

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE HIDROCHAR DE CASCA DE BANANA
PARA APLICAÇÃO NA REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS EM SISTEMAS
AQUOSOS**

Marcela de Oliveira Brahim Cortêz
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

MARCELA DE OLIVEIRA BRAHIM CORTÊZ

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE HIDROCHAR DE CASCA DE BANANA
PARA APLICAÇÃO NA REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS EM SISTEMAS
AQUOSOS**

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

Orientadora: Renata P. Lopes Moreira

Coorientador: Leandro Rodrigues de Lemos

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

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

T

C828s
2025

Cortez, Marcela de Oliveira Brahim, 1998-

Síntese e caracterização de hidrochar de casca de banana para aplicação na remoção de ferro e manganês em sistemas aquosos / Marcela de Oliveira Brahim Cortez. – Viçosa, MG, 2025.

1 dissertação eletrônica (72 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Renata Pereira Lopes Moreira.

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

Referências bibliográficas: f. 61-72.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.268>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Carbonização. 2. Alteração hidrotermal. 3. Biochar. 4. Biomassa vegetal. 5. Adsorção. 6. Resíduos agrícolas.

7. Água potável - Purificação - Tratamento biológico.

I. Moreira, Renata Pereira Lopes, 1979-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Química. Programa de Pós-Graduação em Agroquímica. III. Título.

CDD 22. ed. 541.361

MARCELA DE OLIVEIRA BRAHIM CORTÊZ

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE HIDROCHAR DE CASCA DE BANANA
PARA APLICAÇÃO NA REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS EM SISTEMAS
AQUOSOS**

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

APROVADA: 25 de fevereiro de 2025.

Assentimento:

Marcela de Oliveira Brahim Cortêz
Autora

Renata Pereira Lopes Moreira
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 18/05/2025 às 15:15:07 e pela orientadora em 18/05/2025 às 21:08:28. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **SHB7.643H.KSM4** e clique no botão 'Validar documento'.

Aos meus pais, Rosária e Marcelo, ao meu irmão, Bernardo, e aos meus
professores, amigos e familiares.

AGRADECIMENTOS

À Deus por permitir que eu vivesse toda essa trajetória e por sempre me conduzir, abençoar, iluminar e me proteger, sempre me dando forças para enfrentar todos os desafios e me ajudando a crescer em cada um deles.

Aos meus pais, Rosária e Marcelo, por mais uma vez sonharem os meus sonhos, sempre me incentivando, me acolhendo e sendo minha base e meu refúgio em todos os momentos vividos. Eles seguraram em minhas mãos em todo o caminho, fazendo de tudo para que eu pudesse alcançar todos os meus objetivos e desejos. Sem eles, eu não teria chegado até aqui.

Ao meu irmão, Bernardo, por ter sido meu companheiro de casa e de vida até aqui. Obrigada por ter estado em todos os momentos, bons e ruins, pois foi essencial para que eu pudesse trilhar esses caminhos.

Aos meus professores por todo ensinamento que recebi. Em especial, à minha orientadora, Renata, por todo acolhimento, oportunidades, conselhos e conversas. Passar pelo mestrado, com a sua orientação, foi muito importante para que eu chegasse aqui. Aprendi muito e cresci, tanto como profissional quanto como pessoa. Com a sua ajuda pude me encontrar na profissão e sou muito grata por tudo.

Ao grupo LaNaQua por todo carinho e ajuda durante esses dois anos de mestrado. Aqui fiz amizades incríveis e pude conhecer profissionais ótimos que me ajudaram muito no processo. Agradeço em especial às grandes amizades que fiz aqui, Karina e Mariele, por todo carinho, paciência, companheirismo, por terem compartilhado tantos sorrisos e conversas e por terem me acolhido em todas as alegrias e tristezas. Vocês são muito especiais para mim.

Aos meus amigos e familiares por sempre me incentivarem a conquistar meus sonhos, por torcerem pelo meu sucesso e por sempre estarem presentes.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Química e ao Programa de Pós-Graduação em Agroquímica pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

À fundação de amparo à pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) (APQ-00083-21e RED-00144-22), ao conselho Nacional de desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), (Processos 312400/2021-7 e 405828/2022-5) . O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“As coisas que Deus fez são boas a seu tempo. Ele pôs, além disso, no seu coração,
a duração inteira, sem que ninguém possa compreender a obra divina de um
extremo ao outro.”
Eclesiastes 3, 11.

RESUMO

CORTÊZ, Marcela de Oliveira Brahim, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2025. **SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE HIDROCHAR DE CASCA DE BANANA PARA APLICAÇÃO NA REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS EM SISTEMAS AQUOSOS.** Orientadora: Renata Pereira Lopes Moreira. Coorientador: Leandro Rodrigues de Lemos.

Dentre os parâmetros de controle da qualidade da água, destacam-se a concentração de Fe e Mn, que trazem problemas como cor e odor indesejáveis à água. Portanto, faz-se necessário a remoção desses íons em sistemas aquosos. Neste sentido, os processos adsorptivos utilizando biocarvões derivados de resíduos agroindustriais podem ser promissores. Diante disso, este trabalho teve como objetivo sintetizar biocarvões a partir de casca de banana para remover ferro e manganês em sistemas aquosos. Um planejamento fatorial 2³ com ponto central foi elaborado para avaliar as variáveis que poderiam ser significativas, como (1) agente de ativação (H₃PO₄ ou NaOH), (2) temperatura (100 e 200 °C) e (3) tempo de residência (8 e 14 h). O ponto central (PC) foi realizado sem agente de ativação, utilizando apenas água no processo, a 150 °C e 11 horas. Foram sintetizados 10 biocarvões codificados por BC. Desses 10, 3 biocarvões (BC2, BC5 e BC9) foram submetidos a tratamento térmico a 300 °C por 1 h, sendo codificados por BCA. Como resultados, obteve-se que os rendimentos dos biocarvões foram superiores a 50%, exceto para BCA2 (40%). O pH_{HPCZ} variou de 4,39 a 6,00, e a concentração de ácidos de Brønsted entre 3,60 e 5,22 mmol g⁻¹. Os biocarvões foram caracterizados por FT-IR identificando a presença de grupos funcionais como carboxilas, hidroxilas, cetonas e amidas. Fez-se uma triagem com os biocarvões na remoção de Fe²⁺ e Mn²⁺ ([Fe²⁺] ou [Mn²⁺] = 10 mg L⁻¹, sem ajuste de pH, 25 °C, 50 mg de BC por 24 h). A resposta do planejamento foi a % de remoção, sendo temperatura e tempo as variáveis significativas para ambos os metais. O tempo teve efeito positivo para a adsorção de ferro e manganês, enquanto a temperatura foi negativa para ferro e positiva para Mn. A estabilidade térmica dos BC2, BC5 e BC9 foi ligeiramente maior quando comparada à biomassa. Pela análise de MEV, observou-se que BC9 e BCA9 apresentaram morfologia em forma de placas, sendo identificada a presença de C, O e K por EDS. Os BC apresentaram picos largos entre 15° e 30° indicando uma estrutura amorfa. A área superficial específica foi de 0,156 m² g⁻¹. Esses materiais apresentaram potencial Zeta negativo na faixa de pH entre -2 e -24 mV. Os ensaios de cinética foram realizados para BC9, obtendo-se um tempo de equilíbrio de 200 min para ambos os metais, sendo os modelos pseudo-segunda ordem que melhor se ajustaram aos dados. Em relação as isothermas, os modelos de Langmuir

para Fe e Freundlich para Mn se ajustaram melhor aos dados, obtendo-se um q_{max} para Fe e Mn, respectivamente, de 33,18 e 19,00 mg g⁻¹. Também foi verificado que não há influência de interferentes na remoção desses metais em água de torneira ($\sigma = 189 \text{ } \mu\text{S}$). Portanto, conclui-se que a adsorção por este biocarvão é um método promissor e ambientalmente correto para remoção de ferro e manganês em sistemas aquosos.

Palavras-chave: Processo hidrotermal; adsorção; carbonização; biomassa; resíduos agroindustriais; ativação térmica

ABSTRACT

CORTÊZ, Marcela de Oliveira Brahim, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2025. **SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF BANANA PEEL HYDROCHAR FOR APPLICATION IN THE REMOVAL OF IRON AND MANGANESE IN AQUEOUS SYSTEMS.** Adviser: Renata Pereira Lopes Moreira. Co-adviser: Leandro Rodrigues de Lemos.

Among the water quality control parameters, the determination of Fe and Mn concentration stands out, as they can cause undesirable color and odor in water. Therefore, it is necessary to develop solutions that promote the removal of these ions in aqueous systems. In this sense, adsorptive processes using biochars derived from agro-industrial waste can be quite promising. Accordingly, this study aimed to synthesize biochars from banana peels to remove iron and manganese in aqueous systems. A factorial design of 23 with a central point was developed to evaluate the variables that could be significant in the process, such as (1) activation agent (H₃PO₄ or NaOH), (2) temperature (100 and 200 °C), and (3) residence time (8 and 14 hours). The central point (CP) was carried out without an activation agent, using only water in the process, at 150 °C for 11 hours. Ten biochars coded by BC were synthesized. Of these 10, 3 biochars (BC2, BC5 and BC9) were subjected to thermal treatment at 300 °C for 1 hour, being coded as BCA. The yields of the biochars were over 50%, except for BCA2 (40%). The pH of the point of zero charge (pHZPC) varied from 4.39 to 6.00, and the concentration of Brønsted acids ranged between 3,60 and 5,22 mmol g⁻¹. The biochars were characterized by FT-IR, identifying the presence of functional groups such as carboxyls, hydroxyls, ketones, and amides. A screening was performed with the synthesized biochars for the removal of Fe²⁺ and Mn²⁺ ([Fe²⁺] or [Mn²⁺] = 10 mg L⁻¹, without pH adjustment, 25 °C, 50 mg of BC for 24 h). The response of the design was the percentage of removal, with temperature and time being the significant variables for both metals. Time had a positive effect on manganese adsorption and a negative effect on iron, while temperature was negative for iron and positive for Mn. The thermal stability of BC2, BC5, and BC9 was slightly greater compared to the biomass. SEM analysis showed that BC9 and BCA9 exhibited a plate-like morphology, and the presence of C, O, and K was identified by EDS. The biochars showed broad peaks between 15° and 30°, indicating an amorphous structure. The specific surface area was 0.156 m² g⁻¹. These materials presented a negative Zeta potential in the pH range between -2 and -24 mV. Kinetic tests were performed for BC9, achieving an equilibrium time of 200 minutes for both metals, with pseudo-second-order models best fitting the data. Regarding the isotherms, the Langmuir

models for Fe and Freundlich for Mn fit the data better, achieving a q_{max} for Fe and Mn, respectively, of 33,18 and 19,00 mg g⁻¹, comparable to literature values. The influence of interferences on the removal of these metals in tap water ($\sigma = 189$ mS) was also evaluated, observing that the removal was very similar to that obtained in type I water. Therefore, it can be concluded that adsorption using this biochar stands out as a promising and environmentally friendly method for removing iron and manganese in aqueous systems.

Keywords: Hydrothermal process; adsorption; carbonization; biomass; agro-industrial waste; thermal activation

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 Estação de tratamento de água (UFV).....	19
Figura 1.2 . Diagrama de Pourbaix de (a) ferro em solução aquosa a 25 °C - $[\text{Fe}^{2+}]=10^{-4}$ mol/L e $[\text{Fe}^{3+}]=10^{-6}$ mol/L (OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2018) e (b) manganês.....	21
Figura 1.3. Esquema representando o processo de adsorção.....	22
Figura 1.4. Diagrama de fases da água representando.....	26
Figura 1.5. Esquema de uma estrutura de um biocarvão produzido por processo hidrotermal.	27
Figura 1.6. Estrutura da biomassa lignocelulósica.	28
Figura 1.7. Estrutura da banana.	29
Figura 2.1. Autoclave inoxidável (a) e tubo de teflon (b).....	33
Figura 2.2. Biocarvões obtidos a partir de casca de banana	40
Figura 2.3. Diagrama de Van Krevelen para os biocarvões, biomassa, biocarvões ativados e biomassa ativada.	42
Figura 2.4. Determinação de (a) pH_{Pcz} e (b) a concentração de H^+ (mmol g^{-1}) dos biocarvões	43
Figura 2.5. FTIR para os biocarvões (BC).....	44
Figura 2.6. Remoção de Fe e Mn por biocarvões	46
Figura 2.7. Diagrama de Pareto para planejamento fatorial 2^3 (a) ferro e (b) manganês	47
Figura 2.8. Análise termogravimétrica dos biocarvões e biomassa (casca de banana).	48
Figura 2.9. Análise termogravimétrica (TG) e Termogravimetria derivada (DTG) dos biocarvões e biomassa (casca de banana).	49
Figura 2.10. Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos biocarvões BC9 e BCA9 (ativado e não ativado termicamente) e da biomassa de casca de banana.....	50
Figura 2.11. Espectro Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) para biomassa de casca de banana, BC9 e BCA9	50
Figura 2.12. Potencial Zeta dos biocarvões, BC9 e BCA9, e da biomassa.	51
Figura 2.13. Padrão de DRX da biomassa da casca de banana, do BC9 e BCA9	52
Figura 2.14. Análise de fisiossorção de nitrogênio. (A) Biomassa. (B) BC9.....	53
Figura 2.15. Influência do pH inicial do sistema na remoção de íons ferro e manganês pelos biocarvão BC9.	55
Figura 2.16. Estudo cinético de adsorção de (a) ferro e (b) pelo manganês pelo BC9.....	55
Figura 2.17. Isoterma de adsorção de íons ferro (a) e manganês (b) pelos biocarvão BC9 ...	57

Figura 2.18. Regeneração e reuso do BC9. (A) Regeneração do biocarvão BC9 (150 °C, 11 h e sem ativação química) e (B) Reúso do biocarvão BC9 (150 °C, 11 h e sem ativação química).59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Adsorventes e suas aplicações na remoção de contaminantes em sistemas aquosos.	22
Tabela 1.2. Adsorventes utilizados na adsorção de ferro e manganês em sistemas aquosos..	24
Tabela 1.3. Processos termoquímicos	27
Tabela 1.4. Aplicações de biocarvões produzidos pelo processo hidrotermal.....	27
Tabela 1.5. Aplicações de biocarvões produzidos a partir de diferentes partes da banana. ...	29
Tabela 2.1. Planejamento Fatorial Completo com Ponto Central para a síntese de biocarvões a partir da casca de banana.	33
Tabela 2.2. Rendimento (%), análise elementar (C, H, N, S, O), razão H/C e O/C, pH no ponto de carga zero (pH _{PCZ}) e concentração de ácidos de Bronsted dos biocarvões e biomassa.	41
Tabela 2.3. Análise estatística para o planejamento fatorial 2 ³ para avaliar quais as variáveis de síntese dos biocarvões que influenciaram na remoção de ferro.....	46
Tabela 2.4. Parâmetros da análise de fisissorção de nitrogênio da biomassa e do BC9 (150°C, 11 horas e sem ativação química).	54
Tabela 2.5. Parâmetros cinéticos para adsorção de íons ferro e manganês utilizando o biocarvão BC9.	56
Tabela 2.6. Parâmetros isotérmicos para adsorção de íons ferro utilizando o biocarvão BC9.	58
Tabela 2.7. Efeito de matriz na adsorção de ferro e manganês pelo BC9 em água de torneira	59

SUMÁRIO

<i>CAPÍTULO 1</i>	15
1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVOS.....	18
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
3.1. ÍONS FERRO E MANGANÊS EM ÁGUA POTÁVEL	19
3.2. REMOÇÃO POR ADSORÇÃO	21
3.3. BIOCARVÃO	25
3.4. CASCA DE BANANA PARA PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO	28
<i>CAPÍTULO 2</i>	31
1. METODOLOGIA	32
1.1. PADRÕES E REAGENTES.....	32
1.2. SÍNTESE DOS BIOCARVÕES	32
1.2.1. OBTENÇÃO DA BIOMASSA E PROCESSAMENTO	32
1.2.2. CARBONIZAÇÃO HIDROTÉRMICA (HTC) E ATIVAÇÃO QUÍMICA	32
1.2.3. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PARA A CARBONIZAÇÃO HTC.....	33
1.2.4. ATIVAÇÃO TÉRMICA DOS BIOCARVÕES PRODUZIDOS POR HTC.....	34
1.3. CARACTERIZAÇÕES DA BIOMASSA E DOS BIOCARVÕES	34
1.3.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA ELEMENTAR CHNS.....	34
1.3.2. SÍTIOS ÁCIDOS DE BRØNSTED	34
1.3.3. DETERMINAÇÃO DO PONTO DE CARGA ZERO	35
1.3.4. ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER.....	35
1.3.5. DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	35
1.3.6. ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA.....	35
1.3.7. POTENCIAL ZETA.....	36
1.3.8. MICROSCOPIA DE VARREDURA ELETRÔNICA.....	36
1.3.9. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	36
1.3.10. ENSAIOS DE ADSORÇÃO DE FERRO E MANGANÊS POR BIOCARVÕES	36
1.3.11. DETERMINAÇÃO DE FERRO TOTAL E MANGANÊS.....	37
1.3.12. ESTUDO DO EFEITO DE pH.....	37

1.3.13. ESTUDO CINÉTICO DE REMOÇÃO DE Fe E Mn PELOS BIOCARVÕES ..	37
1.3.14. ISOTERMAS DE ADSORÇÃO	38
1.3.15. ESTUDO DO EFEITO DE INTERFERENTES NA ADSORÇÃO DE Fe E Mn	39
1.3.16. REGENERAÇÃO E REÚSO DO BIOCARVÃO	39
2. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
2.1. AVALIAÇÃO DE INTERFERENTES NA ADSORÇÃO DE Fe ²⁺ e Mn ²⁺ PELO BC9	58
3. CONCLUSÃO.....	60
4. PERSPECTIVAS PARA FUTUROS TRABALHOS.....	61
5. REFERÊNCIAS	61

CAPÍTULO 1

Introdução, objetivos e revisão da literatura

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), o acesso à água potável, limpa e segura é um direito fundamental para consumo humano, sendo também garantida pela Portaria Nº 888 de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde. Essa Portaria estabelece procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água, assim como o padrão de potabilidade para distribuí-la à população, garantindo, portanto, a saúde a quem consumi-la. Nesse documento são descritos os Valores Máximos Permitidos (VMP) de algumas substâncias orgânicas, inorgânicas, agrotóxicos e metabólitos e subprodutos de desinfecção após o tratamento da água, visando-se garantir a qualidade para consumo. São descritos também os padrões organolépticos e bacteriológicos. Os parâmetros organolépticos são os fatores que causam sensações sensoriais, influenciando na aceitação para o consumo da água.

A coloração da água é um dos parâmetros organolépticos, que pode ser causada devido à presença de ferro e manganês, deixando a água com uma cor marrom. Diante disso, a Portaria estabelece que o VPM para ferro e manganês são de 0,3 e 0,1 mg L⁻¹, respectivamente. Em valores superiores ao VMP, sugere-se a utilização de processos de remoção como, por exemplo, a oxidação seguida de filtração (DI BERNARDO & DANTAS, 2005). Os processos adsorptivos, os quais vem ganhando bastante destaque na remoção destes metais, também podem ser utilizados (Guimarães et al., 2020)

A adsorção baseia-se na interação entre um adsorvato (contaminantes) e um adsorvente, promovendo a sua remoção da água. Esse processo apresenta baixa demanda de energia, baixo custo e alta eficiência (M. D. da Silva et al., 2023). Entre os adsorventes utilizados, os resíduos agroindustriais tem emergido como biossorventes alinhados com a química verde. Esses materiais possuem em sua composição um alto teor de carbono, que podem ser transformados em produtos com valor agregado. O crescente acúmulo de resíduos agroindustriais tem se tornado uma preocupação ambiental devido ao seu descarte inadequado, podendo acarretar vários problemas ambientais. Portanto, a prática de agregar valor a tais resíduos consiste em uma solução promissora no que tange ao manejo de resíduos sólidos e, também, na remoção eficiente de contaminantes em sistemas aquosos.

Dentre os resíduos agroindustriais, destaca-se a casca de banana. A banana é uma das frutas mais consumidas no mundo e sua produção anual chega a 116,7 milhões de toneladas, representando 16% do total de frutas do mundo (L. Chen et al., 2023). Sendo assim, os resíduos que são descartados se tornam elevados, necessitando de rotas para a reutilização das cascas. A carbonização dessa biomassa produz materiais denominados biocarvões, materiais sólidos e

estáveis que são constituídos essencialmente por carbono (PEREIRA *et al.*, 2022). Esses biocarvões podem ser utilizados como adsorventes.

O biocarvão produto da carbonização da biomassa (LOPES *et al.*, 2022), é um material poroso, cuja estrutura é formada por cadeias carbônicas aromáticas, apresentando grupos funcionais de superfície, como grupos carboxílicos e hidroxila (LOPES; ASTRUC, 2021) que podem auxiliar na adsorção de contaminantes ambientais, incluindo metais.

A utilização de resíduos na conversão de novos materiais com valor agregado para aplicação na remoção de contaminantes em água está alinhado com os objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU (Organização das Nações Unidas), especificamente ao objetivo 3 (saúde e bem-estar), 6 (água potável e saneamento) e 14 (vida na água).

Nesse contexto, este estudo visa a produção de biochar a partir da biomassa de banana para remoção de Fe e Mn em sistemas aquosos.

2. OBJETIVOS

Avaliar diferentes parâmetros para síntese de um biocarvão sustentável, produzido via carbonização hidrotermal, a partir da casca de banana para ser aplicado na remoção de ferro e manganês em água potável.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar diferentes parâmetros da síntese do biocarvão ativado a partir da casca de banana utilizando o planejamento fatorial completo 2^3 ;
- Avaliar o efeito de três parâmetros (i) efeito de dois agentes de ativação (solução de ácido fosfórico e de hidróxido de sódio) e comparar com síntese em água, (ii) temperatura (100 e 200 °C) e (iii) tempo de residência (8, 11 e 14 horas);
- Caracterizar as propriedades físico-químicas, morfológicas e estruturais dos biocarvões utilizando as técnicas Espectroscopia de Absorção na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier; Microscopia Eletrônica de Varredura; Análise Termogravimétrica; Área Superficial Específica e Isoterma BET (Brunauer–Emmett–Teller); Difração de Raios X; Potencial Zeta; Análise Elementar CHNS; Análise Imediata e Ponto de Carga Zero;
- Avaliar a remoção de ferro e manganês em água pela aplicação do biocarvão ativado para selecionar o biocarvão com maior desempenho de remoção desses metais em sistema aquoso;
- Realizar ensaios cinéticos e isotérmicos para determinação dos parâmetros físico-químicos, como a constante cinética e capacidade máxima de adsorção (q_{max}) de ferro e manganês pelo melhor biocarvão;
- Avaliar a influência do pH e da temperatura na adsorção de ferro e manganês em água;
- Avaliar o reúso dos biocarvões.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. ÍONS FERRO E MANGANÊS EM ÁGUA POTÁVEL

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), o acesso à água potável limpa e segura é um direito humano para o seu consumo (GENERAL ASSEMBLY, 2010). Para que a água possa ser consumida e utilizada pela população, deve-se realizar o seu tratamento antes de distribuí-la. Na Figura 1.1 é mostrada um esquema de estação de tratamento de água..

