

Figura 12 - Potencial estimado de sequestro de CO_2 (kg CO_2eq por tonelada de biocarvão) para a biomassa in natura de casca da castanha de caju (BIN), BC300, BC500 e BC700.



6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou que a temperatura de pirólise é um fator decisivo na definição das propriedades estruturais, superficiais e funcionais dos biocarvões de casca da castanha de caju (CCC), influenciando diretamente sua capacidade de remoção de contaminantes e estabilização do carbono. À medida que a temperatura aumentou de 300 para 700 °C, os materiais passaram por uma carbonização progressiva, com melhorias significativas na aromaticidade, no ordenamento

grafítico e na estabilidade térmica, acompanhadas de aumento da alcalinidade superficial e de depleção dos grupos funcionais oxigenados.

Os biocarvões produzidos a 500 °C e 700 °C apresentaram qualidade físico-química superior, atendendo aos critérios do European Biochar Certificate (EBC) e do Puro.Earth para classificação premium. Esses materiais apresentaram alto desempenho na adsorção de metais pesados, alcançando até 98,6% de remoção de Pb^{2+} e 76,3% de Cd^{2+} , além de integridade estrutural robusta e maior resistência à degradação térmica e oxidativa. Além da capacidade de adsorção, a análise de sequestro de carbono revelou um aumento acentuado na permanência de carbono a longo prazo, com a retenção estimada em equivalentes de CO_2 elevando-se de 0,65 para 2,75 t CO_2 eq por tonelada de biocarvão, e a fração de carbono estável alcançando 88,6 % a 700 °C.

Esses achados confirmam que o biocarvão de casca da castanha de caju funciona não apenas como um adsorvente eficiente, mas também como um sumidouro de carbono durável e quantificável, capaz de manter estabilidade ao longo de escalas de tempo centenárias. Sua elevada retenção de carbono, condensação aromática e conformidade com os critérios de certificação destacam seu potencial estratégico em iniciativas de remoção de carbono e programas de mitigação de gases de efeito estufa. De modo geral, a transformação desse abundante resíduo agroindustrial em um material certificado como carbono-negativo representa uma abordagem escalável e sustentável, alinhada aos princípios da economia circular e aos objetivos de neutralidade climática global.

7 REFERÊNCIAS

ABBAS, Qumber *et al.* Contrasting effects of operating conditions and biomass particle size on bulk characteristics and surface chemistry of rice husk derived-biochars. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, [s. l.], vol. 134, p. 281–292, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237017311130>. Acesso em: 29 set. 2025.

ABDOUL MAGID, Abdoul Salam Issiaka *et al.* Enhanced adsorption of polystyrene nanoplastics (PSNPs) onto oxidized corncob biochar with high pyrolysis temperature. *Science of The Total Environment*, [s. l.], vol. 784, p. 147115, 2021. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0048969721021859?via%3Dihub>. Acesso em: 21 ago. 2025.

ÁBREGO, Javier *et al.* Pyrolysis of cashew nutshells: Characterization of products and energy balance. *Energy*, [s. l.], vol. 158, p. 72–80, 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218310648?casa_token=m5O_0H5je

9QAAAAA:TEdgiHxMGCdKqvWcY_NTXLpIGecM_64Ov9_5hxJOW6Lmvs6Sx1P4U1C4zV3mpmaaAC4X_YaX8C2j. Acesso em: 18 ago. 2025.

ADESEMUYI, Mibinuola Florence *et al.* Preparation and characterisation of biochars from elephant grass and their utilisation for aqueous nitrate removal: Effect of pyrolysis temperature. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, [s. l.], vol. 8, no 6, p. 104507, 2020a. Disponível em: Acesso em: 5 mar. 2025.

ADESEMUYI, Mibinuola Florence *et al.* Preparation and characterisation of biochars from elephant grass and their utilisation for aqueous nitrate removal: Effect of pyrolysis temperature. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, [s. l.], vol. 8, no 6, p. 104507, 2020b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343720308563>. Acesso em: 7 jul. 2025.

AHMAD, Mahtab *et al.* Effects of pyrolysis temperature on soybean stover- and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresource Technology*, [s. l.], vol. 118, p. 536–544, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0960852412007869?via%3Dihub>. Acesso em: 31 ago. 2025.

ALSEWAILEH, Abdulaziz S.; USMAN, Adel R.; AL-WABEL, Mohammad I. Effects of pyrolysis temperature on nitrate-nitrogen (NO₃⁻-N) and bromate (BrO₃⁻) adsorption onto date palm biochar. *Journal of Environmental Management*, [s. l.], vol. 237, p. 289–296, 2019. Disponível em: Acesso em: 5 mar. 2025.

ALVES, Elem Patricia Rocha *et al.* Renewable Energy Potential and CO₂ Performance of Main Biomasses Used in Brazil. *Energies* 2023, Vol. 16, Page 3959, [s. l.], vol. 16, no 9, p. 3959, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/9/3959/htm>. Acesso em: 17 nov. 2025.

ANAND, Amrit; GAUTAM, Shalini; RAM, Lal Chand. Feedstock and pyrolysis conditions affect suitability of biochar for various sustainable energy and environmental applications. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, [s. l.], vol. 170, p. 105881, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237023000256?casa_token=h0Ebmzfezi8AAAAA:BArN33r4ve9VtLeVY9h-QiAKbeYepxlbmRrvLcgrVoIrkOkSM-r11sZhDji8hNpU6A14fLkrz__M. Acesso em: 29 set. 2025.