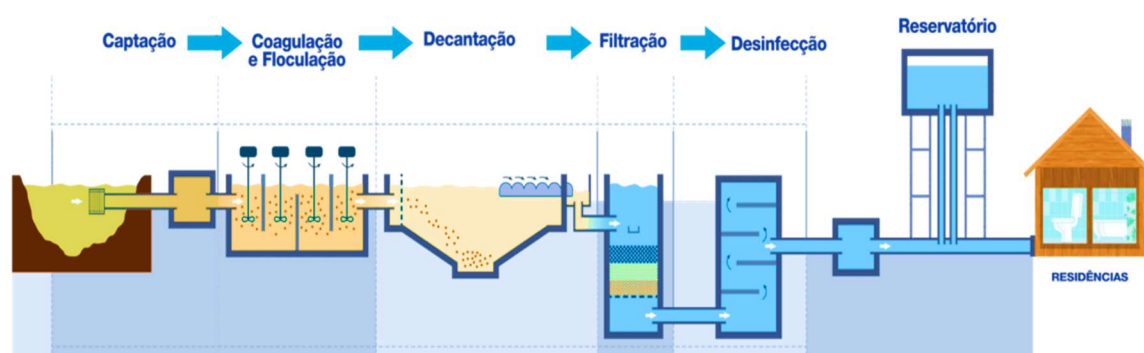


Figura 1.1 Estação de tratamento de água (UFV).

Fonte: Fonte: Caesb, s.d.(adaptado)

O tratamento da água envolve essencialmente 5 etapas: (i) coagulação; (ii) floculação; (iii) decantação; (iv) filtração e (v) desinfecção, para que possa ser distribuída. Esses processos objetivam atender a um padrão de potabilidade, o qual é definido pela Portaria Nº 888 de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde, que dispõe de procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água que é fornecida à população.

Dentre os parâmetros avaliados durante o tratamento de água, destaca-se o padrão organoléptico de potabilidade, que são caracterizados por causarem estímulos sensoriais, podendo afetar a aprovação da água para o seu consumo. Entre as análises requeridas, destaca-se a determinação da concentração de íons ferro e manganês na água potável. Este parâmetro deve ser monitorado pois, de acordo com a Portaria, o valor máximo permitido de concentração de ferro e manganês são de 0,3 e 0,1 mg L⁻¹, respectivamente.

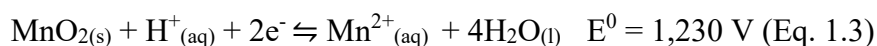
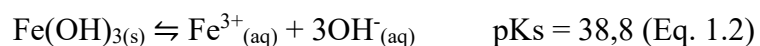
Na crosta terrestre, o ferro é o quarto elemento mais abundante (Y. Liu et al., 2023), o qual desempenha um papel importante na nutrição humana constituindo a estrutura de algumas proteínas e enzimas, como a hemoglobina, por exemplo. A falta deste elemento na alimentação humana pode causar anemia (BORTOLINI e FISBERG, 2010). Porém, o excesso de ferro no

organismo pode causar danos à saúde pois desenvolve efeitos adversos, resultando em importantes doenças humanas, incluindo a hemocromatose.

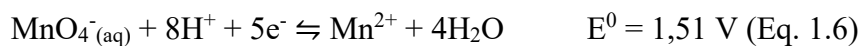
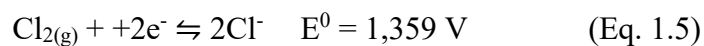
Além disso, o íon ferro está presente em águas naturais nas formas de Fe^{+2} (íons ferrosos) e Fe^{+3} (íons férricos). Em concentrações de ferro maiores que a permitida por lei, ocorrem alguns problemas frequentes como gosto, odor e coloração vermelha amarelada, além de incrustações na tubulação e nas bombas (Soares et al., 2021).

Assim como o ferro, o manganês também é um metal abundante na natureza, além de ser um nutriente essencial para o sistema humano. O íon manganês pode estar em diversos estados de oxidação, variando de -3 a +7. Porém, em água se encontra em sua forma mais estável de oxidação, isto é, +2 (MARSIDI; HASAN; ABDULLAH, 2018).

A coloração na água, devido à presença de ferro e manganês, ocorre devido à presença de oxigênio que promove a oxidação de Fe^{2+} e Mn^{2+} a Fe^{3+} e Mn^{4+} (Eqs. 1.1-1.3). Tais espécies formam compostos insolúveis, os quais se apresentam na forma coloidal e, devido à reflexão da luz, conferem a cor à água (Apolinario et al., 2018).



Sendo assim, surge a necessidade da remoção destes íons no tratamento de água. Convencionalmente, esta remoção pode acontecer pela sua precipitação e filtração; troca iônica, estabilização com polifosfatos ou com o uso de oxidantes (Ali et al., 2021). Porém, o processo mais comum envolve a oxidação para a formação de precipitados, geralmente utilizando oxigênio, cloro ou permanganato de potássio, cujas semirreações de redução são mostradas nas Eqs. 1.4-1.6 seguida da filtração (MORUZZI e REALI, 2012).



Após a oxidação do Fe^{2+} e Mn^{2+} , faz-se a sua precipitação na forma hidróxidos pouco solúveis em água. Vale ressaltar que o pH interfere nesta formação, como mostrado nos diagramas de Pourbaix em solução aquosa (Figuras 1.2 (a)-(b)).

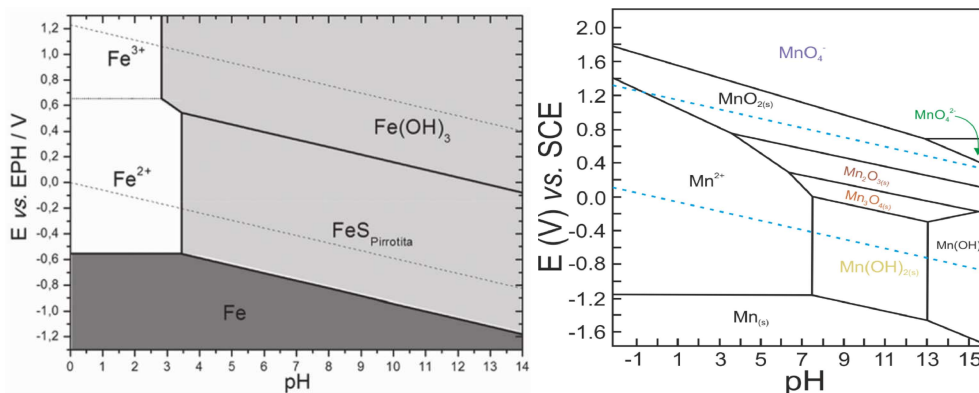


Figura 1.2. Diagrama de Pourbaix de (a) ferro em solução aquosa a 25 °C - $[Fe^{2+}] = 10^{-4}$ mol/L e $[Fe^{3+}] = 10^{-6}$ mol/L (OLIVEIRA *et al.*, 2018) e (b) manganês.

Fonte: (CRAPNELL e BANCOS, 2022).

Nos diagramas de Pourbaix, as linhas contínuas se referem à fronteira de estabilidade eletroquímica de cada espécie em relação ao pH e ao potencial elétrico, enquanto as linhas tracejadas indicam a fronteira de estabilidade da água. Analisando os diagramas, pode-se concluir que, em toda a faixa de pH, o ferro e manganês podem ser oxidados. Além disso, a presença de oxigênio torna o meio mais oxidante, favorecendo a oxidação de Fe^{2+} a Fe^{3+} , que precipita (Oliveira *et al.*, 2018).

3.2. REMOÇÃO POR ADSORÇÃO

Existem vários processos para a remoção de ferro e manganês em água, como, por exemplo, filtração, precipitação, processos biológicos, adsorção e troca iônica (Nkele *et al.*, 2022). A adsorção é um processo baseado na transferência de massa de partículas presentes em uma fase fluida para a superfície de um sólido poroso, por meio de interações físicas ou ligações químicas (Alomar *et al.*, 2024). Tais processos favorecem a separação de componentes, sendo o adsorvato o componente a ser removido do meio. O adsorvente é o material em que o adsorvato será aderido, concentrando-se em sua superfície ou interface (NASCIMENTO *et al.*, 2020). Um esquema do processo é mostrado na Figura 1.3.

Em geral, são utilizados adsorventes com grande área superficial na adsorção. Essa característica permite uma maior remoção de adsorbato do meio, devido à maior disponibilidade de sítios ativos para que ocorra as interações entre as espécies. Além disso, outras características podem interferir neste processo, tais como grupos funcionais, composição e estrutura do adsorvente (PEREIRA LOPES & ASTRUC, 2021a). Outros parâmetros do sistema, como pH; temperatura e tempo de contato do adsorvato com o adsorvente podem afetar a adsorção (Reis *et al.*, 2022).

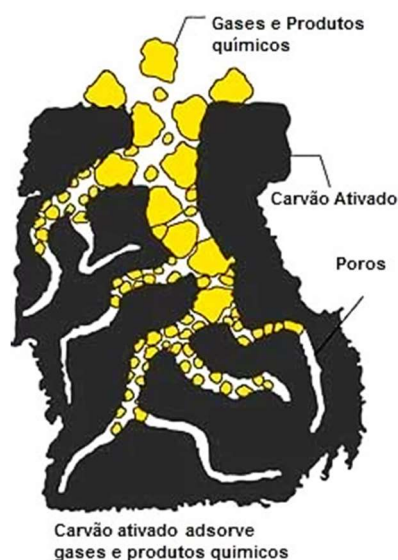


Figura 1.3. Esquema representando o processo de adsorção.
 Fonte: SNATURAL AMBIENTE ([s.d.]

Na Tabela 1.1 são apresentados alguns adsorventes e suas aplicações.

Tabela 1.1. Adsorventes e suas aplicações na remoção de contaminantes em sistemas aquosos

Adsorvente	Aplicação	Referência
MOF-199*	Remoção Cr^{+3} em sistemas aquosos.	MOKRZYCKI et al., (2024)
Ti-PILC*	Remoção de amoxicilina, imipramina, diclofenaco e paracetamol em água.	CHAUHAN; SAINI; SUTHAR, (2020)
Geopolímero poroso	Remoção de cobre, chumbo e azul de metileno em sistemas aquosos.	FANG et al. (2025)
Aerogéis de quitosana reticulado com silsesquioxano	Adsorção de ouro em sistemas aquosos.	DONG & LIU (2025)
Biocarvão à base de casca de noz	Remoção de quinolina em águas residuais.	Y. CUI et al. (2025)

* MOF-199: Rede Metalorgânica formada por um centro metálico de Cu(II) com o ligante orgânico ácido 1,3,5-benzenotricarboxílico; *Ti-PILC: argila montmorilonita porosa intercalada com titânio

O processo de adsorção pode ser caracterizado de duas formas, (i) a quimissorção (adsorção química) e a (ii) fisissorção (adsorção física). A diferença entre essas duas categorias se baseia pelo tipo de interação que acontece entre o adsorvente e o adsorbato. A quimissorção é caracterizada pela formação de uma ligação química ou transferência de elétrons entre o adsorvente e o adsorbato, sendo uma reação irreversível e de alta energia de ativação (RUDI *et*

al., 2020). Por outro lado, a fisissorção é caracterizada pelas interações eletrostáticas entre os materiais e, nesse caso, a reação é reversível, podendo ocorrer a dessorção do adsorvato (RUDI *et al.*, 2020).

Na quimiossorção, o processo ocorre na superfície do adsorvente, ou seja, a adsorção acontece em monocamada (PEREIRA *et al.*, 2023). Neste caso, o processo de regeneração do adsorvente torna-se mais difícil para poder reutilizá-lo. Na fisissorção, como ocorre interações fracas, a remoção pode ocorrer em multicamadas e, portanto, é mais fácil de se regenerar e reutilizar o adsorvente (SHAHMIRZADI *et al.*, 2018).

Para avaliar o grau de remoção ocorrido no processo de adsorção, utiliza-se uma representação gráfica denominada isotermas de adsorção. As isotermas são gráficos que relacionam a capacidade de adsorção do adsorvente (q_e) com a concentração de equilíbrio de adsorvato adsorvido (C_e), em uma temperatura constante (NASCIMENTO *et al.*, 2020). Assim, q_e pode ser calculado de acordo com a Eq. 1.7.

$$q_e = \frac{(c_i - c_e) * V}{m} \quad (\text{Eq. 1.7})$$

Em que V é o volume de solução e a m a massa do adsorvente.

Diferentes materiais podem ser utilizados para a remoção de Fe e Mn em sistemas aquosos. Na Tabela 1.2 são mostrados alguns exemplos de adsorventes.

Tabela 1.2. Adsorventes utilizados na adsorção de ferro e manganês em sistemas aquosos.

Adsorvente	Condições experimentais	Principais resultados	Ref
Carvão ativado imobilizado com ácido tânico	$m_{ads}^1 = 0,1 \text{ g}$ $V_{sol}^2 = 50 \text{ mL}$ $C_{sol}^3 = 1-10 \text{ mg L}^{-1}$ $pH_{Fe(II)} = 4,0$ $pH_{Mn(II)} = 5,4$	$q_e^4 (Fe(II)) = 1,77 \text{ mg g}^{-1}$ $q_e^4 (Mn(II)) = 1,23 \text{ mg g}^{-1}$ $t_{eq}^5 - Fe = 60 \text{ min}$ $t_{eq}^5 - Mn = 60 \text{ min}$	ÜÇER <i>et al.</i> (2006)
Bentonita funcionalizada com amina	$m_{ads}^1 = 0,1 \text{ g}$ $V_{sol}^2 = 50 \text{ mL}$ $C_{sol}^3 = 10-25 \text{ mg L}^{-1}$ de Fe (II)	$q_e^4 = 103,91 \text{ mg g}^{-1}$ $pH = 3,5$ $t_{eq}^5 = 30 \text{ min}$ $T^6 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$	JOHN <i>et al.</i> (2024)
Caroço de damasco	$m_{ads}^1 = 0,1-0,7 \text{ mg}$ $pH_{Fe} = 3-7$ $T = 298-313 \text{ K}$ $C_{sol}^3 = 50-250 \text{ mg L}^{-1}$ de Fe(II) $V_{sol}^2 = 250 \text{ mL}$	$pH = 7$ $q_e^4 = 20 \text{ mg g}^{-1}$ ($C_{sol} = 50 \text{ mg/L}$) $t_{eq}^5 = 80 \text{ min}$	ELSHEREF <i>et al.</i> (2024)
Nanotubos de carbono modificados com Fe ₃ O ₄	$m_{ads}^1 = 5 \text{ mg}$ $V_{sol}^2 = 50 \text{ mL}$ $C_{sol}^3 = 20 \text{ mg L}^{-1}$ de Fe(II) $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$q_e^4 = 197,95 \text{ mg g}^{-1}$ $pH = 8,2$	ALIMOHAMMADI <i>et al.</i> (2017)
Biocarvão de esterco de curral	$m_{ads}^1 = 0,25 \text{ g}$ $V_{sol}^2 = 20 \text{ mL}$ $C_{sol}^3 = 50 \text{ mg L}^{-1}$ de Mn(II) $T = 24,85^\circ\text{C}$	$q_e^4 = 6,652 \text{ mg g}^{-1}$ $pH = 6$ $t_{eq}^5 = 60 \text{ min}$	IDREES <i>et al.</i> (2018)
Biocarvão de esterco de aves	$m_{ads}^1 = 0,25 \text{ g}$ $V_{sol}^2 = 20 \text{ mL}$ $C_{sol}^3 = 50 \text{ mg L}^{-1}$ de Mn (II) $T = 24,85^\circ\text{C}$	$q_e^4 = 2,842 \text{ mg g}^{-1}$ $pH = 6$ $t_{eq}^5 = 60 \text{ min}$	IDREES <i>et al.</i> (2018)
Zeólita polimerizada com poli(ácido metacrílico)	$m_{ads}^1 = 1 \text{ g}$ $V_{sol}^2 = 40 \text{ mL}$ $C_{sol}^3 = 10 \text{ mg L}^{-1}$ de Fe (II) e Mn(II) $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$q_e^4 = 10 \text{ mg g}^{-1}$ $pH = 3-4$ $t_{eq}^5 = 60 \text{ min}$	PAK <i>et al.</i> (2018)
Biocarvão ativado à base de casca de noz-pecã	$m_{ads}^1 = 0,15 \text{ g}$ $V_{sol}^2 = 50 \text{ mL}$ $C_{sol}^3 = 55 \text{ mg L}^{-1}$ de Fe (II) $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$	$q_e^4 = 17,61 \text{ mg g}^{-1}$ $pH = 3,5$ $t_{eq}^5 = 150 \text{ min}$	KAVEESHWAR <i>et al.</i> (2018)

Biocarvão ativado da casca do fruto da <i>Bombax ceiba</i>	$m_{ads}^1 = 0,05 \text{ g}$ $V_{sol}^2 = 25 \text{ mL}$ $C_{sol}^3 = 75 \text{ mg L}^{-1}$ de Fe (III) $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$q_e^4 = 37,16 \text{ mg g}^{-1}$ $\text{pH} = 3,5$ $t_{eq}^5 = 25 \text{ min}$	BRISHTI <i>et al.</i> (2023a)
Biocarvão dos resíduos dos brotos de bambu	$m_{ads}^1 = 0,2 \text{ g}$ $V_{sol}^2 = 50 \text{ mL}$ $C_{sol}^3 = 7 \text{ mg L}^{-1}$ de Fe (II) $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$q_e^4 = 2,97 \text{ mg g}^{-1}$ $\text{pH} = 3,5$ $t_{eq}^5 = 60 \text{ min}$	SEMA & BHATTACHARYYA (2022)
Carvão marrom natural	$m_{ads}^1 = 1 \text{ g}$ $V_{sol}^2 = 50 \text{ mL}$ $C_{sol}^3 = 10 \text{ mg L}^{-1}$ de Fe (III) $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$q_{max} = 1,41 \text{ mg g}^{-1}$ $\text{pH} = 6$ $t_{eq}^5 = 180 \text{ min}$	QUANSAH <i>et al.</i> (2024)
Biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar modificado	$m_{ads}^1 = 0,02 \text{ g}$ $V_{sol}^2 = 10 \text{ mL}$ $C_{sol}^3 = 20 \text{ mg L}^{-1}$ de Mn (II) $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$q_e^4 = 9,360 \text{ mg g}^{-1}$ $\text{pH} = 8$ $t_{eq}^5 = 100 \text{ min}$	CASTRO <i>et al.</i> (2023)
Biocarvão de casca de pomelo modificado com alcáli	$m_{ads}^1 = 0,2 \text{ g}$ $V_{sol}^2 = 50 \text{ mL}$ $C_{sol}^3 = 50 \text{ mg L}^{-1}$ de Mn (II)	$q_e^4 = 12,683 \text{ mg g}^{-1}$ $\text{pH} = 5,5$ $t_{eq}^5 = 60 \text{ min}$	AN <i>et al.</i> (2020)
Biocarvão do cacho de fruta vazio de óleo de palma	$m_{ads}^1 = 0,3 \text{ g}$ $V_{sol}^2 = 25 \text{ mL}$ $C_{sol}^3 = 100 \text{ mg L}^{-1}$ de Mn (II)	$q_e^4 = 6,6 \text{ mg g}^{-1}$ $\text{pH} = 5$ $t_{eq}^5 = 300 \text{ min}$	SAVITRI <i>et al.</i> (2023)
Biocarvão de palha de arroz	$m_{ads}^1 = 0,4 \text{ g}$ $V_{sol}^2 = 200 \text{ mL}$ $C_{sol}^3 = 50 \text{ mg L}^{-1}$ de Mn (II) $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$q_e^4 = 11,98 \text{ mg g}^{-1}$ $t_{eq}^5 = 120 \text{ min}$	(BRISHTI <i>et al.</i> , 2023b)

¹ m_{ads} = massa de adsorvente; ² V_{sol} = volume de solução; ³ C_{sol} = concentração da solução; ⁴ q_e = quantidade adsorvida; ⁵ t_{eq} = tempo de equilíbrio; ⁶T = temperatura

3.3. BIOCARVÃO

Biocarvão é um produto que apresenta em sua estrutura elevada quantidade de carbono, sendo produzido a partir de matéria orgânica, como resíduos sólidos agrícolas ou urbanos (WANG & WANG, 2019). O processo de obtenção de biocarvões consistem na carbonização

da biomassa, que pode ocorrer por processo úmido ou seco, denominado de pirólise hidrotermal e pirólise seca, respectivamente, podendo ser lenta ou rápida

Na pirólise, a carbonização ocorre em altas temperaturas, em geral acima de 400 °C e condições de baixa ou nenhuma presença de oxigênio (LOPES & ASTRUC, 2021a). Neste processo são formados três produtos: fração líquida (bio-óleo e fração aquosa), fração sólida (biocarvão) e os gases não condensáveis. Vale ressaltar que a produção desses três compostos é influenciada pelas condições do processo, como temperatura e tempo de residência.

Na carbonização hidrotermal, também chamada de pirólise úmida, a produção do biocarvão ocorre em temperaturas mais brandas e pressões moderadas. Segundo ZANG *et al.* (2021), a conversão da biomassa em biocarvão (fase sólida) é alta, produzindo um material de alto teor energético. Vale ressaltar que nesse processo, o meio reacional é aquoso e em sistema fechado com pressão autógena, utilizando-se um reator hidrotermal (CORREA *et al.*, 2019). Uma das vantagens do processo hidrotermal é que a biomassa não precisa ser seca, além das condições brandas de temperatura, em geral, abaixo de 250 °C, o que confere menor gasto energético (FONTOURA *et al.*, 2022). O processo acontece em condição subcrítica da água, indicada no diagrama de fases da água (Figura 1.4).

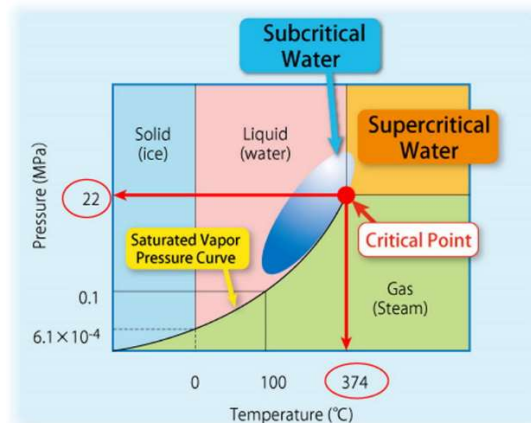


Figura 1.4. Diagrama de fases da água representando.
Fonte: THIRUVENKADAM *et al.* (2015)

Durante este procedimento de carbonização, ocorrem várias reações de hidrólise, descarboxilação, e desidratação até a formação do biocarvão por reações de condensação (ARAGÓN-BRICEÑO *et al.*, 2021). Os biocarvões possuem uma estrutura bastante complexa, como esquematizado na Figura 1.5.

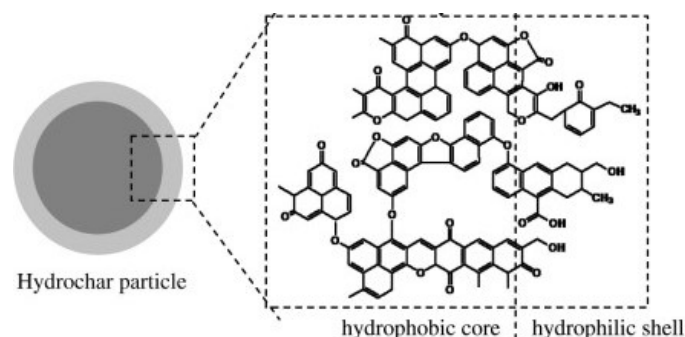


Figura 1.5. Esquema de uma estrutura de um biocarvão produzido por processo hidrotermal.
 Fonte: SEVILLA & FUERTES (2009)

Pode-se observar que tais processos preservam os grupos oxigenados de superfície, criando uma concha hidrofílica, que pode interagir com diversos compostos, sendo, portanto, excelentes adsorventes.

Os processos de carbonização se diferem em relação à temperatura e o tempo de residência, como mostrado na Tabela 1.3.

Tabela 1.3. Processos termoquímicos

Processo	Temperatura (°C)	Tempo de Residência
Pirólise Lenta	100 - 1000	minutos a horas
Pirólise Rápida	300 - 1000	< 2 segundos
Hidrotérmica	180 - 250	30 minutos a 16 horas

Fonte: AHMED *et al.* (2016), adaptado.

Na Tabela 1.4 são mostrados alguns exemplos de biocarvões obtidos pelo processo hidrotermal que foram usadas em diferentes aplicações.

Tabela 1.4. Aplicações de biocarvões produzidos pelo processo hidrotermal

Biomassa precursora	Aplicação	Ref.
Resíduo de malte	Remoção de fluoroquinolonas em sistemas aquosos.	SILVA <i>et al.</i> (2024)
Resíduo de malte	Remoção de azul de metileno em sistemas aquosos.	FONTOURA <i>et al.</i> (2022)
Palha de café arábica	O biocarvão foi funcionalizado com triazol e decorado com nanopartículas de Pd e aplicado na reação de acoplamento Ullmann.	GUIMARÃES <i>et al.</i> (2020)
Resíduos de Bambu	O biocarvão foi modificado com di-hidrogenofosfato de potássio e aplicado	X. CHEN <i>et al.</i> (2024)

para adsorção de urânio em sistemas aquosos.

Resíduo da produção de cacau	Utilização na remoção de mercúrio em sistemas aquosos	Ormaza Hugo et al. (2024)
Casca de amêndoa selvagem	Remoção do fármaco norfloxacino em sistemas aquosos.	PAN et al. (2024a)

3.4. CASCA DE BANANA PARA PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO

A biomassa proveniente de resíduos agrícolas (Figura 1.6) são uma fonte renovável de carbono, composta por, principalmente, lignina, hemicelulose e celulose, denominada biomassa lignocelulósica, sendo o produto de partida para a produção do biocarvão. Como mencionado anteriormente, a carbonização da biomassa produz um material com alto conteúdo de carbono (WEBER e QUICKER, 2018).

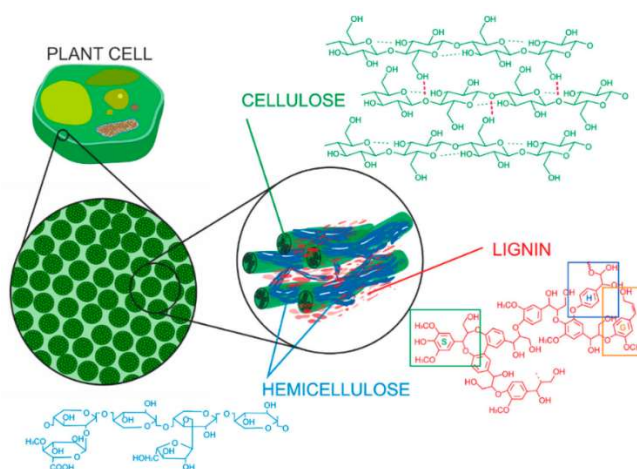


Figura 1.6. Estrutura da biomassa lignocelulósica.
Fonte: HASANOV *et al.* (2020)

A celulose e a hemicelulose são polissacarídeos, isto é, carboidratos complexos, formados pela junção de açúcares simples. Porém, se diferem na estrutura, pois as hemiceluloses ramificadas, enquanto a celulose não é. Assim, a celulose é termicamente mais estável que as hemiceluloses. A lignina, por sua vez, é uma macromolécula complexa, apresentando uma estabilidade térmica diferente das duas anteriores. Portanto, a composição da biomassa em relação a estes três compostos pode influenciar no rendimento do biocarvão (WEBER e QUICKER, 2018).

Na literatura são descritos diferentes tipos de biomassa para produção de biocarvões como palha de café (GUIMARÃES *et al.*, 2020), bagaço de malte (FONTOURA *et al.*, 2022;

SILVA *et al.*, 2024), pseudocaule de banana (XU *et al.*, 2018), pedúnculo de bananeira (KARIM *et al.*, 2017a), entre outros.

As bananas, cujo nome científico é *Musa spp*, são originárias do sul e sudeste da Ásia, sendo a fruta mais produzida no mundo (ABDULLAH *et al.*, 2023). O Brasil é o quarto maior produtor mundial de banana, sendo São Paulo o maior produtor da fruta (SEBRAE, 2023). Em 2022, Minas Gerais produziu 841.688 toneladas de banana, sendo o segundo maior produtor (EMBRAPA - MANDIOCA E FRUTICULTURA, [S.D.]).

A banana é uma fruta muito consumida devido às características sensoriais e sabor agradáveis e aos seus altos teores calórico, de fibras e vitaminas presente (ACEVEDO *et al.*, 2021). Além disso, seu consumo favorece o desenvolvimento econômico e a segurança alimentar de países em desenvolvimento, de baixa renda e com déficit alimentar (CASTILLO *et al.*, 2023).

Na Figura 1.7 é mostrado um esquema da banana. A camada mais externa é o epicarpo, que envolve o mesocarpo, a porção carnuda da casca (DUWIEJUAH *et al.*, 2024b). O mesocarpo contém a maioria dos nutrientes e compostos benéficos encontrados na casca, como potássio, fibras e antioxidantes. A camada mais interna é o endocarpo, que está em contato direto com a polpa do fruto.

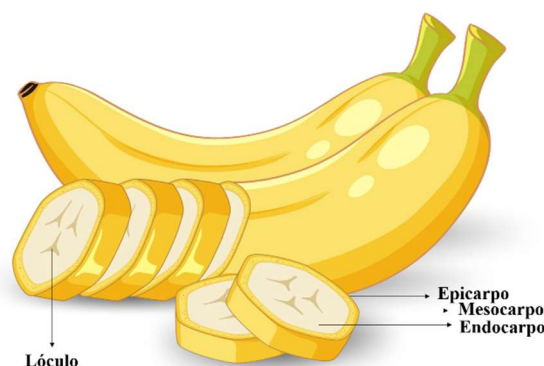


Figura 1.7. Estrutura da banana.
Fonte: Autoral

Na literatura são descritos alguns trabalhos envolvendo a produção de biocarvões a partir de banana para remoção de diferentes contaminantes. Na Tabela 1.5 são descritos alguns desses trabalhos.

Tabela 1.5. Aplicações de biocarvões produzidos a partir de diferentes partes da banana.

Biomassa	Aplicação	Referência
Pedúnculo de bananeira	Aplicação no solo.	KARIM <i>et al.</i> (2017b)
Casca de banana	Adsorção de metais tóxicos (Ni e Cr) de chorume de	DUWIEJUAH <i>et al.</i> (2024b)

lagoa de tratamento de
aterro.

Casca de banana	Remoção do Corante Preto Reativo 5.	KAPOOR <i>et al.</i> (2022)
Cascas de banana frescas e desidratadas	Remoção de chumbo em sistemas aquosos.	ZHOU <i>et al.</i> (2017)
Folhas de bananeira	Remoção de íons amônio em sistemas aquosos.	PANTOJA <i>et al.</i> (2024)
Caule de bananeira	Aplicação de armazenamento de energia.	THOMAS <i>et al.</i> (2023)
Casca de banana	Remoção simultânea de metais pesados (Fe ²⁺ , Zn ²⁺ , Ni ⁺² , Cr ²⁺ e Cu ²⁺) em águas residuais da indústria de galvanoplastia.	ARRIOLA-VILLASEÑOR <i>et al.</i> (2023)
Caule e folha de bananeira	Remoção de cádmio e chumbo em solução aquosa.	LIU <i>et al.</i> (2022)

CAPÍTULO 2

*Síntese de biocarvões de casca de banana para
remoção de ferro e manganês em água*

1 METODOLOGIA

2 1.1. PADRÕES E REAGENTES

3 Neste trabalho, foram utilizados reagentes grau analítico. O ácido fosfórico (H_3PO_4 ,
4 85%, CAS: 7664-38-2) e hidróxido de sódio (NaOH , 98,63%, CAS: 1310-73-2) foram
5 adquiridos da Vetec (Química Fina LTDA) e Neon, respectivamente. O sulfato de ferro II
6 amoniacal ($(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 98,5-101,5%, CAS: 7783-85-9), sulfato de manganês
7 ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 98,0 – 101,0%, CAS: 10034-96-5) e ácido nítrico (HNO_3 , 65%, CAS: 7697-37-
8 2) adquirido de Êxodo Científica.

9 Todas as soluções foram preparadas com água tipo II. Todas as soluções foram
10 armazenadas ao abrigo da luz à temperatura ambiente.

11 1.2. SÍNTESE DOS BIOCÁRVÕES

12 1.2.1. OBTENÇÃO DA BIOMASSA E PROCESSAMENTO

13 As cascas de bananas foram recolhidas no Restaurante Universitário da Universidade
14 Federal de Viçosa (UFV). Após serem recolhidas, as cascas foram lavadas com água de torneira
15 e levadas à estufa a 105 °C por 24 horas. Posteriormente, o material foi triturado, peneirado em
16 uma peneira de 500 micrômetros (32 mesh), utilizando toda a fração passante. Depois de
17 classificadas, as partículas foram armazenadas à temperatura ambiente.

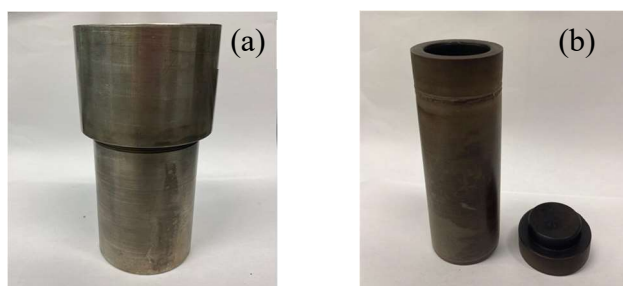
18 1.2.2. CARBONIZAÇÃO HIDROTÉRMICA (HTC) E ATIVAÇÃO QUÍMICA

19 Para realizar a carbonização pelo processo hidrotermal, foram adicionados 6,25 g da
20 biomassa e 50 mL de uma solução do agente de ativação em uma autoclave inoxidável,
21 contendo um tubo de teflon no interior com capacidade de 100 mL. Uma imagem do reator é
22 mostrada na Figura 2.1.

23 Foram utilizados dois agentes de ativação, ácido fosfórico ($0,100 \text{ mol L}^{-1}$) e hidróxido
24 de sódio ($0,100 \text{ mol L}^{-1}$). Experimentos controle, sem adição de agente de ativação foram
25 realizados, empregando-se apenas água tipo II. Posteriormente, a autoclave foi fechada e
26 aquecida por um determinado período de tempo e temperatura, conforme o planejamento
27 experimental apresentado no item 1.2.3.

28 Após o término da produção do biocarvão ativado, a autoclave foi resfriada até atingir
29 a temperatura ambiente. O produto obtido foi lavado com água destilada até que o sobrenadante

1 atingisse o pH neutro (pH = 7,0). Após cada lavagem, as amostras foram centrifugadas por 20
2 minutos em uma rotação de 4000 rpm. Por fim, as amostras foram secas em estufa a 60 °C por
3 24 horas e, posteriormente, pesadas e armazenadas em um dessecador à temperatura ambiente.



4
5 **Figura 2.1.** Autoclave inoxidável (a) e tubo de teflon (b).
6 Fonte: autoral

7 **1.2.3. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PARA A CARBONIZAÇÃO HTC**

8 Para as sínteses dos biocarvões, foi feito um delineamento experimental do tipo Fatorial
9 Completo com 3 variáveis (temperatura, tempo de residência e agente de ativação), que foram
10 avaliados em dois níveis (2^3), totalizando oito experimentos. Foi realizado um experimento
11 controle considerando a média dos níveis, e outro na ausência de agente de ativação, isto é,
12 empregando-se apenas água. O planejamento experimental está descrito na Tabela 2.1.

13 **Tabela 2.1.** Planejamento Fatorial Completo com Ponto Central para a síntese de biocarvões a partir da casca de
14 banana

Amostra	Temperatura (°C)	Tempo de Residência (h)	Agente de Ativação
BC1	200	14	H ₃ PO ₄ (0,100 mol L ⁻¹)
BC2	200	14	NaOH (0,100 mol L ⁻¹)
BC3	200	8	H ₃ PO ₄ (0,100 mol L ⁻¹)
BC4	200	8	NaOH (0,100 mol L ⁻¹)
BC5	100	14	H ₃ PO ₄ (0,100 mol L ⁻¹)
BC6	100	14	NaOH (0,100 mol/L)
BC7	100	8	H ₃ PO ₄ (0,100 mol L ⁻¹)
BC8	100	8	NaOH (0,100 mol L ⁻¹)
BC9	150	11	H ₂ O
BC10	150	11	H ₂ O

15 Fonte: autor

1 Após a produção dos 10 biocarvões, foi realizado ensaios de remoção de Fe e Mn em
2 água, cuja porcentagem de remoção foi utilizada como resposta para o planejamento descrito.

3 Os dados foram tratados utilizando os programas Excel, Statistica 7 e Origin 2021.

4 **1.2.4. ATIVAÇÃO TÉRMICA DOS BIOCÁRVÕES PRODUZIDOS POR HTC**

5 Os biocarvões produzidos por HTC e com melhores desempenhos na remoção de Fe e
6 Mn foram selecionados para serem submetidos a ativação térmica, conforme metodologia
7 descrita por FERNANDEZ *et al.*, (2015). Foram pesados 1,5 g de cada biocarvão, colocados
8 m cadinho de porcelana e levados à mufla a 300 °C por 1 hora e, posteriormente, pesadas e
9 armazenadas em um dessecador à temperatura ambiente.

10 **1.3. CARACTERIZAÇÕES DA BIOMASSA E DOS BIOCÁRVÕES**

11 **1.3.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA ELEMENTAR CHNS**

12 Para determinar o teor (%) de carbono (C), nitrogênio (N) e enxofre (S) dos biocarvões
13 e da biomassa foi utilizado o analisador elementar LECO, modelo TruSpec Micro, no
14 Departamento de Química da Universidade Federal de Viçosa. Para realizar essa análise foi
15 utilizado como padrão o composto Cystine (N=11,64%; C=29,98%; H=5,02%; S=26,71%) e o
16 tubo de combustão foi mantido a 1150 °C e o tubo de redução a 850 °C.

17 **1.3.2. SÍTIOS ÁCIDOS DE BRØNSTED**

18 Para determinar os sítios ácidos de Brønsted dos biocarvões e da biomassa, realizou-se
19 uma titulação ácido-base. Para isso, foram pesados 100 mg de cada material e transferidos para
20 frascos Erlenmeyer, sendo adicionados 10,00 mL de solução de NaOH (0,100 mol L⁻¹). O
21 sistema permaneceu sob agitação por 3 horas a 200 rpm. Na sequência o sistema foi
22 centrifugado por 10 minutos a 4000 rpm. Posteriormente, 5,00 mL do sobrenadante foi titulado
23 com solução de HCl (0,100 mol L⁻¹), sendo comparadas com o experimento controle. Os
24 experimentos controle foram realizados da mesma forma, exceto pela adição do material. Para
25 calcular a concentração de ácidos foi feito a partir da Equação 2.5.

$$26 \quad C(H^+) = \frac{(V_C - V_T) * C_T}{m_H} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

27 Em que V_C é o volume de titulante, V_T é o volume de titulado, C_T é a concentração de
28 HCl e m_H é a massa do material utilizada.

1.3.3. DETERMINAÇÃO DO PONTO DE CARGA ZERO

Para determinar o ponto de carga zero (pH_{pcz}) dos biocarvões, 20 mg do biocarvão ou da biomassa foram adicionados em 20,00 mL de solução de cloreto de sódio ($0,100 \text{ mol L}^{-1}$), com pH inicial previamente ajustado. Foram avaliados cinco valores de pH: 2, 4, 6, 8 e 10 (FONTOURA *et al.*, 2022). Vale ressaltar que para ajustar o pH foram utilizadas soluções de ácido clorídrico e/ou hidróxido de sódio, ambas na concentração de $0,100 \text{ mol L}^{-1}$. O sistema foi submetido à agitação de 100 rpm por 24 horas. Posteriormente, o sobrenadante foi separado por centrifugação e o pH final determinado. Por fim, foi construído um gráfico da variação de pH versus pH inicial para determinação do pH_{pcz} .

1.3.4. ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER

Com o intuito de caracterizar os grupos funcionais que estão presentes na biomassa e nos biocarvões, foram realizadas análises pela técnica de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). A análise foi realizada utilizando o equipamento Varian 660-IR com acessório de reflectância total atenuada PIKE GladiATR, com cristal de diamante. Essa análise foi realizada na Universidade Federal de Viçosa, campus Florestal.

1.3.5. DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A biomassa e os biocarvões foram analisados por Difração de Raios-X (DRX), utilizando um equipamento modelo D8-Discover (Bruker), do Departamento de Física da Universidade Federal de Viçosa. Foi utilizada uma radiação Cu-K α ($\lambda=0,1541 \text{ nm}$), com variação angular 2θ de 10 a 50°.

1.3.6. ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA

As isotermas de adsorção e dessorção de nitrogênio da biomassa e do biocarvão selecionado foram determinadas utilizando um equipamento modelo Nova 600 Series da Anton Paar, do Laboratório de Nanomateriais e Química Ambiental (LaNaQuA) do Departamento de Química da Universidade Federal de Viçosa. Antes das análises, as amostras foram submetidas ao processo de degaseificação a 120 °C por 4 horas para a remoção da água e dos gases que poderiam estar presentes. A área superficial específica foi calculada pelo método Brunauer-Emmett-Teller (BET) e a distribuição do tamanho de poros, pelo método Barrett-Joyner-Halenda (BJH).

1 **1.3.7. POTENCIAL ZETA**

2 A carga superficial da biomassa e dos biocarvões (Potencial Zeta) foram determinadas
3 empregando-se um equipamento Nano ZS Zetasizer da Anton Paar, do Laboratório de
4 Nanomateriais e Química Ambiental (LaNaQuA). Para esta análise, 10 mg de biocarvões foram
5 adicionados em 250 mL de NaCl ($0,100 \text{ mol L}^{-1}$) e agitado por 24 horas. O sistema foi posto
6 em ultrassom por 2 horas e o pH foi ajustado para diferentes valores: 2, 4, 6, 8, 10 e 12. As
7 análises foram realizadas em duplicata.

8 **1.3.8. MICROSCOPIA DE VARREDURA ELETRÔNICA**

9 A morfologia da biomassa e dos biocarvões foi avaliada pela técnica de Microscopia
10 Eletrônica de Varredura (MEV), um microscópio eletrônico JEOL, modelo JSM-6010LA, com
11 tensão de aceleração de 20 kV, presente no Departamento de Física da Universidade Federal
12 de Viçosa. Para a análise, as amostras foram colocadas em uma fita de carbono e metalizadas
13 com ouro, utilizando o equipamento Metalizador Quorum Q150R S do laboratório Núcleo de
14 Microscopia e Microanálise da Universidade Federal de Viçosa.

15 **1.3.9. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA**

16 A estabilidade térmica da biomassa e dos biocarvões foi avaliada pela Análise
17 Termogravimétrica utilizando-se um equipamento DTG-60H Shimadzu da Universidade
18 Federal de Minas Gerais. As amostras foram aquecidas de 30 a 800 °C a uma taxa de
19 aquecimento de 10 °C min^{-1} , com fluxo de 50 mL min^{-1} em atmosfera de nitrogênio.

20 **1.3.10. ENSAIOS DE ADSORÇÃO DE FERRO E MANGANÊS POR**
21 **BIOCAVÕES**

22 A eficiência dos biocarvões foi avaliada por meio de ensaios de adsorção de ferro e de
23 manganês em sistemas aquosos. Para isso, foram adicionados 50 mg de cada biocarvão
24 produzido em 20,00 mL de solução de ferro (10 mg L^{-1}). Procedimento semelhante foi feito
25 com a solução de manganês (10 mg L^{-1}). O sistema foi submetido à agitação por 24 horas (200
26 rpm) à temperatura ambiente ($\sim 25 \text{ °C}$). Após esse tempo, o sistema foi submetido a etapa de
27 filtração em membrana de acetato celulose com porosidade igual a $0,45 \text{ }\mu\text{m}$. Por fim, o
28 sobrenadante foi analisado por Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Induzido por
29 Micro-ondas (MIP OES). As análises foram realizadas em duplicata.

1 **1.3.11. DETERMINAÇÃO DE FERRO TOTAL E MANGANÊS**

2 A quantificação de ferro e manganês foi determinada por MIP OES modelo 4100 MP-
3 AES (Agilent Technologies, Austrália) no Departamento de Química da Universidade Federal
4 de Viçosa. As linhas espectrais utilizadas para determinação dos metais foram: ferro - 259,940
5 nm e 371,993 nm e manganês - 260,568 nm e 403,449 nm.

6 Foram preparadas soluções de ferro ou manganês total nas concentrações de 1,00; 2,00;
7 4,00; 6,00; 8,00 mg L⁻¹ e 10,00 mg L⁻¹, preparadas em ácido nítrico 1%. Um modelo de
8 regressão linear foi ajustado aos dados experimentais para se obter a curva analítica.

9 **1.3.12. ESTUDO DO EFEITO DE pH**

10 O efeito do pH na adsorção de ferro e manganês pelos biocarvões foi avaliado. Para
11 isso, foram adicionados 20 mg do biocarvão em 20,00 mL de soluções de ferro 10 mg L⁻¹ em
12 quatro valores de pH diferentes: 2, 3, 4 e 5. O sistema foi submetido à agitação por 24 horas
13 (200 rpm) à temperatura ambiente (~25 °C) e, posteriormente, foram filtradas em membrana
14 de acetato celulose com porosidade igual a 0,45 µm. Por fim, o sobrenadante foi analisado por
15 MIP OES. Vale ressaltar que o mesmo procedimento foi realizado para o manganês.