ANGIN, Dilek; ŞENSÖZ, Sevgi. Effect of Pyrolysis Temperature on Chemical and Surface Properties of Biochar of Rapeseed (*Brassica napus* L.). *International Journal of Phytoremediation*, [s. l.], vol. 16, no 7–8, p. 684–693, 2014a. Disponível em: <https://www-tandfonline-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/doi/pdf/10.1080/15226514.2013.856842>. Acesso em: 20 ago. 2025.

ANGIN, Dilek; ŞENSÖZ, Sevgi. Effect of Pyrolysis Temperature on Chemical and Surface Properties of Biochar of Rapeseed (*Brassica napus* L.). *International Journal of Phytoremediation*, [s. l.], vol. 16, no 7–8, p. 684–693, 2014b. Disponível em: <https://www->

tandfonline-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/doi/pdf/10.1080/15226514.2013.856842. Acesso em: 20 ago. 2025.

BAKLY, Salam; AL-JUBOORI, Raed A.; BOWTELL, Les. Macadamia Nutshell Biochar for Nitrate Removal: Effect of Biochar Preparation and Process Parameters. C 2019, Vol. 5, Page 47, [s. l.], vol. 5, no 3, p. 47, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-5629/5/3/47/htm>. Acesso em: 5 mar. 2025.

BALMUK, Gizem *et al.* Effects of pyrolysis temperature and pressure on agronomic properties of biochar. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, [s. l.], vol. 169, p. 105858, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0165237023000025?via%3Dihub>. Acesso em: 4 set. 2025.

BARTOLI, Mattia *et al.* Effect of heating rate and feedstock nature on electrical conductivity of biochar and biochar-based composites. Applications in Energy and Combustion Science, [s. l.], vol. 12, 2022. Disponível em: Acesso em: 21 ago. 2025.

BOLAN, Nanthi *et al.* Soil acidification and the liming potential of biochar. Environmental Pollution, [s. l.], vol. 317, p. 120632, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749122018462?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 20 ago. 2025.

BRAINER, Maria Simone de Castro Pereira. Cajucultura. [s. l.], 2022. Disponível em: <s1dsp01.dmz.bnb:8443/s482-dspace/handle/123456789/1328>. Acesso em: 31 ago. 2025.

CAPANOGLU, Esra; NEMLI, Elifsu; TOMAS-BARBERAN, Francisco. Novel Approaches in the Valorization of Agricultural Wastes and Their Applications. Journal of Agricultural and Food Chemistry, [s. l.], vol. 70, no 23, p. 6787–6804, 2022. Disponível em: [/doi/pdf/10.1021/acs.jafc.1c07104?ref=article_openPDF](/doi/pdf/10.1021/acs.jafc.1c07104?ref=article_openPDF). Acesso em: 19 nov. 2025.

CARNEIRO, Araújo Márcio W. Comportamento da Pecuária do Nordeste no Limiar do Século XXI. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/etene/conjuntura-economica/edicao-especial-15-anos>. Acesso em: 18 nov. 2025.

CHEN, Dengyu *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, [s. l.], vol. 242, p. 112142, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0010218022001596?via%3Dihub>. Acesso em: 19 ago. 2025.

CHIA, Chee H. *et al.* Characterization of an enriched biochar. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, [s. l.], vol. 108, p. 26–34, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0165237014001272?via%3Dihub>. Acesso em: 31 ago. 2025.

CISSE, Ibrahim *et al.* Biochar Derived from Pyrolysis of Common Agricultural Waste Feedstocks and Co-pyrolysis with Low-Density Polyethylene Mulch Film. *Waste and Biomass Valorization*, [s. l.], vol. 13, no 9, p. 3913–3932, 2022. Disponível em: Acesso em: 19 nov. 2025.

CROMBIE, Kyle; MAŠEK, Ondřej. Pyrolysis biochar systems, balance between bioenergy and carbon sequestration. *GCB Bioenergy*, [s. l.], vol. 7, no 2, p. 349–361, 2015. Disponível em: Acesso em: 20 nov. 2025.

CROTMAN, Bruno; BARROS, Marcio O.; OLIVEIRA, Luciano B. Assessing the feasibility of electric energy generation from agricultural waste in Brazil. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, [s. l.], vol. 68, p. 103853, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138824002492?getft_integrator=clarivate&pes=vor&utm_source=clarivate. Acesso em: 17 nov. 2025.

DAI, Qianjin *et al.* Co-pyrolysis biochar derived from sewage sludge and lignin: Synergetic effect and adsorption properties. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, [s. l.], vol. 10, no 3, p. 107898, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2213343722007710?via%3Dihub>. Acesso em: 28 ago. 2025.

DAS, Shaon Kumar *et al.* Compositional heterogeneity of different biochar: Effect of pyrolysis temperature and feedstocks. *Journal of Environmental Management*, [s. l.], vol. 278, p. 111501, 2021a. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720314262?casa_token=l9NITdrHJSkAAAAA:d50LnmDOEuogP-JedLHsLqAzUEkp6nw-T0qGWVut9GSH1WeYWWhh1Fr8QYQDcc-ix3Lo_ELAAaG5Q. Acesso em: 18 ago. 2025.

DAS, Shaon Kumar *et al.* Compositional heterogeneity of different biochar: Effect of pyrolysis temperature and feedstocks. *Journal of Environmental Management*, [s. l.], vol. 278, p. 111501, 2021b. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720314262?casa_token=3V0oYMxiuI4AAAAA:QbnTPvbiC1UiVjMPkEArY_kufgbtTYYKYCmTx02GohfcgTX-t5ypXqOunsciw3Uc7i4qTKhrYLFv. Acesso em: 18 ago. 2025.

DHAR, Sajib Aninda; SAKIB, Tamjid Us; HILARY, Lutfun Naher. Effects of pyrolysis temperature on production and physicochemical characterization of biochar derived from coconut fiber biomass through slow pyrolysis process. *Biomass Conversion and Biorefinery*, [s. l.], vol. 12, no 7, p. 2631–2647, 2022. Disponível em: <https://link-springer-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s13399-020-01116-y>. Acesso em: 18 ago. 2025.

DIAS, Diogenes dos Santos *et al.* Moisture sorption of biochar from banana pseudostem fibers according to the pyrolysis temperature. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, [s. l.], vol. 138, no 5, p. 3825–3832, 2019. Disponível em: <https://link-springer->

com.ez13.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s10973-019-08141-8. Acesso em: 28 ago. 2025.

EBC, European Biochar Certificate. The European Biochar Certificate (EBC). [s. l.], 2023. Disponível em: <http://www.european-biochar.org>. Acesso em: 18 ago. 2025.

EISSA, Riad *et al.* Influence of Biochar Feedstocks on Nitrate Adsorption Capacity. *Earth (Switzerland)*, [s. l.], vol. 5, no 4, p. 1080–1096, 2024.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Precipitação e evaporação - Portal Embrapa. [S. l.], 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-caatinga/clima/precipitacao-e-evaporacao?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 18 nov. 2025.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Produção de castanha do caju cresce 33% em 2022. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/78004497/producao-de-castanha-do-caju-cresce-33-em-2022>. Acesso em: 31 ago. 2025.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Valorização da casca da castanha de caju por meio do aproveitamento do LCC e do resíduo sólido. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/211566/valorizacao-da-casca-da-castanha-de-caju-por-meio-do-aproveitamento-do-lcc-e-do-residuo-solido>. Acesso em: 25 set. 2025.

ENEBE, Matthew C.; RAY, Ram L.; GRIFFIN, Richard W. The impacts of biochar on carbon sequestration, soil processes, and microbial communities: a review. *Biochar* 2025 7:1, [s. l.], vol. 7, no 1, p. 107-, 2025. Disponível em: <https://link.springer-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s42773-025-00499-3>. Acesso em: 22 nov. 2025.

FAN, Xinhui *et al.* Sorption mechanisms of diethyl phthalate by nutshell biochar derived at different pyrolysis temperature. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, [s. l.], vol. 10, no 2, p. 107328, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2213343722002019?via%3Dihub>. Acesso em: 21 ago. 2025.

FATIMA, Iqra *et al.* Abstraction of nitrates and phosphates from water by sawdust- and rice husk-derived biochars: Their potential as N- and P-loaded fertilizer for plant productivity in nutrient deficient soil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, [s. l.], vol. 155, p. 105073, 2021. Disponível em: Acesso em: 5 mar. 2025.

FERRARI, Valdecir *et al.* Pyrolysis: a promising technology for agricultural waste conversion into value-added products. *Environment, Development and Sustainability*, [s. l.], vol. 27, no 8, p. 17957–17991, 2025. Disponível em: Acesso em: 17 nov. 2025.

FONSECA-BERMÚDEZ, Óscar Javier *et al.* Cashew nut shell biomass: A source for high-performance CO₂/CH₄ adsorption in activated carbon. *Journal of CO₂ Utilization*, [s. l.], vol. 83,

p. 102799, 2024. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2212982024001343?via%3Dihub>. Acesso em: 24 ago. 2025.

FORSTER-CARNEIRO, T. *et al.* Biorefinery study of availability of agriculture residues and wastes for integrated biorefineries in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, [s. l.], vol. 77, p. 78–88, 2013. Disponível em: https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/abs/pii/S0921344913001262?getft_integrator=clarivate&pes=vor&utm_source=clarivate. Acesso em: 17 nov. 2025.

FSEHA, Yohanna Haile; SIZIRICI, Banu; YILDIZ, Ibrahim. Manganese and nitrate removal from groundwater using date palm biochar: Application for drinking water. *Environmental Advances*, [s. l.], vol. 8, p. 100237, 2022. Disponível em: Acesso em: 5 mar. 2025.

GAI, Xiapu *et al.* Effects of feedstock and pyrolysis temperature on biochar adsorption of ammonium and nitrate. *PLoS ONE*, [s. l.], vol. 9, no 12, 2014.

GALINATO, Suzette P.; YODER, Jonathan K.; GRANATSTEIN, David. The economic value of biochar in crop production and carbon sequestration. *Energy Policy*, [s. l.], vol. 39, no 10, p. 6344–6350, 2011. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0301421511005672?via%3Dihub>. Acesso em: 31 ago. 2025.

GONÇALVES, Janaína Oliveira *et al.* A Comprehensive Review of Agricultural Residue-Derived Bioadsorbents for Emerging Contaminant Removal. *Water* 2025, Vol. 17, Page 2141, [s. l.], vol. 17, no 14, p. 2141, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/14/2141/htm>. Acesso em: 17 nov. 2025.

HANDISO, Berhane; PÄÄKKÖNEN, Timo; WILSON, Benjamin P. Effect of pyrolysis temperature on the physical and chemical characteristics of pine wood biochar. *Waste Management Bulletin*, [s. l.], vol. 2, no 4, p. 281–287, 2024. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2949750724000981?via%3Dihub>. Acesso em: 4 set. 2025.