16 **1.3.13. ESTUDO CINÉTICO DE REMOÇÃO DE Fe E Mn PELOS**
17 **BIOCARVÕES**

18 O tempo de equilíbrio de adsorção de Fe e Mn pelos diferentes biocarvões foi
19 determinado por meio de ensaios cinéticos. Para isso, foram adicionados 50 g do biocarvão em
20 20,00 mL da solução padrão de ferro em concentração de 100 mg L⁻¹. Este sistema ficou sob
21 agitação (200 rpm) por 24 horas a temperatura ambiente (~25 °C). Para a avaliação do perfil
22 cinético de adsorção, foram definidos os seguintes tempos: 0; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 60; 90;
23 120; 150; 180; 240; 360; 480; 1020 e 1440 minutos. Os experimentos foram conduzidos em
24 batelada, isto é, para cada tempo foi realizado um experimento. Após o tempo, o sistema foi
25 centrifugado e filtrado em membrana de acetato celulose com porosidade igual a 0,45 µm e,
26 posteriormente, foram analisadas por MIP OES.

27 Os modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem (Eq. 2.6), pseudo-segunda ordem (Eq.
28 2.7) e modelo Elovich (Eq. 2.8) foram ajustados aos dados experimentais, sendo considerado
29 aquele com melhor valor de R² e menor valor de Critério de Informação de Akaike (AIC). O
30 AIC é uma métrica que ajuda na interpretação dos resultados, fornecendo a informação de qual
31 modelo, entre os aplicados, se ajusta melhor aos dados experimentais (Portet, 2020).

1
$$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 \times t}) \quad (\text{Eq. 2.6})$$

2
$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

3
$$q_t = \frac{1}{b} \ln(1 + abt) \quad (\text{Eq. 2.8})$$

4 Sabendo que q_t é a quantidade de soluto adsorvido por unidade de massa de adsorvente
5 em um determinado tempo ($\mu\text{g mg}^{-1}$), q_e é quantidade de soluto adsorvido por unidade de massa
6 de adsorvente no equilíbrio ($\mu\text{g mg}^{-1}$); k_1 é a constante da taxa de adsorção de pseudo-primeira
7 ordem (h^{-1}), k_2 é a constante da taxa de adsorção de pseudo-segunda ordem ($\text{mg } \mu\text{g.L}^{-1}$),
8 coeficiente “ a ” corresponde à taxa inicial de adsorção ($\text{mg g}^{-1} \text{ min}^{-1}$) e o coeficiente “ b ” é a
9 constante de dessorção (mg g^{-1}) e t é o tempo em horas.

10 **1.3.14. ISOTERMAS DE ADSORÇÃO**

11 Com o intuito de analisar a adsorção de ferro em água pelo biocarvão produzido, foram
12 realizadas isotermas de adsorção, adicionando-se 50,0 mg do biocarvão em 50,00 mL de
13 solução contendo concentração de ferro em diferentes concentrações (5, 10, 25, 35 e 50
14 mg L^{-1}). A solução foi agitada por 7 horas (200 rpm) e, posteriormente, filtrada em membrana
15 de acetato celulose com porosidade igual a $0,45 \mu\text{m}$. Por fim, o sobrenadante foi analisado por
16 espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por micro-ondas.

17 Os modelos isotérmicos de Langmuir e Freundlich foram ajustados aos dados
18 experimentais, de acordo com as Equações 2.9 e 2.10.

19
$$q_e = \frac{q_{max} \times K_L \times C_e}{1 + K_L \times C_e} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

20
$$q_e = K_f \times C_e^{\frac{1}{n}} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

21 Sabendo que q_{max} é a capacidade máxima de adsorção (mg L^{-1}), n é a constante
22 relacionada com a intensidade de adsorção, K_f é a constante de Freundlich (mg g^{-1}) e K_L é a
23 constante de adsorção de Langmuir.

1 **1.3.15. ESTUDO DO EFEITO DE INTERFERENTES NA ADSORÇÃO DE Fe E**
2 **Mn**

3 Para avaliar o efeito de interferentes na remoção de Fe e Mn pelos biocarvões, foram
4 preparadas uma solução de Fe^{2+} e outra de Mn^{2+} , ambas na concentração de 100 mg L^{-1} ,
5 utilizando a água da torneira. A água foi coletada na torneira do laboratório LANAQUA
6 (número 325) do Departamento de Química da UFV, no dia 11/12/2024 às 9:00. Foram feitas
7 análises de condutância, utilizando o equipamento AZ®, modelo 86503 (Taichung, Taiwan) e
8 potencial redox, utilizando o eletrodo de platina ORP (Redox) da marca Sensoglass, modelo
9 SRR03 (São Paulo, Brasil), conectado ao potenciômetro.

10 Na sequência, 50 mg do biocarvão foram adicionados a 20,00 mL de solução do metal.
11 Os sistemas foram submetidos à agitação por 7 horas (200 rpm) à temperatura ambiente (~25
12 °C). Na sequência, foram filtrados em membrana de acetato celulose com porosidade igual a
13 $0,45 \mu\text{m}$. Por fim, o sobrenadante foi analisado por MIP OES. As análises foram realizadas em
14 duplicata.

15 **1.3.16. REGENERAÇÃO E REÚSO DO BIOCARVÃO**

16 Para avaliar a regeneração e o reúso do biocarvão, 50 mg do adsorvente foi adicionado
17 a 20,00 mL de solução de ferro ou manganês em concentração de 200 mg L^{-1} e agitado por 7
18 horas. Posteriormente, a solução foi centrifugada e o sólido foi retirado. Para avaliar qual seria
19 a melhor solução extratora, lavou-se 3 vezes, o sólido com 10 mL de solução de ácido clorídrico
20 ou ácido cítrico, ambos em concentração de $0,1 \text{ mol L}^{-1}$.

21 Após avaliar a melhor solução extratora, fez-se os ensaios de reúso. Portanto, após o
22 primeiro ciclo, o material foi regenerado com a melhor solução extratora, e o biocarvão
23 regenerado foi reutilizado em uma nova solução de ferro ou manganês (200 mg L^{-1}). A
24 eficiência de remoção foi avaliada em 3 ciclos consecutivos.
25
26

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho foram sintetizados diferentes biocarvões (BC) utilizando processo hidrotermal com ativação *one pote*, utilizando-se dois agentes de ativação, ácido fosfórico e hidróxido de sódio e temperaturas de 200 e 100 °C. Os resultados podem ser visualizados na Figura 2.2.

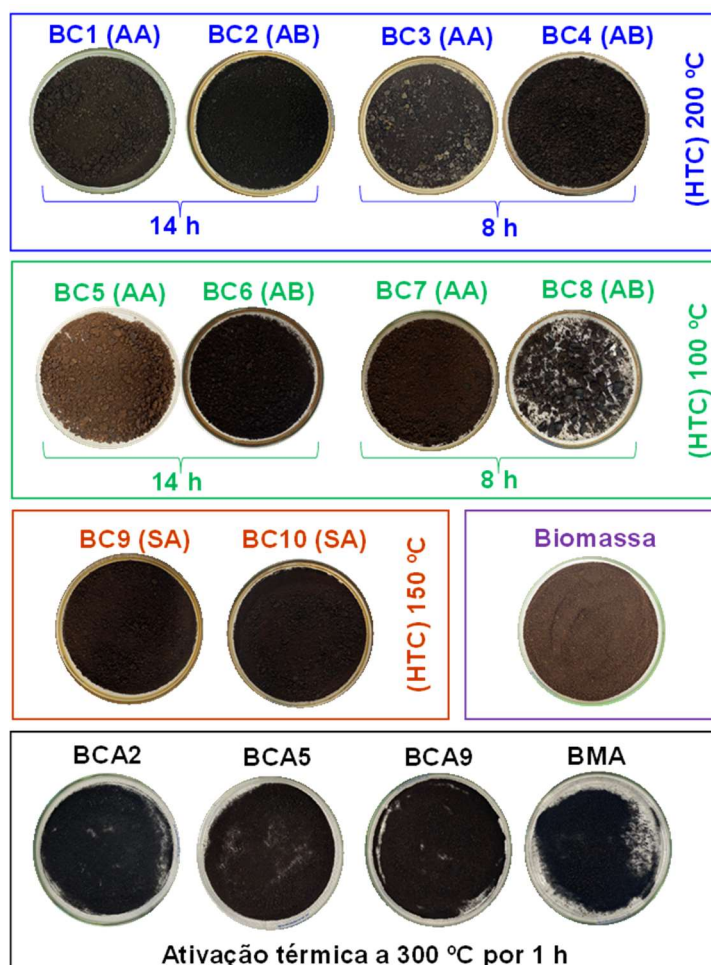


Figura 2.2. Biocarvões obtidos a partir de casca de banana. Legenda: AA (Ativação ácida com H_3PO_4), AB (Ativação básica com NaOH), AS (Sem ativação), HTC (Processo hidrotermal).

Pode-se observar que os BC sintetizados a 200 °C apresentaram uma aparência mais enegrecida comparada aos BC sintetizados a 100 °C e, também, com a biomassa. Esse fato pode estar associado a uma maior carbonização da biomassa. Em relação aos agentes de ativação, pode-se observar que o NaOH produziu BC mais enegrecidos também, quando comparados aos seus equivalentes utilizando-se H_3PO_4 . Os BC controle, sintetizados sem agente de ativação a 150 °C, apresentaram colorações intermediárias entre os processos realizados a 200 °C e 100 °C.

Capítulo 2. Síntese de biocarvões de casca de banana para remoção de Fe e Mn em água

1 O rendimento e dados de caracterização química para os diferentes biocarvões são
2 mostrados na Tabela 2.2. Os rendimentos foram altos, superior a 50%, sendo que para BC3 foi
3 próximo de 70%. SILVA *et al.*, (2024) obtiveram 63,5% de rendimento na produção de
4 biocarvões a partir de bagaço de malte. FONTOURA *et al.*, (2022) obtiveram rendimentos
5 entre 30 e 50% na produção de biocarvões também a partir de bagaço de malte. Ambos os
6 autores utilizaram a síntese via processo hidrotermal.

7

8 **Tabela 2.2.** Rendimento e propriedades dos biocarvões em função dos tratamentos

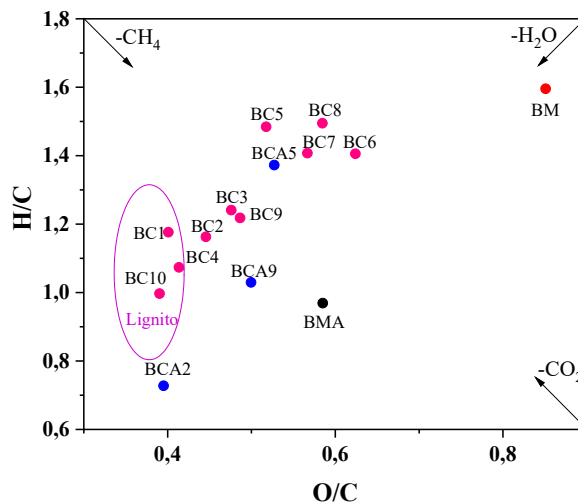
Amostra	Rendimento (%)	N (%)	C (%)	H (%)	S (%)	O (%)	H/C	O/C	pH pcz	c(H ⁺) (mmol/g)
BC1	63	2,08	58,31	5,76	2,72	31,14	1,18	0,40	5,83	4,86 ± 0,23
BC2	54	1,96	56,51	5,51	2,47	33,54	1,16	0,45	6,00	4,59 ± 0,14
BC3	67	1,98	54,92	5,72	2,57	34,81	1,24	0,48	5,55	4,93 ± 0,13
BC4	53	2,06	58,40	5,26	2,11	32,17	1,07	0,41	5,60	4,50 ± 0,02
BC5	54	2,00	52,43	6,53	2,88	36,15	1,48	0,52	4,39	3,95 ± 0,01
BC6	58	1,92	49,32	5,82	1,95	41,00	1,41	0,62	6,24	3,60 ± 0,27
BC7	57	2,16	51,46	6,08	1,46	38,84	1,41	0,57	5,08	4,05 ± 0,14
BC8	52	1,81	50,32	6,31	2,37	39,19	1,49	0,58	5,18	3,77 ± 0,26
BC9	63	1,68	57,42	5,31	2,22	33,37	1,11	0,44	4,80	5,00
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	6	0,32	3,55	0,42	0,31	3,12	0,16	0,07	0,01	0,68
BM	-	1,41	42,49	5,69	2,25	48,16	1,60	0,85	6,63	4,68 ± 0,26
BCA2	40	2,33	59,71	3,65	2,89	31,43	0,73	0,40	5,87	4,95 ± 0,37
BCA5	51	2,14	52,57	6,05	2,33	36,92	1,37	0,53	4,29	5,22 ± 0,76
BCA9	54	2,01	54,83	4,74	1,95	36,48	1,03	0,50	4,61	5,13 ± 0,12
BMA	60	1,97	51,43	4,18	2,34	40,08	0,97	0,59	6,43	4,67

9 Legenda: BC1 (200 °C, 14 h, H₃PO₄); BC2: (200 °C, 14 h, NaOH); BC3 (200 °C, 8 h, H₃PO₄); BC4 (200 °C, 8
10 h, NaOH); BC5 (100 °C, 14 h, H₃PO₄); BC6 (100 °C, 14 h, NaOH); BC7 (100 °C, 8 h, H₃PO₄); BC8 (100 °C, 8
11 h, NaOH); BC9 (150 °C, 11 h, H₂O); BM (biomassa); BCA: Biocarvões ativados termicamente (300 °C, 1 h),
12 BCA2 (BC2 ativado); BCA5 (BC5 ativado); BCA9: (BC5 ativado); BMA: biomassa ativada termicamente.

13 Todos os BC apresentaram um teor de nitrogênio e enxofre próximos a 2%. Resultados
14 semelhantes são descritos na literatura. JIAN *et al.*, (2018) obtiveram biocarvões com teor de
15 enxofre próximo a 2%, obtidos a partir da casca de arroz pelo processo hidrotermal.
16 KRYSA NOVA *et al.*, (2022) obtiveram biocarvões com teor de 2% para nitrogênio, que foram

1 produzidos a partir da biomassa de serragem de árvores decíduas e turfa de várzea, também
2 utilizando o processo hidrotermal.

3 Em relação ao teor de carbono e oxigênio, pode-se perceber que foram próximos a 50
4 e 30%, respectivamente. A razão H/C e O/C foram determinadas e fornecem indícios da
5 evolução da carbonização e presença de grupos funcionais de superfície. Esses dados foram
6 plotados graficamente, diagrama de Van Krevelen (Figura 2.3). Pode-se observar que a relação
7 H/C dos biocarvões diminuiu em relação à biomassa. Tais resultados podem ser atribuídos às
8 etapas de desidratação e hidrólise, à perda dos compostos alifáticos, proporcionando o aumento
9 da aromaticidade das estruturas dos biocarvões (AKBARI *et al.*, 2023). Nota-se também uma
10 diminuição na razão O/C dos biocarvões em relação à biomassa, devido às reações de
11 descarboxilação e desidratação, favorecendo a remoção de grupos carboxilas e carbonila, por
12 consequência da perda de oxigênio da estrutura do biocarvão (KHAN *et al.*, 2022). Resultados
13 semelhantes foram obtidos por VENKATESAN *et al.*, (2022). Segundo os autores, foram
14 observadas menores relações H/C e O/C para os biocarvões quando comparados à biomassa
15 borra de café.

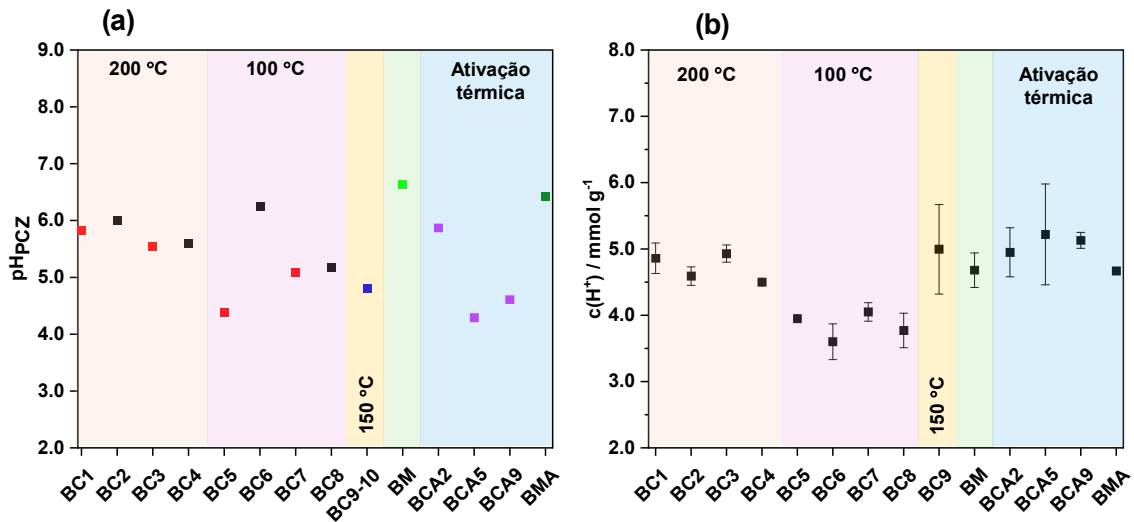


16
17 **Figura 2.3.** Diagrama de Van Krevelen para os biocarvões, biomassa, biocarvões ativados e biomassa ativada.
18 Legenda: BC1 (200 °C, 14 h, H₃PO₄); BC2: (200 °C, 14 h, NaOH); BC3 (200 °C, 8 h, H₃PO₄); BC4 (200 °C, 8
19 h, NaOH); BC5 (100 °C, 14 h, H₃PO₄); BC6 (100 °C, 14 h, NaOH); BC7 (100 °C, 8 h, H₃PO₄); BC8 (100 °C, 8
20 h, NaOH); BC9 (150 °C, 11 h, H₂O); BM (biomassa); BCA: Biocarvões ativados termicamente (300 °C, 1 h),
21 BCA2 (BC2 ativado); BCA5 (BC5 ativado); BCA9: (BC5 ativado); BMA: biomassa ativada termicamente.

22 As razões H/C e O/C variam conforme a temperatura de síntese dos biocarvões, isto é,
23 quanto maior a temperatura de síntese, menor são essas razões (PAN *et al.*, 2024). Pode-se
24 observar que o BCA2, sintetizado a 200 °C e ativado termicamente a 300 °C, é o que apresenta
25 menores razões H/C e O/C. Por outro lado, os biocarvões BC5, BC6, BC7 e BC8 apresentam

1 maiores valores de H/C e O/C pois, foram sintetizados a 100 °C e sem ativação térmica. A
2 biomassa apresentou maiores valores de H/C e O/C, por não ter passado pelo tratamento
3 hidrotermal.

4 Os resultados obtidos para o pH_{PCZ} estão apresentados na Tabela 2.2. Para facilitar a
5 visualização, construiu-se um gráfico que pode ser observado na Figura 2.4. Observa-se que os
6 materiais tratados a 200 °C apresentaram resultados muito semelhantes, independentemente do
7 agente de ativação utilizado e do tempo de residência na estufa. Em temperaturas mais
8 elevadas, as reações de desidratação, condensação e descarboxilação são intensificadas,
9 favorecendo a carbonização do material, o que causa uma perda nos grupos funcionais de
10 superfície (FONTOURA *et al.*, 2022). Tais reações favorecem o aumento do pH da superfície
11 do material, mantendo-se valores próximos a 6,0, devido à mesma temperatura de síntese. Tais
12 resultados podem ser confirmados observando-se o gráfico de Van Krevelen para os biocarvões
13 produzidos a 200 °C (BC1, BC2, BC3 e BC4). Pode-se observar que todos apresentaram
14 valores da razão de O/C próximos, ou seja, apresentam grupos funcionais em proporções
15 parecidas.



16

17 **Figura 2.4.** Determinação de (a) pH_{PCZ} e (b) a concentração de H^+ ($mmol g^{-1}$) dos biocarvões

18 Legenda: BC1 (200 °C, 14 h, H_3PO_4); BC2: (200 °C, 14 h, NaOH); BC3 (200 °C, 8 h, H_3PO_4); BC4 (200 °C, 8
19 h, NaOH); BC5 (100 °C, 14 h, H_3PO_4); BC6 (100 °C, 14 h, NaOH); BC7 (100 °C, 8 h, H_3PO_4); BC8 (100 °C, 8
20 h, NaOH); BC9 (150 °C, 11 h, H_2O); BM (biomassa); BCA: Biocarvões ativados termicamente (300 °C, 1 h),
21 BCA2 (BC2 ativado); BCA5 (BC5 ativado); BCA9: (BC5 ativado); BMA: biomassa ativada termicamente.

22 No entanto, a 100 °C, com um tempo de residência de 14 horas, houve uma influência
23 significativa do agente de ativação. A ativação com ácido fosfórico resultou em um biocarvão
24 com pH_{PCZ} de 4,39, enquanto o biocarvão ativado com NaOH apresentou um pH_{PCZ} de 6,24.
25 Esse fato pode estar relacionado com o aumento de grupos ácidos (fenólicos e carboxílicos) no
26 BC ativado com H_3PO_4 , tornando o pH_{PCZ} menor quando comparado ao biocarvão ativado com

1 uma base (SILVA *et al.*, 2024). Nessa mesma temperatura e com um tempo de residência de 8
2 horas, os biocarvões tiveram valores de pH_{PCZ} próximos (~ 5).

3 Os biocarvões BC9-10, submetidos a uma temperatura de 150 °C e um tempo de 11
4 horas, apresentaram propriedades muito semelhantes às dos biocarvões BC7 e BC8. Portanto,
5 em temperaturas mais brandas e menores tempos de residência, os BC7 e BC8 apresentaram
6 valores de pH_{PCZ} próximos, de 5,08 e 5,18, respectivamente. Apesar de terem passado por
7 ativação térmica a 300 °C, os materiais preservaram um pH_{PCZ} próximo ao de seus precursores,
8 assim como a biomassa ativada e não ativada termicamente.

9 Em relação aos ácidos de Brønsted, cujos resultados também são apresentados na
10 Tabela 2.2 e Figura 2.4, pode-se observar que maiores temperaturas de síntese preservaram
11 melhor a acidez de Brønsted, como observado também por GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ *et al.*,
12 (2024). Segundo os autores, o biocarvão produzido a partir da biomassa de algas *Sargassum*
13 pelo processo hidrotermal, sem ativação química a 180 °C, apresentou maior concentração de
14 sítios ácidos quando comparados à biomassa.

15 Os resultados da análise elementar estão alinhados com os resultados de FTIR (Figura
16 2.5), uma vez que foram observados diferentes grupos funcionais.

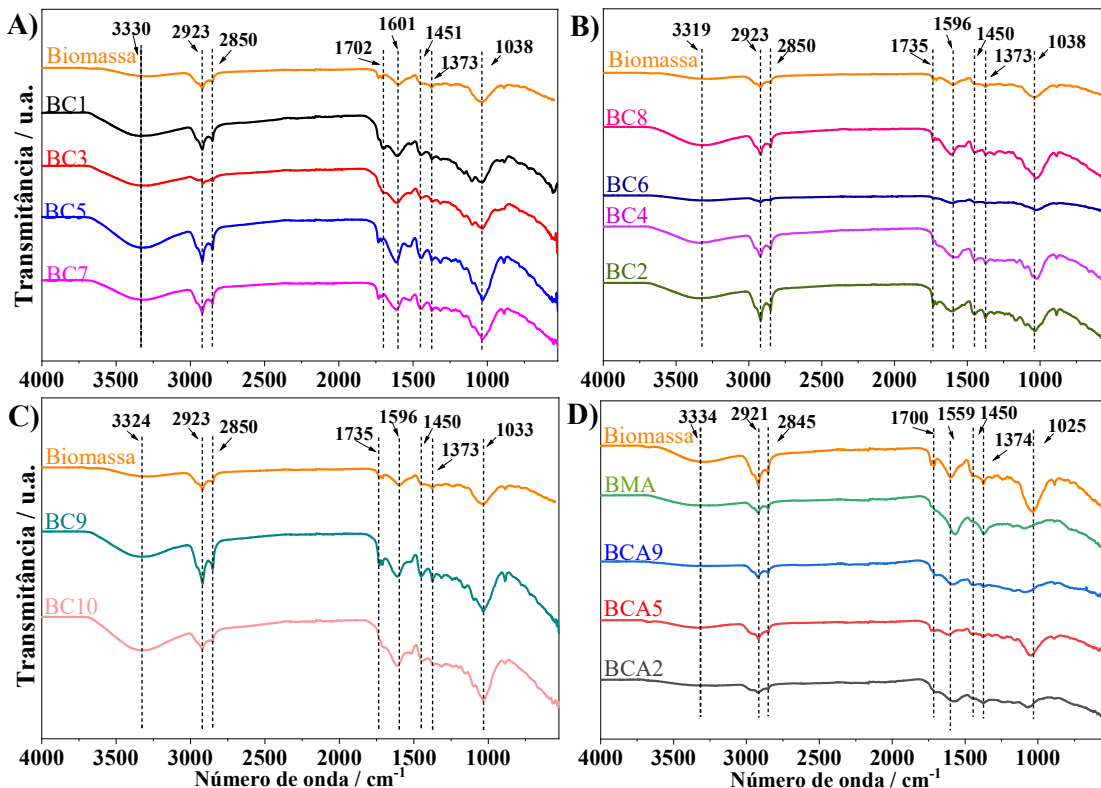


Figura 2.5. FTIR para os biocarvões (BC)

(A) BC ativados com H_3PO_4 . (B) BC ativados com NaOH. (C) BC sem uso de agente de ativação. (D) BC
ativados termicamente (300 °C por 1 h). Legenda: BC1 (200 °C, 14 h, H_3PO_4); BC2: (200 °C, 14 h, NaOH);
BC3 (200 °C, 8 h, H_3PO_4); BC4 (200 °C, 8 h, NaOH); BC5 (100 °C, 14 h, H_3PO_4); BC6 (100 °C, 14 h, NaOH);

Capítulo 2. Síntese de biocarvões de casca de banana para remoção de Fe e Mn em água

1 BC7 (100 °C, 8 h, H₃PO₄); BC8 (100 °C, 8 h, NaOH); BC9 (150 °C, 11 h, H₂O); BM (biomassa); BCA:
2 Biocarvões ativados termicamente (300 °C, 1 h), BCA2 (BC2 ativado); BCA5 (BC5 ativado); BCA9: (BC5
3 ativado); BMA: biomassa ativada termicamente.
4

5 Podem ser observadas bandas próximas à 3300 cm⁻¹, atribuídas a vibração de
6 estiramento de grupos hidroxilas (ν-OH). As bandas em 2900 e 2850 cm⁻¹ podem ser atribuídas
7 à vibração de estiramento simétrico e assimétrico das ligações de νC(sp³)-H (Ribeiro et al.,
8 2021). As bandas em torno de 1700 cm⁻¹ são atribuídas à estiramentos de ligações νC=O de
9 grupos cetonas e amidas (CUI *et al.*, 2024). As bandas em 1600 e 1450 cm⁻¹ são atribuídas a
10 estiramentos de ligações νC=C de compostos aromáticos (LIU *et al.*, 2025), enquanto as bandas
11 em 1038 cm⁻¹ podem ser atribuídas a estiramento de ligações νC-O de grupos carboxílicos
12 (TAFETE *et al.*, 2024).

13 Embora os espectros sejam muito parecidos para os diferentes biocarvões, pode-se
14 observar pequenos deslocamentos de bandas, que pode ser atribuída às suas diferenças
15 químicas. Pode-se observar, no entanto, que os biocarvões ativados termicamente apresentaram
16 uma diminuição considerável da banda próxima a 3300 cm⁻¹. Esse resultado pode estar
17 associado ao fato de que, conforme se aumenta a temperatura de síntese dos biocarvões, ocorre
18 a perda de água e grupos funcionais contendo OH (SILVA *et al.*, 2024).

19 Tendo-se em vista o grande número de biocarvões, foi realizada a aplicação desses
20 materiais na remoção de ferro e manganês em sistemas aquosos, dando sequência às
21 caracterizações. Os resultados são apresentados na Figura 2.6. Pode-se observar que os
22 biocarvões que apresentaram melhor desempenho, para ambos os metais, foram os BC2, BC5,
23 BC6, BC7, BC8 e BC9-10.

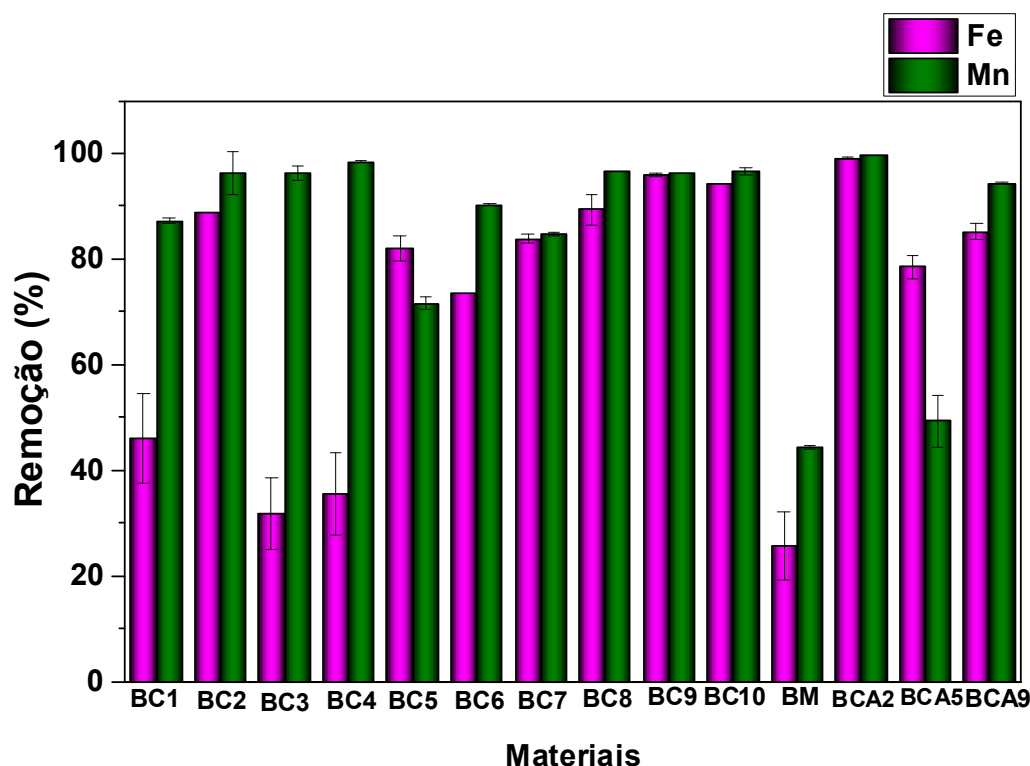


Figura 2.6. Remoção de Fe e Mn por biocarvões

Condições: [Fe] = 10 mg L⁻¹, [Mn] = 10 mg L⁻¹, V = 20 mL; Dose de BC= 50 mg, T ~25 °C, t = 24h. Legenda: BC1 (200 °C, 14 h, H₃PO₄); BC2: (200 °C, 14 h, NaOH); BC3 (200 °C, 8 h, H₃PO₄); BC4 (200 °C, 8 h, NaOH); BC5 (100 °C, 14 h, H₃PO₄); BC6 (100 °C, 14 h, NaOH); BC7 (100 °C, 8 h, H₃PO₄); BC8 (100 °C, 8 h, NaOH); BC9 (150 °C, 11 h, H₂O); BM (biomassa); BCA: Biocarvões ativados termicamente (300 °C, 1 h), BCA2 (BC2 ativado); BCA5 (BC5 ativado); BCA9: (BC5 ativado); BMA: biomassa ativada termicamente.

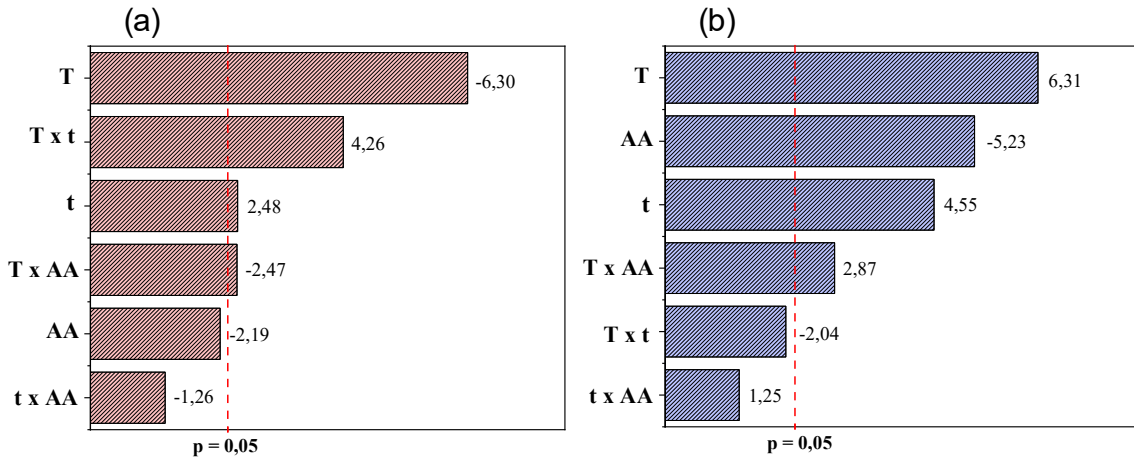
Fez-se análise estatística dos resultados de remoção de ferro e manganês para o planejamento fatorial 2³ para avaliar as variáveis que influenciam na produção do biocarvão. Os resultados são mostrados na Tabela 2.3 e na Figura 2.7.

Tabela 2.3. Análise estatística para o planejamento fatorial 2³ para avaliar quais as variáveis de síntese dos biocarvões que influenciaram na remoção de ferro

Ferro						
Parâmetro	Efeito	Erro	t(9)	p	Coefficiente	Erro
Temperatura (T)	-31,6964	4,983142	-6,36073	0,000131	-15,8482	2,491571
Tempo (t)	12,3687	4,983142	2,48211	0,034871	6,1843	2,491571
Agente de Ativação (AA)	-10,8981	4,983142	-2,18700	0,056526	-5,4491	2,491571
T x t	21,2447	4,983142	4,26332	0,002101	10,6224	2,491571
T x AA	-12,3162	4,983142	-2,47157	0,035479	-6,1581	2,491571
t x AA	-6,2763	4,983142	-1,25950	0,239532	-3,1381	2,491571
Manganês						
Parâmetro	Efeito	Erro	t(9)	p	Coefficiente	Erro
Temperatura (T)	10,57773	1,676939	6,3078	0,000027	5,28887	0,838469
Tempo (t)	7,62870	1,676939	4,5492	0,000546	3,81435	0,838469
Agente de Ativação (AA)	-8,77755	1,676939	-5,2343	0,000161	-4,38877	0,838469

Capítulo 2. Síntese de biocarvões de casca de banana para remoção de Fe e Mn em água

T x t	-3,42467	1,676939	-2,0422	0,061960	-1,71234	0,838469
T x AA	4,80850	1,676939	2,8674	0,013208	2,40425	0,838469
t x AA	2,09985	1,676939	1,2522	0,232559	1,04993	0,838469



1
2 **Figura 2.7.** Diagrama de Pareto para planejamento fatorial 2^3 (a) ferro e (b) manganês
3 tendo como variáveis independentes (1) temperatura (T), (2) tempo (t) e (3) Agente de ativação (AA). O ponto
4 no qual os efeitos estimados são estatisticamente significativos ($p = 0,05$) está indicado pela linha vertical
5 vermelha tracejada.

6 De acordo com o diagrama de Pareto, verifica-se que a temperatura exerceu um efeito
7 negativo ao nível de confiança de 95%, indicando que menores temperaturas favorecem a
8 adsorção de manganês. Por outro lado, o tempo exerceu um efeito negativo, o que sugere que
9 menores tempos favorecem a remoção de ferro. A interação das variáveis T×t e T×AA
10 apresentaram efeito positivo e negativo respectivamente. As demais variáveis não foram
11 significativas.

12 Para o manganês, verifica-se que as três variáveis são significativas. A temperatura e o
13 tempo apresentam um efeito positivo ao nível de confiança de 95%, enquanto o agente de
14 ativação, um efeito negativo, indicando que maiores temperaturas e tempo e ativação
15 favorecem a adsorção. Além disso, a interação das variáveis T×AA apresenta efeito positivo.
16 As demais variáveis não foram significativas.

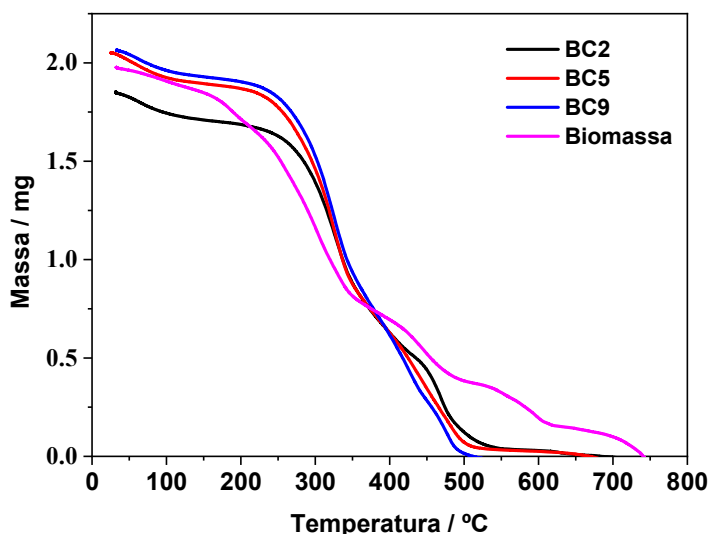
17 Para entender por que esses materiais apresentaram um desempenho superior, foram
18 realizadas outras caracterizações complementares para alguns biocarvões que apresentaram
19 melhores eficiências de adsorção: BC2: (200 °C, 14 h) ativado com NaOH; BC5 (100 °C, 14
20 h) ativado com H₃PO₄ e BC9 (150 °C, 11 h) sem ativação e a BM (biomassa).

21 Os materiais foram submetidos à análise termogravimétrica para avaliar sua
22 estabilidade térmica (Figuras 2.8 e 2.9).

23 De acordo com os resultados, nota-se para a biomassa *in natura* um evento térmico em
24 até 200 °C, que pode ser atribuída à perda de umidade. Um segundo evento térmico é observado
25 na faixa compreendida entre 200 e 400 °C, atribuída à degradação da hemicelulose e celulose

1 (LOPES & ASTRUC, 2021a). Pode também estar relacionada à compostos presentes na
2 estrutura do material, ocasionada pelas reações de despolimerização, craqueamento térmico
3 dos grupos funcionais e quebra da cadeia de celulose (SILVA *et al.*, 2022). Vale ressaltar que
4 este estágio é o que possui a maior perda de massa dos materiais, pois, a biomassa é composta
5 por majoritariamente celulose (~50%), hemiceluloses (~30%) e lignina (~25%). Como o
6 processo HTC é mais brando, isto é, contém matéria orgânica não carbonizada (LOPES;
7 ASTRUC, 2021), resulta em grande quantidade de substância que são degradadas neste estágio.
8 Por fim, no terceiro estágio, acima de 400 °C, nota-se mais uma perda de massa ocasionada
9 pela degradação da lignina.

10 Comparando os termogramas dos diferentes materiais, pode-se observar que os
11 biocarvões apresentam uma maior estabilidade térmica em relação à biomassa (KASSIM *et al.*,
12 2024), pois apresentam taxas de degradação maiores que a biomassa *in natura*.



13

14

15

16

Figura 2.8. Análise termogravimétrica dos biocarvões e biomassa (casca de banana).

Legenda: BC2: 200 °C, 14 h, ativado com NaOH, BC5: 100 °C, 14 h, ativado com H₃PO₄; BC9: 150 °C, 11 h, sem ativação química.

17

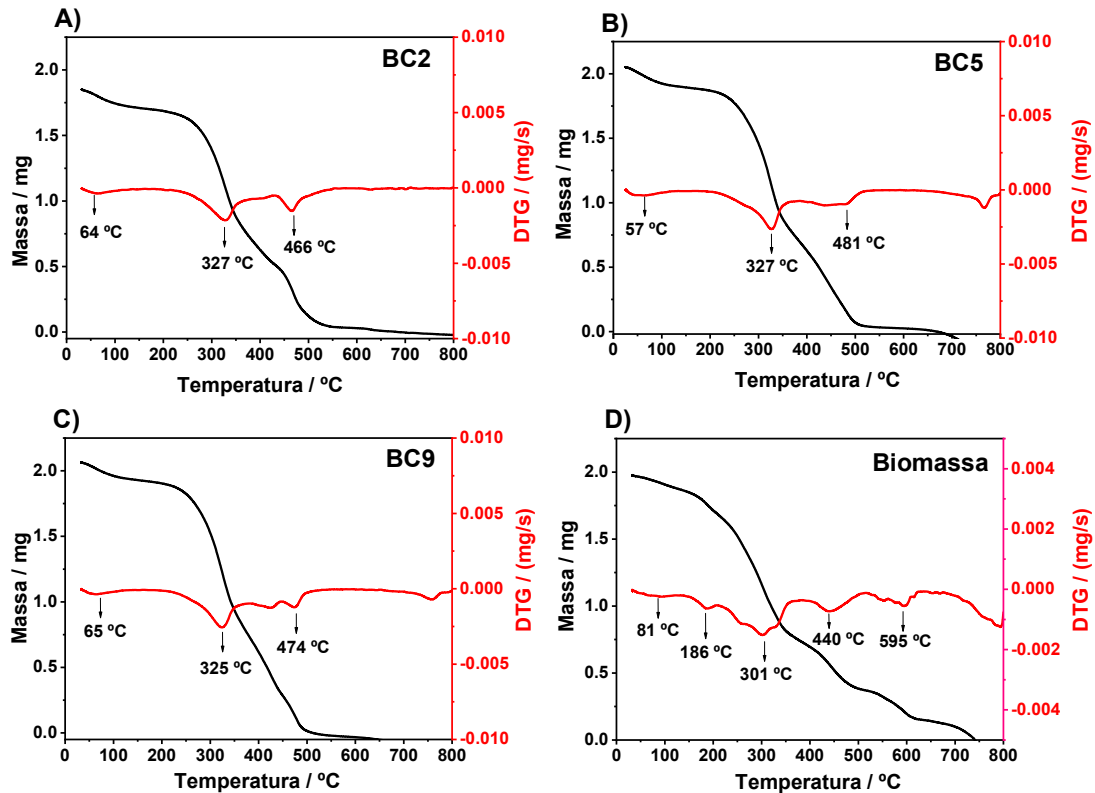
18

19

20

21

As análises termogravimétricas derivadas (DTG) são apresentadas na Figura 2.9. Pode-se observar que BC2, BC5 e BC9 são semelhantes e mais estáveis, quando comparados à biomassa. TAN *et al.*, (2024) também observaram um resultado semelhante para biocarvão produzido a partir de palha de arroz pela via hidrotermal, sem ativação química. Segundo os autores, o biocarvão apresentou maior estabilidade térmica quando comparado à biomassa.



1

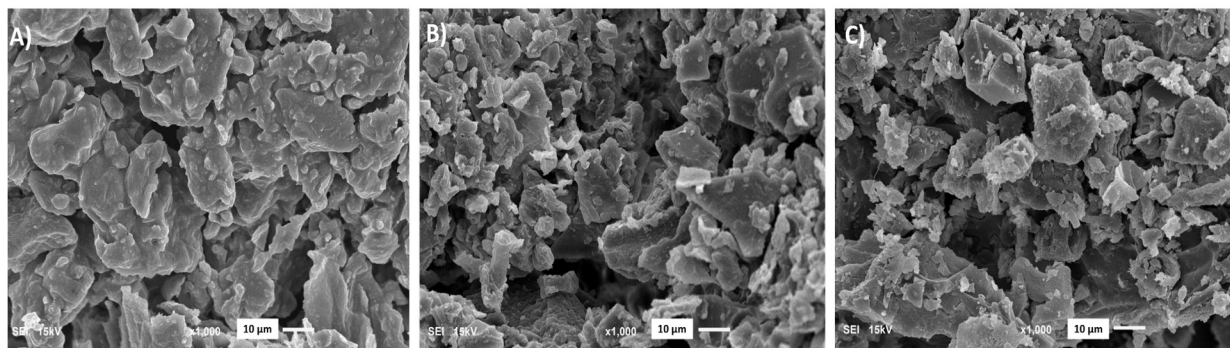
2 **Figura 2.9.** Análise termogravimétrica (TG) e Termogravimetria derivada (DTG) dos biocarbões e biomassa
3 (casca de banana).

4 Legenda: BC2: 200 °C, 14 h, ativado com NaOH, BC5: 100 °C, 14 h, ativado com H₃PO₄; BC9: 150 °C, 11 h,
5 sem ativação química.

6 Tendo em vista a eficiência de remoção de ferro e manganês pelos biocarbões, o BC9
7 foi selecionado para dar seguimento às demais caracterizações. Tal seleção foi devido à
8 utilização de temperatura intermediária entre 100 e 200 °C, além de não fazer o uso de agente
9 de ativação, o que pode viabilizar o processo sob o aspecto econômico.

10 Assim, fez-se a análise por MEV do BC9 e BCA9, sem e com ativação térmica, e da
11 biomassa (Figura 2.10). Pode-se observar que após o tratamento hidrotermal, a estrutura do
12 material se tornou mais fragmentada e apresentaram morfologia em forma de placas. A
13 superfície da biomassa apresenta características mais lisas e grossas, diferente das
14 características observadas no BC9, que possui a estrutura mais rugosa e mais fina, além de
15 maior fragmentação. Um aspecto semelhante é observado no BCA9, isto é, a sua estrutura
16 apresenta características mais finas e mais rugosas com cavidades. Por isso, quanto maior a
17 temperatura de síntese, mais fina é a estrutura do material (HU *et al.*, 2021) e, neste caso, maior
18 fragmentação.