HYVÄLUOMA, Jari *et al.* Effects of pyrolysis temperature on the hydrologically relevant porosity of willow biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, [s. l.], vol. 134, p. 446–453, 2018. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1810.07417>. Acesso em: 19 ago. 2025.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção Agrícola - Lavoura Temporária*. [S. l.], 2024a. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/pesquisa/14/10193>. Acesso em: 9 dez. 2025.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção Agrícola - Lavoura Temporária*. [S. l.], 2024b. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/pesquisa/14/10193>. Acesso em: 18 nov. 2025.

IBI, International Biochar Initiative. Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil. [s. l.], 2015. Disponível em: <http://www.biochar-international.org/characterizationstandard>. Acesso em: 19 out. 2025.

IGALAVITHANA, Avanthi Deshani *et al.* Advances and future directions of biochar characterization methods and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, [s. l.], vol. 47, no 23, p. 2275–2330, 2017. Disponível em: https://scholar.google.com/scholar_url?url=https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/10643389.2017.1421844%3Fcasa_token%3DLERX3BIf7rgAAAAA:wPYmKEWb6ztID_w935X8h2zwCTeyY9o0D_y5HbFNyIJGTszaZgMjt4lrXKkm-9ir7O9UBwZ88EmcpeM4pg&hl=pt-BR&sa=T&oi=ucasa&ct=ucasa&ei=ScogaeuyJtToieoPo4rZkQQ&scisig=ABGrvjLa3sIkOG44foYh6RGW57pA. Acesso em: 20 nov. 2025.

IGHALO, Joshua O. *et al.* Flash pyrolysis of biomass: a review of recent advances. *Clean Technologies and Environmental Policy* 2022 24:8, [s. l.], vol. 24, no 8, p. 2349–2363, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-022-02339-5>. Acesso em: 19 nov. 2025.

JAHIRUL, Mohammad I. *et al.* Biofuels Production through Biomass Pyrolysis —A Technological Review. *Energies* 2012, Vol. 5, Pages 4952-5001, [s. l.], vol. 5, no 12, p. 4952–5001, 2012. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/5/12/4952/htm>. Acesso em: 19 nov. 2025.

KADJO, Boua Sidoine *et al.* Production of a high-energy solid biofuel from biochar produced from cashew nut shells. *Cleaner Engineering and Technology*, [s. l.], vol. 21, p. 100776, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790824000569?via%3Dihub>. Acesso em: 29 set. 2025.

KAUR, Ramandeep *et al.* Characterization of slow pyrolysis products from three different cashew wastes. *Bioresource Technology*, [s. l.], vol. 376, p. 128859, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852423002857?casa_token=EgI4kGztkuUAAAAA:1JQY0JT5Dg74KDdHAGZS4m2UIJ2-_EPAVPP39cST2-Siu7R5QI2KU-leqgOy4DpqjN9EFeeRGOL1. Acesso em: 19 ago. 2025.

KAZAWADI, Deodatus; NTALIKWA, Justin; KOMBE, Godlisten. Co-production of organic oil phase (OP) and adsorption biochar from cashew nut shells: modeling and optimization of intermediate pyrolysis process. *Biomass Conversion and Biorefinery*, [s. l.], vol. 15, no 2, p. 2587–2601, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-023-05030-x>. Acesso em: 29 set. 2025.

KIM, Soosan *et al.* The valorization of food waste via pyrolysis. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], vol. 259, p. 120816, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620308635?getft_integrator=clarivate&pes=vor&utm_source=clarivate. Acesso em: 19 nov. 2025.

KOŁODYŃSKA, D. *et al.* Kinetic and adsorptive characterization of biochar in metal ions removal. *Chemical Engineering Journal*, [s. l.], vol. 197, p. 295–305, 2012. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1385894712005979?via%3Dihub>. Acesso em: 7 set. 2025.

KUMARI, Anu *et al.* A review and bibliometric analysis on recent modification of biochar for effective and sustainable remediation of heavy metals in aqueous medium. *Discover Chemical Engineering* 2025 5:1, [s. l.], vol. 5, no 1, p. 21-, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s43938-025-00088-7>. Acesso em: 7 dez. 2025.

LACKNER, Maximilian; BESHARATI, Maghsoud. Agricultural Waste: Challenges and Solutions, a Review. *Waste* 2025, Vol. 3, Page 18, [s. l.], vol. 3, no 2, p. 18, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2813-0391/3/2/18/htm>. Acesso em: 18 nov. 2025.

LANDRAT, Marcin *et al.* Assessing the Potential of Teff Husk for Biochar Production through Slow Pyrolysis: Effect of Pyrolysis Temperature on Biochar Yield. *Energies* 2024, Vol. 17, Page 1988, [s. l.], vol. 17, no 9, p. 1988, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/9/1988/htm>. Acesso em: 21 ago. 2025.

LATAF, A. *et al.* The effect of pyrolysis temperature and feedstock on biochar agronomic properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, [s. l.], vol. 168, p. 105728, 2022. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0165237022002984?via%3Dihub>. Acesso em: 21 ago. 2025.

LI, Hongbo *et al.* Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. *Chemosphere*, [s. l.], vol. 178, p. 466–478, 2017. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0045653517304356?via%3Dihub>. Acesso em: 5 set. 2025.

LI, Simeng; CHEN, Gang. Thermogravimetric, thermochemical, and infrared spectral characterization of feedstocks and biochar derived at different pyrolysis temperatures. *Waste Management*, [s. l.], vol. 78, p. 198–207, 2018a. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0956053X18303453?via%3Dihub>. Acesso em: 20 ago. 2025.

LI, Simeng; CHEN, Gang. Thermogravimetric, thermochemical, and infrared spectral characterization of feedstocks and biochar derived at different pyrolysis temperatures. *Waste Management*, [s. l.], vol. 78, p. 198–207, 2018b. Disponível em: Acesso em: 24 ago. 2025.

LI, Simeng; TASNADY, Desarae. Biochar for Soil Carbon Sequestration: Current Knowledge, Mechanisms, and Future Perspectives. *C* 2023, Vol. 9, Page 67, [s. l.], vol. 9, no 3, p. 67, 2023a. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-5629/9/3/67/htm>. Acesso em: 31 ago. 2025.

LI, Simeng; TASNADY, Desarae. Biochar for Soil Carbon Sequestration: Current Knowledge, Mechanisms, and Future Perspectives. *C* 2023, Vol. 9, Page 67, [s. l.], vol. 9, no 3, p. 67, 2023b. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-5629/9/3/67/htm>. Acesso em: 22 nov. 2025.

LIN, Hai *et al.* Effects of biomass components and pyrolysis temperature on the adsorption properties of biochar for heavy metals : A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, [s. l.], vol. 192, p. 107321, 2025. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0165237025003742?via%3Dihub>. Acesso em: 5 set. 2025.

LIU, Tianqi *et al.* Adsorption of cadmium and lead from aqueous solution using modified biochar: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, [s. l.], vol. 10, no 1, p. 106502, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343721014792?getft_integrator=clarivate&pes=vor&utm_source=clarivate. Acesso em: 7 dez. 2025.

LIU, Bin *et al.* Effect of Pyrolysis Temperature on the Carbon Sequestration Capacity of Spent Mushroom Substrate Biochar in the Presence of Mineral Iron. *Molecules* 2024, Vol. 29, Page 5712, [s. l.], vol. 29, no 23, p. 5712, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/29/23/5712/htm>. Acesso em: 20 nov. 2025.

LIU, Zhixin *et al.* Modified biochar: synthesis and mechanism for removal of environmental heavy metals. *Carbon Research* 2022 1:1, [s. l.], vol. 1, no 1, p. 8-, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44246-022-00007-3>. Acesso em: 7 dez. 2025.

LOMONACO, Diego; MELE, Giuseppe; MAZZETTO, Selma E. Cashew Nutshell Liquid (CNSL): From an Agro-industrial Waste to a Sustainable Alternative to Petrochemical Resources. *Cashew Nut Shell Liquid: A Goldfield for Functional Materials*, [s. l.], p. 19–38, 2017. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-47455-7_2. Acesso em: 25 dez. 2025.

LU, Huanliang *et al.* Characterization of sewage sludge-derived biochars from different feedstocks and pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, [s. l.], vol. 102, p. 137–143, 2013. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0165237013000557?via%3Dihub>. Acesso em: 21 ago. 2025.

MA, Yuhui *et al.* A novel magnetic biochar from spent shiitake substrate: characterization and analysis of pyrolysis process. *Biomass Conversion and Biorefinery*, [s. l.], vol. 5, no 4, p. 339–346, 2015. Disponível em: <https://link-springer-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s13399-014-0147-1>. Acesso em: 27 ago. 2025.

MA, Zhongqing *et al.* Evolution of the chemical composition, functional group, pore structure and crystallographic structure of bio-char from palm kernel shell pyrolysis under different temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, [s. l.], vol. 127, p. 350–359, 2017.

Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0165237017304205?via%3Dihub>. Acesso em: 20 ago. 2025.

MAAOUI, Assia *et al.* Impact of pyrolysis process conditions on the features of the biochar from *Opuntia ficus indica* fruit peels. *Biomass Conversion and Biorefinery*, [s. l.], vol. 15, no 6, p. 8771–8791, 2025. Disponível em: <https://link-springer-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s13399-024-05750-8>. Acesso em: 27 ago. 2025.

MAHMOUD FODAH, Ahmed Elsayed; GHOSAL, Manoj Kumar; BEHERA, Debaraj. Bio-oil and biochar from microwave-assisted catalytic pyrolysis of corn stover using sodium carbonate catalyst. *Journal of the Energy Institute*, [s. l.], vol. 94, p. 242–251, 2021. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1743967120301689?via%3Dihub>. Acesso em: 21 ago. 2025.

MANGERINO, Bortoloti Sicchieri Isabela *et al.* Biochars from waste as an additive material in anaerobic co-digestion: Characterization and application in batch and semi-continuous systems. *Fuel*, [s. l.], vol. 381, p. 133342, 2025. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0016236124024918?via%3Dihub>. Acesso em: 28 ago. 2025.

MARIYAM, Sabah *et al.* Biochar yield prediction using response surface methodology: effect of fixed carbon and pyrolysis operating conditions. *Biomass Conversion and Biorefinery*, [s. l.], 2023.

MEYSAMI, Mohammad *et al.* Comparative thermal and structural analysis of biochar from rapeseed meal and *Fraxinus excelsior* sawdust. *Results in Engineering*, [s. l.], vol. 27, p. 106397, 2025. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2590123025024673?via%3Dihub>. Acesso em: 20 nov. 2025.

MIMMO, T. *et al.* Effect of pyrolysis temperature on miscanthus (*Miscanthus × giganteus*) biochar physical, chemical and functional properties. *Biomass and Bioenergy*, [s. l.], vol. 62, p. 149–157, 2014. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0961953414000051?via%3Dihub>. Acesso em: 21 ago. 2025.