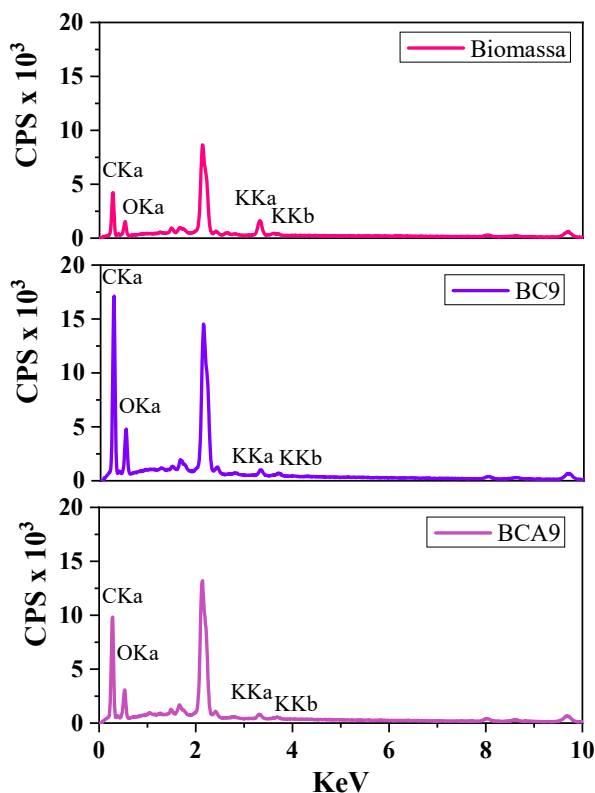
19



1

2 **Figura 2.10.** Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos biocarvões BC9 e BCA9 (ativado e
3 não ativado termicamente) e da biomassa de casca de banana
4 (A) Biomassa. B) BC9. (C) BCA9. Legenda: BC9: 150 °C, 11 h, sem ativação química. BCA9: BC9 ativado
5 termicamente (300 °C, 1 hora).
6

7 Os materiais foram caracterizados por EDS, cujos espectros são mostrados na Figura
8 2.11.



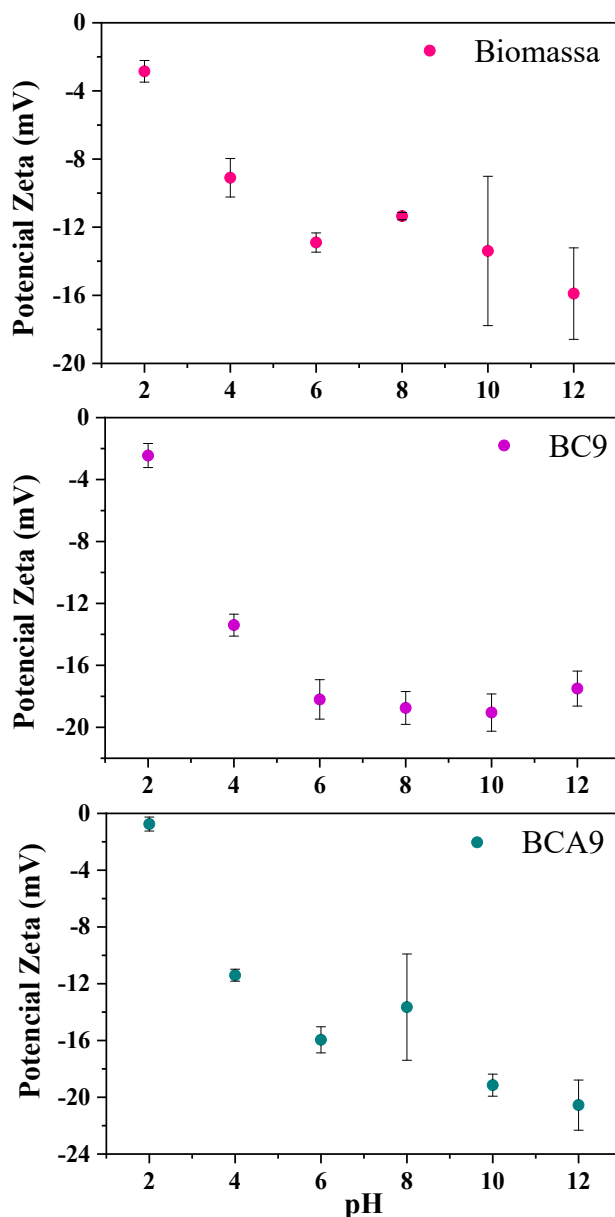
9

10 **Figura 2.11.** Espectro Espectroscopia por Energía Dispersiva (EDS) para biomassa de casca de banana, BC9 e
11 BCA9
12 Legenda: BC9: 150 °C, 11 h, sem ativação química. BCA9: BC9 ativado termicamente (300 °C, 1 hora).

13 Pode-se observar que tanto nos biocarvões (com e sem ativação térmica), quanto na
14 biomassa, há a presença de potássio. Resultados semelhantes foram observados por
15 BEHBAHAN *et al.* (2021), que produziram biocarvões modificados derivados da casca de
16 banana para remoção de pesticidas. Pode-se notar também que nos biocarvões, houve um

1 aumento nos picos referentes ao elemento carbono, alinhando-se aos resultados obtidos pelo
2 CHNS, apresentando uma porcentagem de 57% e 54% para o BC9 e BCA9, respectivamente,
3 enquanto para a biomassa foi de 42%.

4 O potencial zeta dos biocarvões, BC9 e BCA9, e da biomassa foram avaliados e os
5 resultados são apresentados na Figura 2.12.



6

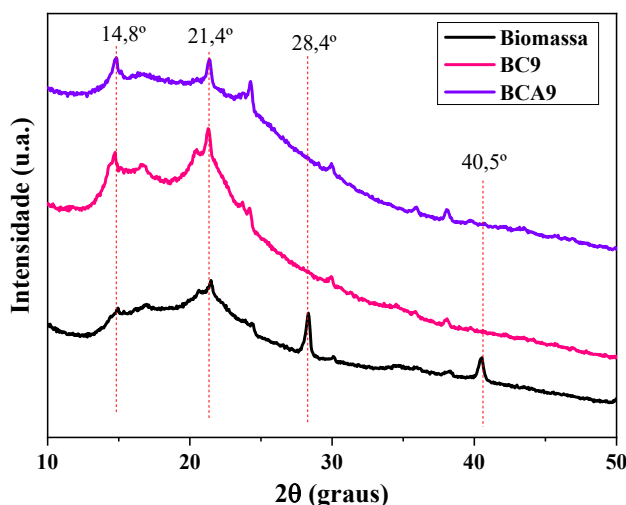
7 **Figura 2.12.** Potencial Zeta dos biocarvões, BC9 e BCA9, e da biomassa.

8 Legenda: BC9: 150 °C, 11 h, sem ativação química. BCA9: BC9 ativado termicamente (300 °C, 1 hora).

9 Pode-se observar que os três materiais apresentam um potencial zeta negativo na faixa
10 de pH de 2 a 12, apresentando valores mais negativos de potencial para o BCA9. Isso indica
11 que a superfície do material é negativa nesta faixa de pH. Pode-se observar que, para todos os
12 materiais, o potencial diminuiu à medida que se aumentou o pH das soluções. Isso ocorre

1 devido à desprotonação dos grupos funcionais presentes na superfície desses materiais,
2 aumentando-se as cargas negativas, o que favorece a interação com os cátions (TAN *et al.*,
3 2020). Além disso, com o aumento do valor absoluto do potencial zeta, aumenta-se as repulsões
4 entre as partículas dos materiais, devido ao aumento das cargas negativas de superfície dos
5 materiais, por isso, aumenta-se a dispersão das partículas, favorecendo a eficiência de remoção,
6 devido a um maior contato do adsorvente com o adsorbato (ZHU *et al.*, 2024).

7 Os materiais também foram submetidos à análise por DRX, cujos resultados são
8 mostrados na Figura 2.13. Pode-se observar que os materiais apresentaram um pico alargado
9 em 2θ na faixa entre 15° e 30° , devido à natureza amorfa dos biocarvões (LOPES & ASTRUC,
10 2021). No entanto, são observados picos definidos em 2θ igual a $28,4^\circ$ e $40,5^\circ$ na biomassa,
11 que podem ser atribuídos ao KCl (JCPDS 4-587).



12

13 **Figura 2.13.** Padrão de DRX da biomassa da casca de banana, do BC9 e BCA9

14 Legenda: BC9:

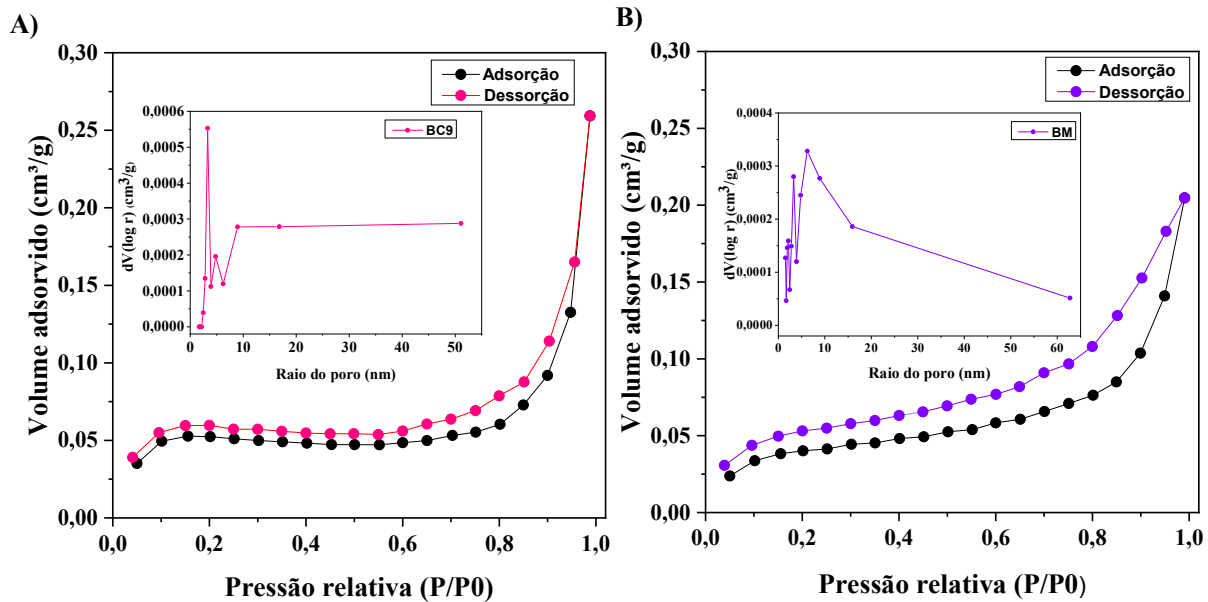
15

15 150 °C, 11 h, sem ativação química. BCA9: BC9 ativado termicamente (300 °C, 1 hora).

16 Tais resultados estão de acordo com o que foi observado no MEV/EDS. Nos
17 biocarvões, esses picos não aparecem devido à diminuição da quantidade dessa substância.
18 Essa diminuição ocorre, pois, durante a carbonização, ocorre a vaporização do KCl (KAUR *et*
19 *al.*, 2023). Observa-se também, nos biocarvões e na biomassa, um pico em $2\theta = 14,8^\circ$ que é um
20 pico típico atribuído à presença de celulose nos materiais (NIZAMUDDIN *et al.*, 2019). Além
21 disso, há um pico em $2\theta = 21,4^\circ$, que pode ser relacionado à sílica e carbono amorfos presentes
22 nos materiais (MINAEI *et al.*, 2023). À medida que a temperatura de síntese dos biocarvões
23 aumenta, aumenta-se a cristalinidade dos materiais, devido à decomposição térmica da matéria

1 orgânica (LAWA *et al.*, 2024), tornando a estrutura dos materiais mais organizada em relação
2 à biomassa.

3 Tendo-se em vista que BC9 apresentou melhor eficiência de remoção dos metais do
4 que BCA9, os demais ensaios foram realizados apenas com BC9. Essa decisão foi baseada ao
5 fato que inserir a ativação térmica encarece o processo e, além disso, os resultados de remoção
6 de ferro e manganês foram ligeiramente inferiores ao BC9. Assim, fez-se a análise de
7 fisissorção de nitrogênio para biomassa e BC9, cujos resultados são mostrados na Figura 2.14.
8 Pode-se observar que ambos os materiais apresentam isotermas reversíveis do tipo IV,
9 indicando que os materiais são mesoporosos, com diâmetros entre 2 e 50 nm. Tais resultados
10 sugerem que a adsorção se inicia nas paredes do mesoporo. As isotermas apresentaram um loop
11 de histerese H3, evidenciando que os poros são estreitos em formas de fendas, não exibindo
12 adsorção limitante em valores de P/P_0 altos (THOMMES *et al.*, 2015).



13 **Figura 2.14.** Análise de fisissorção de nitrogênio. (A) Biomassa. (B) BC9.

14 Legenda: BC9: 150 °C, 11 h, sem ativação química.

16 Os resultados da análise textural são mostrados na Tabela 2.4. Pode-se perceber que
17 ambos os materiais, biomassa e BC9, apresentaram uma pequena área superficial. Porém, a
18 área do BC9 foi ligeiramente superior. INCAN *et al.* (2024) sintetizaram biocarvão produzido
19 a partir do subproduto do processamento do caranguejo-das neves, sintetizado pelo processo
20 hidrotermal (180 °C por 3 horas). Segundo os autores, o biocarvão apresentou uma área
21 superficial específica de 19,23 m² g⁻¹, enquanto a biomassa apresentou uma área de
22 11,48 m² g⁻¹. CHAMBERS *et al.* (2023) também obtiveram uma pequena área superficial para

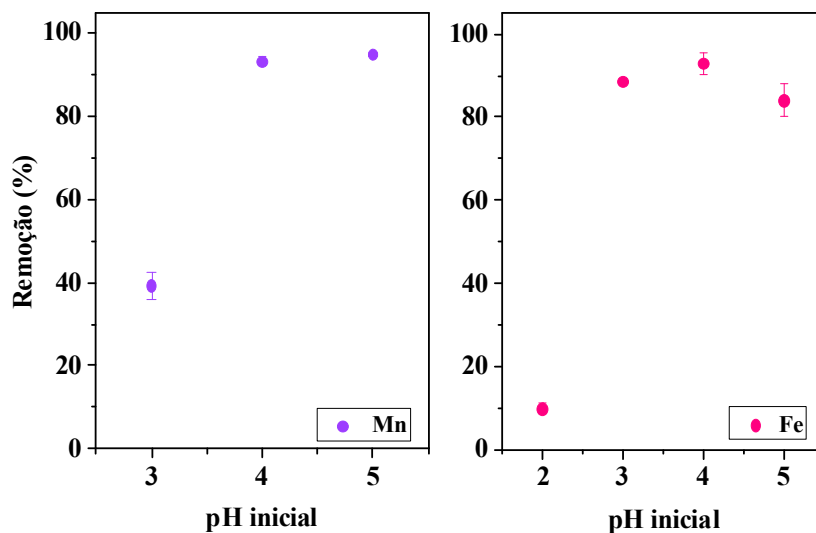
1 o biocarvão produzido pelo processo hidrotermal a partir de resíduos de palha de milho (1,97
2 m² g⁻¹).

3 **Tabela 2.4.** Parâmetros da análise de fisissorção de nitrogênio da biomassa e do BC9 (150°C, 11 horas e sem
4 ativação química).

Parâmetro	Biomassa	BC9
Área superficial (m ² g ⁻¹)	0,141	0,156
Volume de poro (cm ³ g ⁻¹)	0,000271	0,000355
Raio de poro (nm)	3,27434	2,81559

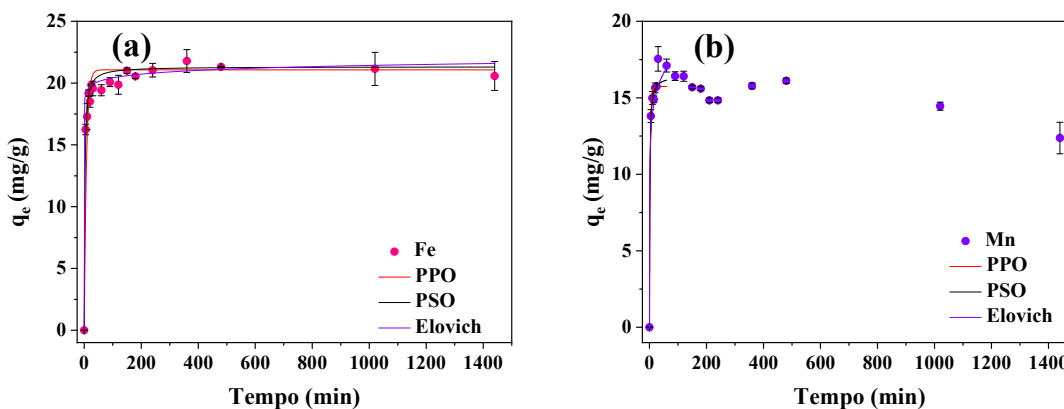
5 **2.1. APLICAÇÃO DOS BIOCÁRVÕES ATIVADOS NA REMOÇÃO DE Fe²⁺ e Mn²⁺**

6 A influência do pH sobre as soluções de ferro e manganês é mostrada na Figura 2.15.
7 Nota-se que, tanto para a solução de ferro quanto para a solução de manganês, não foi possível
8 avaliar pH acima de 5, pois acima desses valores ocorre a precipitação dos metais, como visto
9 no diagrama de Pourbaix (Fig. 1.2). Além disso, observa-se que em baixos valores de pH
10 (pH=2), a adsorção diminui consideravelmente. Vale ressaltar que o pHPZ do BC9 é igual a
11 4,8 e, portanto, em pH menor que 4,8 o material vai estar carregado positivamente. Assim, há
12 uma repulsão eletrostática entre os íons Fe²⁺ e Mn²⁺ e o adsorvente, confirmando os resultados
13 obtidos. Além disso, em menores valores de pH há uma maior concentração de íons H⁺ em
14 solução, resultando em uma competição pelos sítios ativos do adsorvente entre os Fe²⁺ e Mn²⁺
15 com os íons H⁺. Por outro lado, o material apresentará carga negativa em pH maior que 4,8,
16 devido à interação eletrostática entre o material negativos e os íons Fe²⁺ e Mn²⁺ favorecendo a
17 remoção (BRISHTI *et al.*, 2023).



1
2 **Figura 2.15.** Influência do pH inicial do sistema na remoção de íons ferro e manganês pelos biocarvão BC9.
3 Condições de síntese do BC9: 150°C, 11 horas e sem ativação química. Condições experimentais: [Fe] = 10
4 mg/L, [Mn] = 10 mg/L, volume de solução: 20 mL, massa de biocarvão: 50 mg, agitação: 200 rpm por 24 horas,
5 com ajuste de pH.

6 A cinética da adsorção de ferro e manganês pelo BC9 pode ser observada nas Figuras
7 2.16(a)-(b). Pode-se observar que o equilíbrio de adsorção é atingido em menos de 200 minutos
8 para ambos os metais. KAVEESHWAR *et al.* (2018) sintetizaram um biocarvão pelo processo
9 de pirólise de casca de noz-pecã para remoção de Fe(II) e evidenciaram um tempo de equilíbrio
10 de 150 min.



11
12 **Figura 2.16.** Estudo cinético de adsorção de (a) ferro e (b) pelo manganês pelo BC9.
13 Condições experimentais: [Fe] ou [Mn] = 100 mg L⁻¹, 20 mL de solução e 50 mg de biocarvão.
14 BC9: 150 °C, 11 horas e sem ativação química.

15 Os resultados dos parâmetros cinéticos da adsorção de ferro e manganês são mostrados
16 na Tabela 2.5.

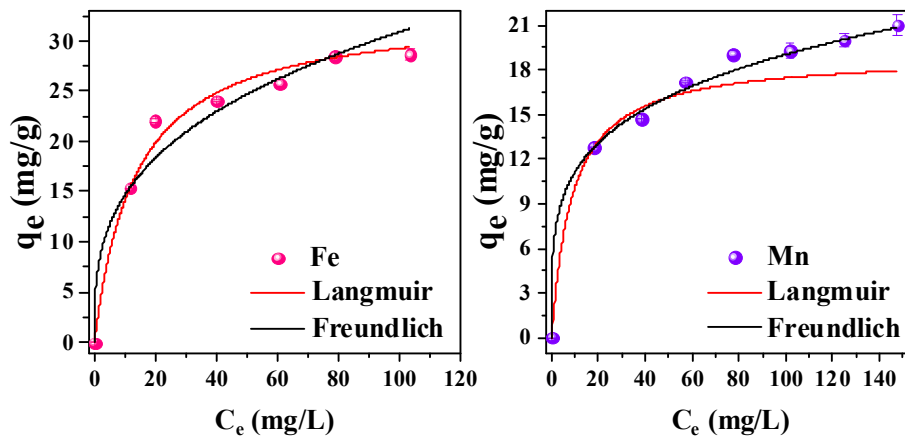
1 **Tabela 2.5.** Parâmetros cinéticos para adsorção de íons ferro e manganês utilizando o biocarvão BC9.

	Modelo	Parâmetros	Valor
Fe ²⁺	Pseudo Primeira Ordem (PPO)	q _e , calculado (mg g ⁻¹)	21,07 ± 0,19
		k ₁ (min ⁻¹)	0,13 ± 0,01
		R ²	0,9990
		AIC	59,43
	Pseudo Segunda Ordem (PSO)	q _e , calculado (mg g ⁻¹)	21,33 ± 0,07
		k ₂ (g mg ⁻¹ min ⁻¹)	0,025 ± 0,002
		R ²	0,9998
		AIC	22,42
	Elovich	a (mg g ⁻¹ min ⁻¹)	8,46*E13 ± 2,77*E14
		b (g mg ⁻¹)	1,82 ± 0,16
		R ²	0,9998
	Mn ²⁺	Pseudo Primeira Ordem (PPO)	q _e , calculado (mg g ⁻¹)
k ₁ (min ⁻¹)			0,39 ± 0,08
R ²			0,99998
AIC			22,65
Pseudo Segunda Ordem (PSO)		q _e , calculado (mg g ⁻¹)	16,47 ± 0,20
		k ₂ (g mg ⁻¹ min ⁻¹)	0,05 ± 0,01
		R ²	0,99999
		AIC	16,52
Elovich		a (mg g ⁻¹ min ⁻¹)	542,16 ± 59,94
		b (g mg ⁻¹)	0,58 ± 0,01
		R ²	0,85112

2 Pode-se observar que o modelo cinético de pseudo-segunda ordem descreve melhor o
3 comportamento cinético de adsorção para ambos os metais, pois apresentou um maior valor do
4 coeficiente de determinação (R²) e do menor valor de AIC. Esse modelo sugere que a ocorra a
5 quimiossorção e fisiossorção. Porém, a etapa limitante da taxa de adsorção é a quimiossorção,
6 ou seja, a etapa que envolve o compartilhamento ou troca de elétrons entre o adsorvato e
7 adsorvente (BURBANO *et al.*, 2023). O modelo de Elovich também foi ajustado aos dados

1 experimentais. Porém, como os desvios padrões dos parâmetros calculados foram muito
2 elevados, esse modelo foi descartado. PRAJAPATI *et al.*, (2020) sintetizaram um carvão
3 ativado a partir folhas residuais de *Aloe Vera* por pirólise e o aplicaram na adsorção de Cr(VI).
4 Segundo os autores, o modelo pseudo-segunda ordem se ajustou melhor aos dados
5 experimentais, semelhante ao encontrado neste trabalho.