MISHRA, Ranjeet Kumar; CHINNAM, Sampath; SHARMA, Abhishek. Thermocatalytic pyrolysis of low-value waste biomass: Thermal decomposition, kinetics behaviour, and biochar characterization. *Results in Engineering*, [s. l.], vol. 25, p. 104210, 2025. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2590123025002968?via%3Dihub>. Acesso em: 23 ago. 2025.

MOISEENKO, Konstantin V. *et al.* Relation between lignin molecular profile and fungal exo-proteome during kraft lignin modification by *Trametes hirsuta* LE-BIN 072. *Bioresource Technology*, [s. l.], vol. 335, p. 125229, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085242100568X?casa_token=l-BRa1K2Rh4AAAAA:IlhqUlqorBH0txxlzg6zk70D9XkIvp83oeONZ5RY8I2QrU8fVkB1QgYfjzu3jcG2QN9Z1tv_kjgK. Acesso em: 18 ago. 2025.

MOKRZYCKI, Jakub; MAGDZIARZ, Aneta; RUTKOWSKI, Piotr. The influence of the *Miscanthus giganteus* pyrolysis temperature on the application of obtained biochars as solid biofuels and precursors of high surface area activated carbons. *Biomass and Bioenergy*, [s. l.], vol. 164, p. 106550, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953422002124?casa_token=vGLu__R0kpoAAAAA:mYjU7tgoc78HkAs_18VsRZU-Aw4mGj65mPgNamZfcstRxtv7rxYoVk8N49Xo1BLOKiDDtRxWGzAU. Acesso em: 19 ago. 2025.

MOREIRA, Renata *et al.* Production of Biochar, Bio-Oil and Synthesis Gas from Cashew Nut Shell by Slow Pyrolysis. *Waste and Biomass Valorization*, [s. l.], vol. 8, no 1, p. 217–224, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-016-9569-2>. Acesso em: 19 ago. 2025.

MUKHERJEE, A.; ZIMMERMAN, A. R.; HARRIS, W. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma*, [s. l.], vol. 163, no 3–4, p. 247–255, 2011.

N. S. CHAUHAN, R. Nath. Effect of Moisture Content on Engineering Properties of Cashew Nut. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, [s. l.], vol. 10, no 2, p. 3042–3052, 2021.

NAM, Nguyen Hong *et al.* Pyrolysis of cashew nut shell: A parametric study. *Vietnam Journal of Chemistry*, [s. l.], vol. 58, no 4, p. 506–511, 2020. Disponível em: [/doi/pdf/10.1002/vjch.202000015](https://doi/pdf/10.1002/vjch.202000015). Acesso em: 29 set. 2025.

NGUYEN, Thi Kim Tuyen *et al.* Boosting acetaminophen degradation in water by peracetic acid activation: A novel approach using chestnut shell-derived biochar at varied pyrolysis temperatures. *Environmental Research*, [s. l.], vol. 252, p. 119143, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001393512401048X?via%3Dihub>. Acesso em: 7 jul. 2025.

NGUYEN, C. H. *et al.* Renewable Surfactants from Cashew Nut Shell Liquid: Synthesis, Characterization and Application. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, [s. l.], vol. 56, no 6, p. 1075–1087, 2022. Disponível em: <https://link-springer-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/article/10.1134/S0040579522060136>. Acesso em: 4 set. 2025.

OLIVEIRA, Grayce Kelly Carvalho de *et al.* Resíduos agrícolas do nordeste brasileiro e seu potencial lignocelulósico. [s. l.], 2019. Disponível em: <https://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/12608>. Acesso em: 18 nov. 2025.

PETROVIČ, Aleksandra *et al.* Pyrolysis of solid digestate from sewage sludge and lignocellulosic biomass: Kinetic and thermodynamic analysis, characterization of biochar. Sustainability (Switzerland), [s. l.], vol. 13, no 17, p. 9642, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/17/9642/htm>. Acesso em: 27 ago. 2025.

PIRES MORENO M. A; MATTIAZZO EMILIA M. Avaliação da Viabilidade do Uso de Resíduos na Agricultura. [s. l.], 2008. Disponível em: Acesso em: 17 nov. 2025.

POTNURI, Ramesh *et al.* Two-step synthesis of biochar using torrefaction and microwave-assisted pyrolysis: Understanding the effects of torrefaction temperature and catalyst loading. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, [s. l.], vol. 175, p. 106191, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0165237023003352?via%3Dihub>. Acesso em: 7 set. 2025.

QURESHI, Khan Muhammad *et al.* Pyrolysis of palm kernel shell using screw-assisted fluidization: effect of heating rate. Brazilian Journal of Chemical Engineering, [s. l.], vol. 39, no 3, p. 619–629, 2022.

RAHMAT, Ali *et al.* Effect of Pyrolysis Temperature on the Properties of Biochar Derived from Melinjo Seed Shells. International Journal of Heat and Technology, [s. l.], vol. 42, no 6, p. 1924–1934, 2024. Disponível em: Acesso em: 18 ago. 2025.

RAJENDRAN, Sundarakannan *et al.* Biochar from cashew nut shells: A sustainable reinforcement for enhanced mechanical performance in hemp fibre composites. Cleaner Engineering and Technology, [s. l.], vol. 20, p. 100745, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790824000259?via%3Dihub>. Acesso em: 29 set. 2025.

RAJKOVICH, Shelby *et al.* Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. Biology and Fertility of Soils, [s. l.], vol. 48, no 3, p. 271–284, 2012.

RIBASKI, Jorge; MENEZES, Eduardo A. Agroforestry Systems in the Brazilian Semi-Arid Region. [s. l.], 1994. Disponível em: Acesso em: 18 nov. 2025.