6 As isotermas de adsorção de Fe²⁺ e Mn²⁺ foram avaliadas e os resultados são mostrados
7 na Figura 2.17. Os parâmetros dos modelos ajustados aos dados são mostrados na Tabela 2.7.
8 Para o ferro, o modelo de Langmuir se ajustou melhor aos dados experimentais, pois apresentou
9 maior valor de R², além de menor valor de AIC. Esse modelo indica que a adsorção ocorre em
10 monocamadas em superfícies homogêneas, apresentando valor de K_L entre 0 e 1, indicando
11 adsorção favorável (AHMED *et al.*, 2024). SEMA & BHATTACHARYYA (2022),
12 produziram um biocarvão derivado de brotos de bambu residual pelo processo de pirólise para
13 uso na remoção de íons ferro. Segundo os autores, o modelo isotérmico de Langmuir
14 apresentou melhor ajuste.



15 **Figura 2.17.** Isotherma de adsorção de íons ferro (a) e manganês (b) pelos biocarvão BC9
16 Condições de síntese do BC9: 150°C, 11 horas e sem ativação química. Condições experimentais: volume de
17 solução: 20 mL, massa de biocarvão: 50 mg, agitação: 200 rpm por 24 horas a 25°C.
18

19 Para a adsorção de manganês, pode-se observar na Tabela 2.6 que o modelo de
20 Freundlich se ajustou melhor aos dados experimentais, pois apresentou menor valor de AIC e
21 maior valor de R². Esse modelo sugere que a adsorção ocorre em multicamadas em superfícies
22 heterogêneas, além de apresentar n>1, indicando que a adsorção é favorável
23 (PRASANNAMEDHA *et al.*, 2021). Nos estudos termodinâmicos da adsorção de manganês
24 realizados por KIM *et al.* (2020), o modelo de Freundlich também se ajustou melhor aos dados
25 experimentais de adsorção do biocarvão de casca de banana produzido pelo processo de
26 pirólise.

Capítulo 2. Síntese de biocarvões de casca de banana para remoção de Fe e Mn em água

1 Os valores de q_{\max} obtido para Fe^{2+} e Mn^{2+} foram, respectivamente, 33,18 e 19,00
2 mg g^{-1} . SUI *et al.* (2021), obtiveram um q_{\max} para adsorção de Fe (II) de 50,02 mg g^{-1} a 25 °C,
3 a partir do biocarvão de palha de milho produzido pelo processo de pirólise. CASTRO *et al.*,
4 (2023) encontraram um valor de q_{\max} de 20,14 mg g^{-1} para a adsorção de Mn por biocarvão
5 produzido a partir do bagaço de cana-de-açúcar pelo processo de pirólise.

6

7 **Tabela 2.6.** Parâmetros isotérmicos para adsorção de íons ferro utilizando o biocarvão BC9.

	Modelo	Parâmetros	Valor
Fe^{2+}	Langmuir	q_{\max} (mg g^{-1})	$33,18 \pm 1,11$
		K_L (L mg^{-1})	$0,07 \pm 0,002$
		R^2	0,9996
		AIC	36,54
	Freundlich	K_F (mg g^{-1}) / (mg L^{-1}) ^{1/n}	$6,97 \pm 0,214$
		n	$3,09 \pm 0,090$
		R^2	0,9993
		AIC	41,62
Mn^{2+}	Modelo	Parâmetros	Valor
	Langmuir	q_{\max} (mg g^{-1})	$19,00 \pm 0,829$
		K_L (L mg^{-1})	$0,11 \pm 0,017$
		R^2	0,9976
		AIC	48,18
	Freundlich	K_F (mg g^{-1}) / (mg L^{-1}) ^{1/n}	$6,53 \pm 0,354$
		n	$4,30 \pm 0,312$
		R^2	0,9991
		AIC	41,06

8 **2.1. AVALIAÇÃO DE INTERFERENTES NA ADSORÇÃO DE Fe^{2+} e Mn^{2+}** 9 **PELO BC9**

10 A avaliação de interferentes na adsorção de Fe^{2+} e Mn^{2+} pelo BC9 foi avaliada utilizando
11 água de torneira para preparar a solução de ferro e manganês, que naturalmente contém a
12 presença de outros íons como cloreto, sódio, cálcio, magnésio, entre outros (INGIN *et al.*,

1 2024). A escolha dessa matriz para a avaliação de interferentes se deve à aplicação desejada
2 para os biocarvões, que consiste na remoção de Fe^{2+} e Mn^{2+} de água potável. Para isso, fez-se
3 a análise de potencial redox e condutância, como mostrado na Tabela 2.7. Como esperado a
4 condutância da água de torneira apresentou um resultado significativamente maior que da água
5 tipo II devido à presença dos íons mencionados anteriormente. Os demais resultados foram
6 similares.

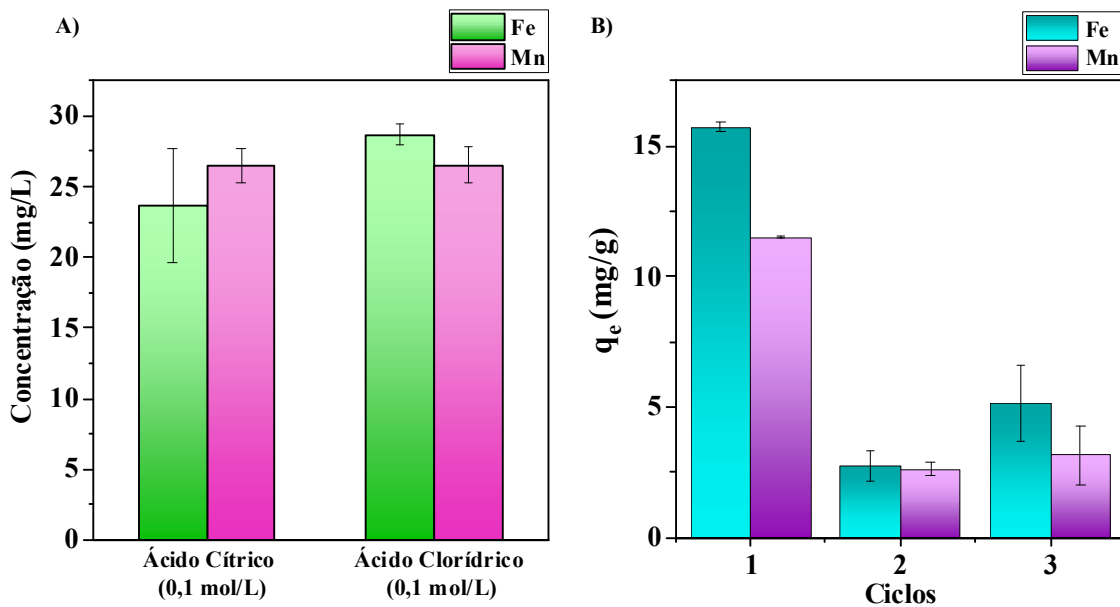
7 **Tabela 2.7.** Efeito de matriz na adsorção de ferro e manganês pelo BC9 em água de torneira

Biocarvão	Potencial Redox (mV)	Condutância (μs)	q_{e-Fe} (mg/g)	q_{e-Mn} (mg/g)
Água da torneira	408	189	18,56	16,31
Água tipo II	446	0,95	21,33	16,47

8 A adsorção de Fe^{2+} e Mn^{2+} em água tipo II e água de torneira pelo BC9, dada pelo q_e
9 teórico (Tabela 2.8) foram semelhantes, podendo-se concluir que não houve grande influência
10 da matriz na adsorção dos metais.

11 Estudos de regeneração e reutilização do biocarvões foram realizados para avaliar a sua
12 utilização em outros ciclos de adsorção de ferro e manganês (Figura 2.18). Observa-se que a
13 solução de ácido clorídrico apresentou melhores resultados de dessorção de ferro e manganês,
14 uma vez que se obteve a maior concentração de ambos os metais.

15



16

17

18

Figura 2.18. Regeneração e reuso do BC9. (A) Regeneração do biocarvão BC9 (150 °C, 11 h e sem ativação química) e (B) Reúso do biocarvão BC9 (150 °C, 11 h e sem ativação química).

1 Sendo assim, os ciclos de reuso foram prosseguidos utilizando solução de HCl para
2 regeneração do BC9. A partir dos resultados dos ciclos de reuso, pode-se observar que houve
3 uma diminuição na capacidade de adsorção de 15,73 para 2,74 mg g⁻¹ para o ferro e de
4 11,50 para 2,62 mg g⁻¹ para o manganês. A redução na eficiência de remoção pode ter ocorrido
5 devido à obstrução dos sítios de adsorção do biocarvão pelo ácido clorídrico, o que dificultou
6 a interação entre a superfície e os íons (CASTRO *et al.*, 2023). Embora a eficiência tenha
7 diminuído, foram utilizadas concentrações muito elevadas de ferro e manganês, o que não
8 ocorre em aplicações reais.

9 SILVA *et al.*, (2023) também obtiveram resultado semelhante em seus experimentos
10 de regeneração e reuso do biocarvão produzido pelo processo hidrotermal a partir de resíduos
11 de frutas cítricas. Os autores avaliaram que a melhor solução extratora para dessorção de íons
12 Cu (II) era ácido clorídrico 0,5 mol L⁻¹. Segundo os autores, a eficiência de remoção diminuiu
13 de 45 mg g⁻¹ para 9 mg g⁻¹.

14 3. CONCLUSÃO

15 Neste trabalho foram sintetizados biocarvões a partir de casca de banana por via
16 sustentável, empregando processo hidrotermal, usando temperaturas moderadas de síntese. Os
17 biocarvões foram caracterizados por diferentes técnicas analíticas, os quais evidenciaram a
18 carbonização, mantendo a presença de grupos funcionais e grupos ácido-base de Bronsted. Os
19 biocarvões foram ligeiramente mais estáveis termicamente que a biomassa. Os biocarvões
20 ativados termicamente apresentaram desempenho inferior quando comparados aos outros
21 biocarvões. Observou-se também nos biocarvões que a estrutura do material é fragmentada e
22 em forma de placas, evidenciando a carbonização, além de ser formada por mesoporos.

23 Para a remoção dos íons Fe e Mn, a adsorção pelos biocarvões ocorre tanto por
24 fisissorção quanto por quimissorção, sendo o segundo a etapa limitante do processo.
25 Também foi possível avaliar que a adsorção de ferro ocorre em monocamadas e a de manganês
26 em multicamada, evidenciando também a capacidade máxima de adsorção de ambos os
27 metais, sendo de 49,81 mg g⁻¹ para ferro e 24,62 mg g⁻¹ para manganês.

28 Por fim, evidenciou-se que, ao aplicar o biocarvão em água de torneira, não há influência
29 significativa da matriz na adsorção dos metais. Também observou-se que é possível fazer a
30 dessorção com a utilização de ácido clorídrico e que, mesmo que a eficiência no reuso do
31 material tenha sido baixa, ainda pode-se aplicá-lo, visto que em águas residuárias, a
32 concentração desses íons é bem inferior à utilizada nos experimentos deste trabalho.

33 Diante dos resultados obtidos, nota-se que a utilização destes materiais para a adsorção

1 é um caminho promissor para remoção de ferro e de manganês em sistemas aquosos, além de
2 ser e ecologicamente correto, transformando resíduos agroindustriais em materiais de alto valor
3 agregado e de baixo custo. Além disso, vale ressaltar que este estudo está de acordo com os
4 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, sendo eles: saúde e bem-estar,
5 água potável e saneamento e vida na água.

6 **4. PERSPECTIVAS PARA FUTUROS TRABALHOS**

7 Como sugestão para futuros trabalhos, tem-se:

- 8 • Otimizar a produção do biocarvão, para encontrar o ponto ótimo para a síntese,
9 utilizando planejamentos que apresentem superfícies de resposta;
- 10 • Avaliar a termodinâmica da adsorção dos íons de ferro e manganês pelo
11 biocarvão;
- 12 • Avaliar outras formas de regeneração do biocarvão;
- 13 • Avaliar o uso do biocarvão para a adsorção de contaminantes emergentes;
- 14 • Avaliar a adsorção dos metais pelo biocarvão em águas residuárias.

15 **5. REFERÊNCIAS**

- 16 Abdullah, N., Mohd Taib, R., Mohamad Aziz, N. S., Omar, M. R., & Md Disa, N. (2023).
17 Banana pseudo-stem biochar derived from slow and fast pyrolysis process. *Heliyon*, 9(1),
18 e12940. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12940>
- 19 Acevedo, S. A., Carrillo, Á. D., Flórez-López, E., & Grande-Tovar, C. D. (2021). Recovery of
20 Banana Waste-Loss from Production and Processing: A Contribution to a Circular
21 Economy. *Molecules*, 26(17), 5282. <https://doi.org/10.3390/molecules26175282>
- 22 Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., & Guo, W. (2016). Insight into biochar properties and
23 its cost analysis. *Biomass and Bioenergy*, 84, 76–86.
24 <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.002>
- 25 Ahmed, M. M. M., Liao, C.-H., Liu, Y.-T., Venkatesan, S., Hsieh, Y.-C., Nail, H. M., Wang,
26 H.-M. D., Lin, M.-C., Jien, S.-H., & Tzou, Y. (2024). Sulfur-Functionalized Rice Straw
27 Biochar for Enhanced Cadmium Sorption: Spectroscopic, Kinetic and Computational
28 Insights. *Journal of Cleaner Production*, 144267.
29 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144267>
- 30 Akbari, A., Peighambaroust, S. J., & Lotfi, M. (2023). Hydrochar derived from Licorice root
31 pulp utilizing catalytic/non-catalytic hydrothermal carbonization: RSM optimization and
32 cationic dye adsorption assessment. *Journal of Water Process Engineering*, 55, 104099.
33 <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104099>

Capítulo 2. Síntese de biocarvões de casca de banana para remoção de Fe e Mn em água

- 1 Alaei Shahmirzadi, M. A., Hosseini, S. S., Luo, J., & Ortiz, I. (2018). Significance, evolution
2 and recent advances in adsorption technology, materials and processes for desalination,
3 water softening and salt removal. *Journal of Environmental Management*, 215, 324–344.
4 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.040>
- 5 Ali, K., Javaid, M. U., Ali, Z., & Zaghum, M. J. (2021). Biomass-Derived Adsorbents for Dye
6 and Heavy Metal Removal from Wastewater. *Adsorption Science & Technology*, 2021.
7 <https://doi.org/10.1155/2021/9357509>
- 8 Ali Khan, M., Hameed, B. H., Raza Siddiqui, M., Alothman, Z. A., & Alsohaimi, I. H. (2022).
9 Physicochemical properties and combustion kinetics of food waste derived hydrochars.
10 *Journal of King Saud University - Science*, 34(4), 101941.
11 <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101941>
- 12 Alimohammadi, V., Sedighi, M., & Jabbari, E. (2017). Experimental study on efficient removal
13 of total iron from wastewater using magnetic-modified multi-walled carbon nanotubes.
14 *Ecological Engineering*, 102, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.044>
- 15 Alomar, T., Hameed, B. H., Al-Ghouti, M. A., Almomani, F. A., & Han, D. S. (2024). A review
16 on recent developments and future prospects in the treatment of oily petroleum refinery
17 wastewater by adsorption. *Journal of Water Process Engineering*, 64, 105616.
18 <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105616>
- 19 An, Q., Miao, Y., Zhao, B., Li, Z., & Zhu, S. (2020). An alkali modified biochar for enhancing
20 Mn²⁺ adsorption: Performance and chemical mechanism. *Materials Chemistry and*
21 *Physics*, 248, 122895. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.122895>
- 22 Apolinario, M. D. F., Meireles, L. M., Santana, H. F., & Silva, D. D. J. (2018). ESTUDO DA
23 REMOÇÃO DE ÍONS FERRO E MANGANÊS DA ÁGUA UTILIZANDO PERÓXIDO
24 DE HIDROGÊNIO COMO AGENTE OXIDANTE. *The Journal of Engineering and*
25 *Exact Sciences*, 4(4), 0412–0419. <https://doi.org/10.18540/jcecvl4iss4pp0412-0419>
- 26 Aragón-Briceño, C. I., Pozarlik, A. K., Bramer, E. A., Niedzwiecki, L., Pawlak-Kruczek, H.,
27 & Brem, G. (2021). Hydrothermal carbonization of wet biomass from nitrogen and
28 phosphorus approach: A review. *Renewable Energy*, 171, 401–415.
29 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.109>
- 30 Arriola-Villaseñor, E., Ardila A, A. N., Rolando Barrera, Z., & Hernández, J. (2023). Using
31 banana waste biochar for simultaneous removal of heavy metals from raw real wastewater
32 from the electroplating industry. *Desalination and Water Treatment*, 314, 88–102.
33 <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.30079>
- 34 ASTM D1762-84. (2013). *Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal*. ASTM
35 International. <https://doi.org/10.1520/D1762-84R13>

- 1 Behbahan, A. K., Mahdavi, V., Roustaei, Z., & Bagheri, H. (2021). Preparation and evaluation
2 of various banana-based biochars together with ultra-high performance liquid
3 chromatography-tandem mass spectrometry for determination of diverse pesticides in
4 fruiting vegetables. *Food Chemistry*, 360, 130085.
5 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130085>
- 6 Bortolini, G. A., & Fisberg, M. (2010). Orientação nutricional do paciente com deficiência de
7 ferro. *Revista Brasileira de Hematologia e Hemoterapia*, 32, 105–113.
8 <https://doi.org/10.1590/S1516-84842010005000070>
- 9 Brishti, R. S., Kundu, R., Habib, Md. A., & Ara, M. H. (2023a). Adsorption of iron(III) from
10 aqueous solution onto activated carbon of a natural source: Bombax ceiba fruit shell.
11 *Results in Chemistry*, 5, 100727. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100727>
- 12 Brishti, R. S., Kundu, R., Habib, Md. A., & Ara, M. H. (2023b). Adsorption of iron(III) from
13 aqueous solution onto activated carbon of a natural source: Bombax ceiba fruit shell.
14 *Results in Chemistry*, 5, 100727. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100727>
- 15 Burbano, A. A., Gascó, G., Horst, F., Lassalle, V., & Méndez, A. (2023). Production,
16 characteristics and use of magnetic biochar nanocomposites as sorbents. *Biomass and
17 Bioenergy*, 172, 106772. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106772>
- 18 Castillo, M., de Guzman, Ma. J. K., & Aberilla, J. M. (2023). Environmental sustainability
19 assessment of banana waste utilization into food packaging and liquid fertilizer.
20 *Sustainable Production and Consumption*, 37, 356–368.
21 <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.03.012>
- 22 Castro, A. E., Penido, E. S., Souza, T. F., Camargos, J. B., Lobato, R. L. M., Ribeiro-Soares,
23 J., Ferreira, G. M. D., & Ferreira, G. M. D. (2023). Biochars from modified sugarcane
24 bagasse for manganese removal from mining effluents. *Journal of Environmental
25 Chemical Engineering*, 11(5), 110761. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110761>
- 26 Chambers, C., Nagar, H., Sharma, S., & Toufiq Reza, M. (2023). Elucidating microcystin-LR
27 adsorption on pyrolyzed hydrochars via experiments and molecular simulations. *Journal
28 of Analytical and Applied Pyrolysis*, 176, 106243.
29 <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106243>
- 30 Chauhan, M., Saini, V. K., & Suthar, S. (2020). Ti-pillared montmorillonite clay for adsorptive
31 removal of amoxicillin, imipramine, diclofenac-sodium, and paracetamol from water.
32 *Journal of Hazardous Materials*, 399, 122832.
33 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122832>
- 34 Chen, L., Mi, B., He, J., Li, Y., Zhou, Z., & Wu, F. (2023). Functionalized biochars with highly-
35 efficient malachite green adsorption property produced from banana peels via microwave-
36 assisted pyrolysis. *Bioresource Technology*, 376, 128840.
37 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128840>

- 1 Chen, X., Ma, X., & Jiang, J. (2024). Phosphate-modified hydrothermal biochar: Green and
2 efficient uranium adsorption. *Materials Letters*, 377, 137363.
3 <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.137363>
- 4 Cui, D., Zhang, B., Liu, Y., Wu, S., Wang, X., Wang, Q., Zhang, X., Fattahi, M., & Zhang, J.
5 (2024). Hydrochar from co-hydrothermal carbonization of sewage sludge and sunflower
6 stover: Synergistic effects and combustion characteristics. *Journal of Analytical and*
7 *Applied Pyrolysis*, 183, 106777. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106777>
- 8 Cui, Y., Du, W., Zhang, Y., Hu, J., & Kang, W. (2025). Adsorption characteristics and removal
9 mechanism of quinoline in wastewater by walnut shell-based biochar. *Journal of Water*
10 *Process Engineering*, 70, 106980. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.106980>
- 11 da Silva, M. D., da Boit Martinello, K., Knani, S., Lütke, S. F., Machado, L. M. M., Manera,
12 C., Perondi, D., Godinho, M., Collazzo, G. C., Silva, L. F. O., & Dotto, G. L. (2022).
13 Pyrolysis of citrus wastes for the simultaneous production of adsorbents for Cu(II), H₂,
14 and d-limonene. *Waste Management*, 152, 17–29.
15 <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.07.024>
- 16 da Silva, M. D., Schnorr, C., Lütke, S. F., Silva, L. F. O., Manera, C., Perondi, D., Godinho,
17 M., Collazzo, G. C., & Dotto, G. L. (2023). Citrus fruit residues as alternative precursors
18 to developing H₂O and CO₂ activated carbons and its application for Cu(II) adsorption.
19 *Environmental Science and Pollution Research*, 30(23), 63661–63677.
20 <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26860-2>
- 21 de Castro, A. E., Penido, E. S., Souza, T. F., Camargos, J. B., Lobato, R. L. M., Ribeiro-Soares,
22 J., Ferreira, G. M. D., & Ferreira, G. M. D. (2023). Biochars from modified sugarcane
23 bagasse for manganese removal from mining effluents. *Journal of Environmental*
24 *Chemical Engineering*, 11(5), 110761. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110761>
- 25 DI BERNARDO, L., & DANTAS, A. D. B. (2005). *Métodos e técnicas de tratamento de água*.
26 . São Carlos: RiMa.
- 27 Dong, J., & Liu, H. (2025). Silsesquioxane-crosslinked chitosan aerogels with highly selective
28 adsorption for Au(III). *International Journal of Biological Macromolecules*, 296, 139686.
29 <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139686>
- 30 Duwiejuah, A. B., Mutawakil, Z., & Oyelude, E. O. (2024a). Eco-friendly banana peel biochar
31 for adsorption of toxic metals from landfill treatment pond leachate. *International Journal*
32 *of Phytoremediation*, 1–10. <https://doi.org/10.1080/15226514.2024.2428434>
- 33 Elsheref, M., Ahmed, A., Elmelegy, E., Tarr, M. A., Hammad, W., & Darweesh, M. A. (2024).
34 Adsorptive potential of apricot (*Prunus Armeniaca*) stone in the removal of Cr (VI) and
35 Fe (II) ions from Aquatic Systems: Kinetic and isothermal investigations. *Journal of*
36 *Hazardous Materials Advances*, 16, 100498.
37 <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100498>