RODRIGUEZ, José Alexander *et al.* Influence of pyrolysis temperature and feedstock on the properties of biochars produced from agricultural and industrial wastes. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, [s. l.], vol. 149, p. 104839, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237020301571?casa_token=FYQeJTPzA1kAAAAA:R4aZ5xMLJk6R4Ox-xLCr34b9dY5c0SixQpz-QVe-ngsbbyxCf1MICTx9brNrszpKhs8BPAiyWhpb. Acesso em: 18 ago. 2025.

RODRIGUEZ ORTIZ, Leandro *et al.* Influence of pyrolysis temperature and bio-waste composition on biochar characteristics. Renewable Energy, [s. l.], vol. 155, p. 837–847, 2020.

Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0960148120305140?via%3Dihub>. Acesso em: 21 ago. 2025.

ROSHAN, Akash; GHOSH, Dipita; MAITI, Subodh Kumar. How temperature affects biochar properties for application in coal mine spoils? A meta-analysis. *Carbon Research*, [s. l.], vol. 2, no 1, p. 1–17, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44246-022-00033-1>. Acesso em: 21 ago. 2025.

SADH, Pardeep Kumar; DUHAN, Surekha; DUHAN, Joginder Singh. Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review. *Bioresources and Bioprocessing* 2018 5:1, [s. l.], vol. 5, no 1, p. 1-, 2018. Disponível em: <https://bioresourcesbioprocessing.springeropen.com/articles/10.1186/s40643-017-0187-z>. Acesso em: 17 nov. 2025.

SAKHIYA, Anil Kumar; ANAND, Abhijeet; KAUSHAL, Priyanka. Production, activation, and applications of biochar in recent times. *Biochar* 2020 2:3, [s. l.], vol. 2, no 3, p. 253–285, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42773-020-00047-1>. Acesso em: 22 nov. 2025.

SBIZZARO, Mariana *et al.* Effect of production temperature in biochar properties from bamboo culm and its influences on atrazine adsorption from aqueous systems. *Journal of Molecular Liquids*, [s. l.], vol. 343, p. 117667, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0167732221023928?via%3Dihub>. Acesso em: 21 ago. 2025.

SHER, Farooq *et al.* Development of biomass derived highly porous fast adsorbents for post-combustion CO₂ capture. *Fuel*, [s. l.], vol. 282, 2020.

SILVA, Chastryane *et al.* Evaluation of Babassu Cake Generated in the Extraction of the Oil as Feedstock for Biofuel Production. *Processes*, [s. l.], vol. 11, 2023.

SIQUEIRA, Mylena Uhlig *et al.* Brazilian Agro-industrial Wastes as Potential Textile and Other Raw Materials: a Sustainable Approach. *Materials Circular Economy* 2022 4:1, [s. l.], vol. 4, no 1, p. 9-, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42824-021-00050-2>. Acesso em: 18 nov. 2025.

SMITH, Pete. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Global Change Biology*, [s. l.], vol. 22, no 3, p. 1315–1324, 2016. Disponível em: [/doi/pdf/10.1111/gcb.13178](https://doi.org/10.1111/gcb.13178). Acesso em: 31 ago. 2025.

SONG, Siyuan *et al.* Application of biochar cement-based materials for carbon sequestration. *Construction and Building Materials*, [s. l.], vol. 405, 2023. Disponível em: Acesso em: 31 ago. 2025.

SONG, Yuanbo *et al.* Effect of pyrolysis temperature and heating rate on the physicochemical properties of alkali lignin-derived biochar: A comparative study of fast and slow pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, [s. l.], vol. 191, p. 107236, 2025. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S016523702500289X?via%3Dihub>. Acesso em: 7 set. 2025.

STANDARD, Puro. *Biochar Methodology for CO₂ Removal Edition 2025 V1*. [s. l.], 2025. Disponível em: Acesso em: 19 out. 2025.

SU, Jin Zhou *et al.* Advances and perspectives of iron/biochar composites: Application, influencing factors and characterization methods. *Industrial Crops and Products*, [s. l.], vol. 205, p. 117496, 2023. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S092666902301261X?via%3Dihub>. Acesso em: 31 ago. 2025.

SUN, Chen *et al.* Enhanced adsorption for Pb(II) and Cd(II) of magnetic rice husk biochar by KMnO₄ modification. *Environmental Science and Pollution Research*, [s. l.], vol. 26, no 9, p. 8902–8913, 2019. Disponível em: <https://link-springer-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s11356-019-04321-z>. Acesso em: 7 set. 2025.

TOMCZYK, Agnieszka; SOKOŁOWSKA, Zofia; BOGUTA, Patrycja. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, [s. l.], vol. 19, no 1, p. 191–215, 2020a. Disponível em: <https://link-springer-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s11157-020-09523-3>. Acesso em: 31 ago. 2025.

TOMCZYK, Agnieszka; SOKOŁOWSKA, Zofia; BOGUTA, Patrycja. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, [s. l.], vol. 19, no 1, p. 191–215, 2020b. Disponível em: <https://link-springer-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s11157-020-09523-3>. Acesso em: 19 ago. 2025.

TRAN, Hai Nguyen; YOU, Sheng Jie; CHAO, Huan Ping. Effect of pyrolysis temperatures and times on the adsorption of cadmium onto orange peel derived biochar. *Waste Management and Research*, [s. l.], vol. 34, no 2, p. 129–138, 2016. Disponível em: <https://journals-sagepub-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/doi/10.1177/0734242X15615698>. Acesso em: 21 ago. 2025.