Capítulo 2. Síntese de biocarvões de casca de banana para remoção de Fe e Mn em água

- 1 Embrapa - Mandioca e Fruticultura. ([s.d.]). *Produção brasileira de banana em 2022*.
2 Recuperado 16 de janeiro de 2025, de chrome-
3 extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.cnpmf.embrapa.br/Base_de
4 _Dados/index_pdf/dados/brasil/banana/b1_banana.pdf
- 5 Fang, Y., Yang, L., Rao, F., Zheng, Y., & Song, Z. (2025). Adsorption behavior and mechanism
6 of MB, Pb(II) and Cu(II) on porous geopolymers. *Ceramics International*.
7 <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.12.564>
- 8 Fernandez, M. E., Ledesma, B., Román, S., Bonelli, P. R., & Cukierman, A. L. (2015).
9 Development and characterization of activated hydrochars from orange peels as potential
10 adsorbents for emerging organic contaminants. *Bioresource Technology*, 183, 221–228.
11 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.02.035>
- 12 FONTOURA, C. R. de O., DUTRA, L. V., GUEZGÜAN, S. M., NASCIMENTO, M. A.,
13 OLIVEIRA, A. F., & LOPES, R. P. (2022). Optimization of one-pot H3PO4-activated
14 hydrochar synthesis by Doehlert design: Characterization and application. *Journal of*
15 *Analytical and Applied Pyrolysis*, 168, 105775.
16 <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105775>
- 17 General Assembly. (2010). *Resolução 64/A/RES/64/292*.
- 18 González-Fernández, L. A., Medellín-Castillo, N. A., Navarro-Frómata, A. E., Castillo-Ramos,
19 V., Sánchez-Polo, M., & Carrasco-Marín, F. (2024). Optimization of hydrochar synthesis
20 conditions for enhanced Cd(II) and Pb(II) adsorption in mono and multimetallic systems.
21 *Environmental Research*, 261, 119651. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119651>
- 22 Guimarães, T., de Carvalho Teixeira, A. P., de Oliveira, A. F., & Lopes, R. P. (2020). Biochars
23 obtained from arabica coffee husks by a pyrolysis process: characterization and
24 application in Fe(Fe^{2+}) removal in aqueous systems. *New Journal of*
25 *Chemistry*, 44(8), 3310–3322. <https://doi.org/10.1039/C9NJ04144C>
- 26 Guimarães, T., Luciano, V. A., Silva, M. S. V., de Carvalho Teixeira, A. P., da Costa, M. M.,
27 & Lopes, R. P. (2022). Biochar-iron composites: An efficient material for dyes removal.
28 *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 17, 100645.
29 <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100645>
- 30 Hasanov, I., Raud, M., & Kikas, T. (2020). The Role of Ionic Liquids in the Lignin Separation
31 from Lignocellulosic Biomass. *Energies*, 13(18), 4864.
32 <https://doi.org/10.3390/en13184864>
- 33 Hu, Z.-T., Ding, Y., Shao, Y., Cai, L., Jin, Z.-Y., Liu, Z., Zhao, J., Li, F., Pan, Z., Li, X., &
34 Zhao, J. (2021). Banana peel biochar with nanoflake-assembled structure for cross
35 contamination treatment in water: Interaction behaviors between lead and tetracycline.
36 *Chemical Engineering Journal*, 420, 129807. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129807>

Capítulo 2. Síntese de biocarvões de casca de banana para remoção de Fe e Mn em água

- 1 Idrees, M., Batool, S., Ullah, H., Hussain, Q., Al-Wabel, M. I., Ahmad, M., Hussain, A., Riaz,
2 M., Ok, Y. S., & Kong, J. (2018). Adsorption and thermodynamic mechanisms of
3 manganese removal from aqueous media by biowaste-derived biochars. *Journal of*
4 *Molecular Liquids*, 266, 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.06.049>
- 5 Incan, N., Hawboldt, K. A., & MacQuarrie, S. (2024). Hydrothermal carbonization of snow
6 crab processing by-product: Hydrochar characterization. *Journal of Analytical and*
7 *Applied Pyrolysis*, 183, 106767. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106767>
- 8 Ingin, Y. P., Mahringer, D., & El-Athman, F. (2024). Hardness properties of calcium and
9 magnesium ions in drinking water. *Applied Food Research*, 4(2), 100600.
10 <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100600>
- 11 Jian, X., Zhuang, X., Li, B., Xu, X., Wei, Z., Song, Y., & Jiang, E. (2018). Comparison of
12 characterization and adsorption of biochars produced from hydrothermal carbonization
13 and pyrolysis. *Environmental Technology & Innovation*, 10, 27–35.
14 <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.01.004>
- 15 John, B., Krishnan, D., Athira, S., Amsi, A., Anukrishnan, S., Maya, T. M. V., & Krishnan, K.
16 A. (2024). Synthesis and characterization of amine functionalized silylated clay for heavy
17 metal adsorption: Thermodynamic and kinetic studies on Fe(III) ion. *International*
18 *Journal of Biological Macromolecules*, 279, 134963.
19 <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134963>
- 20 Kapoor, R. T., Rafatullah, M., Siddiqui, M. R., Khan, M. A., & Sillanpää, M. (2022). Removal
21 of Reactive Black 5 Dye by Banana Peel Biochar and Evaluation of Its Phytotoxicity on
22 Tomato. *Sustainability*, 14(7), 4176. <https://doi.org/10.3390/su14074176>
- 23 Karim, A. A., Kumar, M., Singh, S. K., Panda, C. R., & Mishra, B. K. (2017b). Potassium
24 enriched biochar production by thermal plasma processing of banana peduncle for soil
25 application. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 123, 165–172.
26 <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.12.009>
- 27 Kassim, F. O., Sohail, M., Taylor, B., & Afolabi, O. O. D. (2024). Hydrothermal carbonisation
28 of mixed agri-food waste: Process optimisation and mechanistic evaluation of hydrochar
29 inorganic chemistry. *Biomass and Bioenergy*, 180, 107027.
30 <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.107027>
- 31 KAUR, P., SHARMA, N., & KAUR, K. (2023). Influence of pyrolysis temperature on rice
32 straw biochar properties and corresponding effects on dynamic changes in bispyribac-
33 sodium adsorption and leaching behavior in soil. *Pedosphere*, 33(3), 463–478.
34 <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.06.046>
- 35 Kaveeshwar, A. R., Ponnusamy, S. K., Revellame, E. D., Gang, D. D., Zappi, M. E., &
36 Subramaniam, R. (2018). Pecan shell based activated carbon for removal of iron(II) from
37 fracking wastewater: Adsorption kinetics, isotherm and thermodynamic studies. *Process*

- 1 *Safety and Environmental Protection*, 114, 107–122.
2 <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.12.007>
- 3 Kim, H., Ko, R.-A., Lee, S., & Chon, K. (2020). Removal Efficiencies of Manganese and Iron
4 Using Pristine and Phosphoric Acid Pre-Treated Biochars Made from Banana Peels.
5 *Water*, 12(4), 1173. <https://doi.org/10.3390/w12041173>
- 6 Krysanova, K., Krylova, A., Kulikova, M., Kulikov, A., & Rusakova, O. (2022). Biochar
7 characteristics produced via hydrothermal carbonization and torrefaction of peat and
8 sawdust. *Fuel*, 328, 125220. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125220>
- 9 Lawa, Y., Benu, F. L., Boimau, K., Riwu, D. B. N., Kune, P., Faria da Silva, A.,
10 Widyaningrum, B. A., Darmokoesoemoe, H., Kusuma, H. S., & Neolaka, Y. A. B. (2024).
11 Hydrochar preparation from wild weeds (*Amaranthus* sp.) and its application as artificial
12 soil for hydroponic system. *Kuwait Journal of Science*, 51(4), 100277.
13 <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2024.100277>
- 14 Liu, X., Li, G., Chen, C., Zhang, X., Zhou, K., & Long, X. (2022). Banana stem and leaf biochar
15 as an effective adsorbent for cadmium and lead in aqueous solution. *Scientific Reports*,
16 12(1), 1584. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05652-7>
- 17 Liu, X., Peng, L., Deng, P., Xu, Y., Wang, P., Tan, Q., Zhang, C., & Dai, X. (2025). Co-
18 hydrothermal carbonization of sewage sludge and rice straw to improve hydrochar quality:
19 Effects of mixing ratio and hydrothermal temperature. *Bioresource Technology*, 415,
20 131665. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131665>
- 21 Liu, Y., Li, G., Lu, F., Guo, Z., Cai, S., & Huo, T. (2023). Excess iron intake induced liver
22 injury: The role of gut-liver axis and therapeutic potential. *Biomedicine &*
23 *Pharmacotherapy*, 168, 115728. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2023.115728>
- 24 Lopes, R. P., Guimarães, T., Moro, M. M., Guisasola, E., Moya, S., & Astruc, D. (2022).
25 Magnetic Biochar-Supported Pd Nanoparticles as a Peroxidase-Like Catalyst. *Waste and*
26 *Biomass Valorization*, 13(8), 3629–3637. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01740-x>
- 27 Marsidi, N., Abu Hasan, H., & Sheikh Abdullah, S. R. (2018). A review of biological aerated
28 filters for iron and manganese ions removal in water treatment. *Journal of Water Process*
29 *Engineering*, 23, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.01.010>
- 30 Minaei, S., Zoroufchi Benis, K., McPhedran, K. N., & Soltan, J. (2023). Evaluation of a ZnCl₂-
31 modified biochar derived from activated sludge biomass for adsorption of
32 sulfamethoxazole. *Chemical Engineering Research and Design*, 190, 407–420.
33 <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.12.038>
- 34 Mokrzycki, J., Wolak, E., Orzechowska-Zieba, A., Zheng, K., Duraczyńska, D., Marzec, M.,
35 & Fedyna, M. (2024). The effect of copper(II) salt precursor on physicochemical
36 properties of HKUST-1 MOFs and their application as adsorbents of Cr(III) ions from

- 1 aqueous solutions. *Journal of Water Process Engineering*, 64, 105761.
2 <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105761>
- 3 NASCIMENTO, R. F., LIMA, A. C. A., VIDAL, C. B., MELO, D. Q., & RAULINO, G. S. C.
4 (2020). *ADSORÇÃO Aspectos teóricos e aplicações ambientais*.
- 5 Nizamuddin, S., Qureshi, S. S., Baloch, H. A., Siddiqui, M. T. H., Takkalkar, P., Mubarak, N.
6 M., Dumbre, D. K., Griffin, G. J., Madapusi, S., & Tanksale, A. (2019). Microwave
7 Hydrothermal Carbonization of Rice Straw: Optimization of Process Parameters and
8 Upgrading of Chemical, Fuel, Structural and Thermal Properties. *Materials*, 12(3), 403.
9 <https://doi.org/10.3390/ma12030403>
- 10 Nkele, K., Mpenyana-Monyatsi, L., & Masindi, V. (2022). Challenges, advances and
11 sustainabilities on the removal and recovery of manganese from wastewater: A review.
12 *Journal of Cleaner Production*, 377, 134152.
13 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134152>
- 14 Oliveira, M., Lima, A., Figueredo, R., Acciari, H., & Codaro, E. (2018). UM ESTUDO
15 TERMODINÂMICO DA CORROSÃO DOS AÇOS CARBONO PELO SULFETO DE
16 HIDROGÊNIO – EXPLORANDO CONCEITOS DE EQUILÍBRIO QUÍMICO. *Química
17 Nova*. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170186>
- 18 Ormaza Hugo, R., Naranjo, J., Gavilanez Alvarez, I., Cando, V. M., Tixi Gallegos, K.,
19 Sánchez-Moreno, H., Londo, F., Gavilanez, O. D., & Coello-Cabezas, J. (2024).
20 Production of hydrochar by low-temperature hydrothermal carbonization of residual
21 biomass from cocoa production for mercury adsorption in acidic aqueous solutions. *Case
22 Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10, 100938.
23 <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100938>
- 24 Pak, S.-H., Park, S.-M., An, J., & Park, C. (2018). Adsorption behavior of poly(methacrylic
25 acid)/iron-oxide-coated zeolite for the removal of Mn(II), Fe(II), and As(III) from aqueous
26 solution. *Desalination and Water Treatment*, 123, 150–155.
27 <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22649>
- 28 Pan, T., Guo, Z., Zhang, X., & Feng, L. (2024b). Hydrothermal carbonization of biomass waste
29 and application of produced hydrochar in organic pollutants removal. *Journal of Cleaner
30 Production*, 457, 142386. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142386>
- 31 Pantoja, F., Beszédés, S., Gyulavári, T., Illés, E., Kozma, G., & László, Z. (2024). Ammonium
32 ion removal from aqueous solutions in the presence of organic compounds, using biochar
33 from banana leaves. Competitive isotherm models. *Heliyon*, 10(10), e31495.
34 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31495>
- 35 Pereira, D., Fonseca, R., Marin-Montesinos, I., Sardo, M., & Mafra, L. (2023). Understanding
36 CO₂ adsorption mechanisms in porous adsorbents: A solid-state NMR survey. *Current*

- 1 *Opinion in Colloid & Interface Science*, 64, 101690.
2 <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2023.101690>
- 3 Pereira, G. R., Lopes, R. P., Wang, W., Guimarães, T., Teixeira, R. R., & Astruc, D. (2022).
4 Triazole-functionalized hydrochar-stabilized Pd nanocatalyst for ullmann coupling.
5 *Chemosphere*, 308, 136250. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136250>
- 6 Pereira Lopes, R., & Astruc, D. (2021a). Biochar as a support for nanocatalysts and other
7 reagents: Recent advances and applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 426,
8 213585. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213585>
- 9 Portet, S. (2020). A primer on model selection using the Akaike Information Criterion.
10 *Infectious Disease Modelling*, 5, 111–128. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2019.12.010>
- 11 Prajapati, A. K., Das, S., & Mondal, M. K. (2020). Exhaustive studies on toxic Cr(VI) removal
12 mechanism from aqueous solution using activated carbon of Aloe vera waste leaves.
13 *Journal of Molecular Liquids*, 307, 112956. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112956>
- 14 Prasannamedha, G., Kumar, P. S., Mehala, R., Sharumitha, T. J., & Surendhar, D. (2021).
15 Enhanced adsorptive removal of sulfamethoxazole from water using biochar derived from
16 hydrothermal carbonization of sugarcane bagasse. *Journal of Hazardous Materials*, 407,
17 124825. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124825>
- 18 Quansah, J. O., Obiri-Nyarko, F., & Karikari, A. Y. (2024). Adsorptive removal of dissolved
19 Iron from groundwater by brown coal – A low-cost adsorbent. *Journal of Contaminant*
20 *Hydrology*, 260, 104283. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104283>
- 21 Reis, J. M. dos, Aguiar, A. B. S., Freitas, G., Vassoler, V. C., Barros, G. V. L., Santos, G. E.,
22 Ramirez, I., & Rodriguez, R. P. (2022). Técnicas de remoção de metais de águas
23 residuárias: uma revisão de literatura. *Research, Society and Development*, 11(2),
24 e5251126100. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i2.26100>
- 25 Ribeiro, M. R., Guimarães, Y. de M., Silva, I. F., Almeida, C. A., Silva, M. S. V., Nascimento,
26 M. A., da Silva, U. P., Varejão, E. V., Renato, N. dos S., Teixeira, A. P. de C., & Lopes,
27 R. P. (2021). Synthesis of value-added materials from the sewage sludge of cosmetics
28 industry effluent treatment plant. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4),
29 105367. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105367>
- 30 Rudi, N. N., Muhamad, M. S., Te Chuan, L., Alipal, J., Omar, S., Hamidon, N., Abdul Hamid,
31 N. H., Mohamed Sunar, N., Ali, R., & Harun, H. (2020). Evolution of adsorption process
32 for manganese removal in water via agricultural waste adsorbents. *Heliyon*, 6(9), e05049.
33 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05049>
- 34 Savitri, S., Reguyal, F., & Sarmah, A. K. (2023). A feasibility study on production,
35 characterisation and application of empty fruit bunch oil palm biochar for Mn²⁺ removal

Capítulo 2. Síntese de biocarvões de casca de banana para remoção de Fe e Mn em água

- 1 from aqueous solution. *Environmental Pollution*, 318, 120879.
2 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120879>
- 3 Schümann, K., Ettle, T., Szegner, B., Elsenhans, B., & Solomons, N. W. (2007). On risks and
4 benefits of iron supplementation recommendations for iron intake revisited. *Journal of*
5 *Trace Elements in Medicine and Biology*, 21(3), 147–168.
6 <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2007.06.002>
- 7 SEBRAE. (2023). *Brasil é o 4º produtor mundial de banana*.
8 [https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/brasil-e-o-4-produtor-mundial-de-](https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/brasil-e-o-4-produtor-mundial-de-banana,1f00286bf0837810VgnVCM1000001b00320aRCRD)
9 [banana,1f00286bf0837810VgnVCM1000001b00320aRCRD](https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/brasil-e-o-4-produtor-mundial-de-banana,1f00286bf0837810VgnVCM1000001b00320aRCRD)
- 10 Sema, A. I., & Bhattacharyya, J. (2022). Biochar derived from waste bamboo shoots for the
11 biosorptive removal of ferrous ions from aqueous solution. *Journal of the Indian Chemical*
12 *Society*, 99(12), 100791. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100791>
- 13 Sevilla, M., & Fuertes, A. B. (2009). The production of carbon materials by hydrothermal
14 carbonization of cellulose. *Carbon*, 47(9), 2281–2289.
15 <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.04.026>
- 16 Silva, A. A. dos S., Bousada, G. M., Mazzini, L. F. M., Guezguan, S. M., de Freitas, C. P. M.,
17 Monteiro, K. A., dos Santos Renato, N. dos S., & Moreira, R. P. L. (2024). Biochar from
18 malt residue: Toward a circular economy for sustainable fluoroquinolone removal in
19 aqueous systems. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 183, 106707.
20 <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106707>
- 21 SNATURAL AMBIENTE. ([s.d.]). *Filtros e Filtração de Água – Carvão Ativado*. Recuperado
22 20 de janeiro de 2025, de <https://www.snatural.com.br/filtro-agua-carvao-ativado/>
- 23 Soares, I. dos S., Costa, M. S. B., Gomes, M. A., Freitas, A. Á. de, & Barros, A. J. de. (2021).
24 Estudo da remoção e controle de ferro nas águas da nascente Serra do Andrade-MG.
25 *Research, Society and Development*, 10(6), e59910615980. [https://doi.org/10.33448/rsd-](https://doi.org/10.33448/rsd-v10i6.15980)
26 [v10i6.15980](https://doi.org/10.33448/rsd-v10i6.15980)
- 27 Sui, L., Tang, C., Du, Q., Zhao, Y., Cheng, K., & Yang, F. (2021). Preparation and
28 characterization of boron-doped corn straw biochar: Fe (II) removal equilibrium and
29 kinetics. *Journal of Environmental Sciences*, 106, 116–123.
30 <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.01.001>
- 31 Tafete, G. A., Uysal, A., Habtu, N. G., Abera, M. K., Yemata, T. A., Duba, K. S., & Kinayyigit,
32 S. (2024). Hydrothermally synthesized nitrogen-doped hydrochar from sawdust biomass
33 for supercapacitor electrodes. *International Journal of Electrochemical Science*, 19(11),
34 100827. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100827>
- 35 Tan, M., Li, H., Huang, Z., Li, C., Li, X., Wu, Z., Zhang, X., Qin, X., Huang, J., & Yang, H.
36 (2024). Metal chlorides and ammonium persulfate hydrothermal carbonization for

- 1 enhanced pyrolysis behavior and biochar properties. *Journal of Analytical and Applied*
2 *Pyrolysis*, 179, 106469. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106469>
- 3 Tan, Z., Yuan, S., Hong, M., Zhang, L., & Huang, Q. (2020). Mechanism of negative surface
4 charge formation on biochar and its effect on the fixation of soil Cd. *Journal of Hazardous*
5 *Materials*, 384, 121370. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121370>
- 6 Thiruvankadam, S., Izhar, S., Yoshida, H., Danquah, M. K., & Harun, R. (2015). Process
7 application of Subcritical Water Extraction (SWE) for algal bio-products and biofuels
8 production. *Applied Energy*, 154, 815–828.
9 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.076>
- 10 Thomas, D., Fernandez, N. B., Mullassery, M. D., Surya, R., & Jacob, L. E. (2023). Banana
11 stem biochar composite with polyaniline for energy storage applications. *Results in*
12 *Chemistry*, 6, 101088. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.101088>
- 13 Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol,
14 J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the
15 evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and*
16 *Applied Chemistry*, 87(9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- 17 Üçer, A., Uyanik, A., & Aygün, Ş. F. (2006). Adsorption of Cu(II), Cd(II), Zn(II), Mn(II) and
18 Fe(III) ions by tannic acid immobilised activated carbon. *Separation and Purification*
19 *Technology*, 47(3), 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2005.06.012>
- 20 Venkatesan, S., Baloch, H. A., Jamro, I. A., & Rafique, N. (2022). Evaluation of the production
21 of hydrochar from spent coffee grounds under different operating conditions. *Journal of*
22 *Water Process Engineering*, 49, 103037. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103037>
- 23 Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of
24 biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1002–1022.
25 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>
- 26 Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 217, 240–261.
27 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054>
- 28 Xu, S., Yu, W., Liu, S., Xu, C., Li, J., & Zhang, Y. (2018). Adsorption of Hexavalent
29 Chromium Using Banana Pseudostem Biochar and Its Mechanism. *Sustainability*, 10(11),
30 4250. <https://doi.org/10.3390/su10114250>
- 31 Zhou, N., Chen, H., Xi, J., Yao, D., Zhou, Z., Tian, Y., & Lu, X. (2017). Biochars with excellent
32 Pb(II) adsorption property produced from fresh and dehydrated banana peels via
33 hydrothermal carbonization. *Bioresource Technology*, 232, 204–210.
34 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.074>

Capítulo 2. Síntese de biocarvões de casca de banana para remoção de Fe e Mn em água

- 1 Zhu, C., Zhang, J., Huang, G., & Zhu, D. Z. (2024). UV-modified biochar-Bacillus subtilis
2 composite: An effective method for enhancing Cd(II) adsorption from water. *Biochemical*
3 *Engineering Journal*, 212, 109527. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2024.109527>

4

5