TU, Panfeng *et al.* Influence of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of biochars obtained from herbaceous and woody plants. *Bioresources and Bioprocessing*, [s. l.], vol. 9, no 1, p. 1–12, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/articles/10.1186/s40643-022-00618-z>. Acesso em: 18 ago. 2025.

UCHIMIYA, Minori *et al.* Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, [s. l.], vol. 59, no 6,

p. 2501–2510, 2011. Disponível em: [/doi/pdf/10.1021/jf104206c?ref=article_openPDF](https://doi.org/10.1021/jf104206c?ref=article_openPDF). Acesso em: 19 ago. 2025.

VARKOLU, Mohan *et al.* Recent Advances in Biochar Production, Characterization, and Environmental Applications. *Catalysts* 2025, Vol. 15, Page 243, [s. l.], vol. 15, no 3, p. 243, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4344/15/3/243/htm>. Acesso em: 31 ago. 2025.

VILAS-BOAS, A. C.M. *et al.* Valorisation of residual biomass by pyrolysis: influence of process conditions on products. *Sustainable Energy and Fuels*, [s. l.], vol. 8, no 2, p. 379–396, 2023.

WBC, World Biochar Certificate. World Biochar Certificate (WBC) & Carbon Standards International. [s. l.], 2023. Disponível em: Acesso em: 18 ago. 2025.

WOOLF, Dominic *et al.* Greenhouse Gas Inventory Model for Biochar Additions to Soil. *Environmental Science & Technology*, [s. l.], vol. 55, no 21, p. 14795–14805, 2021. Disponível em: [/doi/pdf/10.1021/acs.est.1c02425?ref=article_openPDF](https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02425?ref=article_openPDF). Acesso em: 14 set. 2025.

WU, Wenzhu *et al.* Catalytic pyrolysis of biogas residues with incineration bottom ash by TG-MS: Kinetics analysis and biochar stability. *Fuel*, [s. l.], vol. 322, p. 124253, 2022. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0016236122011073?via%3Dihub>. Acesso em: 26 ago. 2025.

WYSTALSKA, Katarzyna; KWARCIAK-KOZLOWSKA, Anna. The Effect of Biodegradable Waste Pyrolysis Temperatures on Selected Biochar Properties. *Materials* 2021, Vol. 14, Page 1644, [s. l.], vol. 14, no 7, p. 1644, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/7/1644/htm>. Acesso em: 21 ago. 2025.

XIANG, Wei *et al.* Biochar technology in wastewater treatment: A critical review. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2020.

XIONG, Xinni *et al.* Value-added chemicals from food supply chain wastes: State-of-the-art review and future prospects. *Chemical Engineering Journal*, [s. l.], vol. 375, 2019.

YAKOUT, Sobhy M. Physicochemical Characteristics of Biochar Produced from Rice Straw at Different Pyrolysis Temperature for Soil Amendment and Removal of Organics. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section A - Physical Sciences*, [s. l.], vol. 87, no 2, p. 207–214, 2017a. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40010-017-0343-z>. Acesso em: 19 ago. 2025.

YAKOUT, Sobhy M. Physicochemical Characteristics of Biochar Produced from Rice Straw at Different Pyrolysis Temperature for Soil Amendment and Removal of Organics. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section A - Physical Sciences*, [s. l.], vol. 87, no 2, p. 207–214, 2017b. Disponível em: <https://link-springer-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s40010-017-0343-z>. Acesso em: 7 set. 2025.

YANG, Fan *et al.* Effective sorption of atrazine by biochar colloids and residues derived from different pyrolysis temperatures. *Environmental Science and Pollution Research*, [s. l.], vol. 25, no 19, p. 18528–18539, 2018. Disponível em: <https://link-springer-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s11356-018-2077-0>. Acesso em: 21 ago. 2025.

YU, Kai Ling *et al.* Recent developments on algal biochar production and characterization. *Bioresource Technology*, [s. l.], vol. 246, p. 2–11, 2017. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0960852417313147?via%3Dihub>. Acesso em: 31 ago. 2025.

YULIANA, Maria *et al.* Isolation and characterization of protein isolated from defatted cashew nut shell: Influence of pH and NaCl on solubility and functional properties. *LWT - Food Science and Technology*, [s. l.], vol. 55, no 2, p. 621–626, 2014. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez13.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0023643813003770?via%3Dihub>. Acesso em: 4 set. 2025.

ZHANG, Han *et al.* Coeffect of pyrolysis temperature and potassium phosphate impregnation on characteristics, stability, and adsorption mechanism of phosphorus-enriched biochar. *Bioresource Technology*, [s. l.], vol. 344, p. 126273, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421016151?via%3Dihub>. Acesso em: 18 ago. 2025.

ZHANG, Chaosheng *et al.* The environmental characteristics and applications of biochar. [s. l.], 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2521-1>. Acesso em: 22 nov. 2025.

ZHAO, Ling *et al.* Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. *Journal of Hazardous Materials*, [s. l.], vol. 256–257, p. 1–9, 2013. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389413002707?casa_token=5nT8-CxMLfoAAAAA:IMeZG8B5BRjpwsZi635mbCCKdeaBcySoa7EfBRoX5zZUUI-RdFA6tY95Qd7172ansF2bfhyudI05. Acesso em: 29 set. 2025.

ZOU, Xun *et al.* Impact of high-temperature biomass pyrolysis on biochar formation and composition. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, [s. l.], vol. 179, p. 106463, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237024001189>. Acesso em: 4 set. 2025.