



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS – ICET
CURSO DE QUÍMICA INDUSTRIAL



KALLIS SANNARA SANTOS DA SILVA

**PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA CASCA DA BANANA
PACOVAN (*Musa Paradisiaca* L.)**

ITACOATIARA – AM

2025

KALLIS SANNARA SANTOS DA SILVA

**PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA CASCA DA BANANA
PACOVAN (*Musa Paradisiaca* L.)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Química Industrial da Universidade
Federal do Amazonas (UFAM), como requisito
para obtenção do título de bacharelado.

Orientadora: Prof(a). Dr(a). Margarida Carmo de Souza

Co-orientadora: Prof(a). Me. Rafaela Fernanda Batista Ferreira

ITACOATIARA – AM

2025

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S586p Silva , Kallis Sannara Santos da
Produção de carvão ativado a partir da casca da banana pacovan (Musa
Paradisíaca L.) / Kallis Sannara Santos da Silva . - 2025.
60 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): Margarida Carmo de Souza.
Coorientador(a): Rafaela Fernanda Batista Ferreira.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal do
Amazonas, Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia de Itacoatiara, Curso
de Química Industrial, Itacoatiara, 2025.

1. Biomassa. 2. Adsorção. 3. Tratamento de água. 4. Sustentabilidade . I.
Souza, Margarida Carmo de. II. Ferreira, Rafaela Fernanda Batista. III.
Universidade Federal do Amazonas. Instituto de Ciências Exatas e
Tecnologia de Itacoatiara. Curso de Química Industrial. IV. Título

AGRADECIMENTOS

Durante toda a minha vida, escolhi ser forte, corajosa e determinada, e isso devo a Ti, meu querido e amado Deus. Obrigada pela força que me concedeste, pela paciência e pelo dom da vida. Agradeço por ter me dado meu paizinho, meu avô Angelino Figueira dos Santos, que não está mais aqui, mas sei que estaria orgulhoso de mim e de onde cheguei. Agradeço também à minha avó Raimunda Nonata, que esteve ao meu lado, acompanhando meus estudos quando minha mãe não podia.

Sou grata à minha mãe, Roseleia Souza dos Santos, que sempre me apoiou e incentivou da forma que pôde, com amor, carinho e paciência. E agradeço às minhas lindas irmãs, que me mantêm viva, esperançosa e firme.

Ao meu namorado, Luanderson dos Santos Gama, deixo minha gratidão por ter estado comigo durante toda essa jornada, ouvindo meus problemas, ajudando a organizá-los e mostrando caminhos mais leves para que a graduação não se tornasse tão pesada. Aos meus queridos colegas e amigos da turma 2018/2, meu sincero agradecimento. Sou grata a Deus por ter colocado vocês na minha vida. Vocês tornaram mais leve o fardo de estar sozinha na universidade e deixaram meus dias mais felizes. Hoje me alegro em ver que nos tornamos químicos industriais.

Agradeço imensamente a todos os meus professores, que foram luz no meu caminho. De forma especial, à minha orientadora, Professora Margarida Carmo de Souza, que me acolheu com carinho, me incentivou e sempre dizia, com um sorriso: “Vai dar certo” ou “Calma, vai dar certo”. Seus ensinamentos me deram confiança para realizar este trabalho. Agradeço também à Professora Rafaela Fernanda Batista, que mesmo por um curto período, contribuiu para o desenvolvimento da minha pesquisa e para o meu crescimento profissional.

E, por fim, mas não menos importante, agradeço a mim mesma. Obrigada por não desistir, por não desanimar e por lembrar que a vida e o conhecimento abrem portas. Carrego comigo o orgulho da minha trajetória e a certeza de que cada passo valeu a pena. Hoje colho o fruto de anos de esforço, fé e persistência.

RESUMO

A região Amazônica, apesar de sua vasta biodiversidade, enfrenta desafios significativos, como o manejo inadequado de resíduos vegetais e o limitado acesso a sistemas de tratamento de água por parte da população. Nesse contexto, este estudo avaliou o potencial da casca da banana pacovan (*Musa paradisiaca* L.) como material precursor de carvão ativado para purificação de águas superficiais. As cascas foram obtidas em feiras do município de Itacoatiara-AM, higienizadas, cortadas, secas a 100 °C por 24 h, trituradas, carbonizadas a 400 °C por 1 h e classificadas por granulometria. O teor de cinzas foi determinado por calcinação a 700 °C por 12 h e a ativação química do carvão vegetal foi realizada utilizando $ZnCl_2$ (1:1). O material apresentou teor de cinzas de 1,5%, indicando alta pureza, e rendimento de 75,05% na fração *mesh* 60 (0,25 mm). As análises espectroscópicas evidenciaram desempenho superior do carvão ativado nos processos de adsorção em comparação à biomassa desidratada e ao carvão vegetal. O ajuste das isotermas revelou que o carvão ativado em agitação (CAA) apresentou melhor correlação com o modelo de Langmuir, com capacidade máxima de adsorção de 230,10 $mg \cdot g^{-1}$ e coeficiente de determinação $R^2 = 0,9794$, enquanto o modelo de Freundlich não representou adequadamente os dados experimentais. Nos estudos cinéticos, o modelo de pseudosegunda ordem descreveu de forma mais adequada a adsorção, exceto para a concentração de 25 $mg \cdot L^{-1}$, que apresentou melhor ajuste ao modelo de pseudoprimeira ordem, comportamento atribuído à elevada disponibilidade de sítios ativos em relação à baixa quantidade de moléculas adsorvidas, favorecendo um processo mais rápido e superficial. Os resultados demonstram que o carvão ativado obtido a partir da casca de banana pacovan constitui uma alternativa eficiente, sustentável e economicamente viável para o tratamento de águas, apresentando potencial promissor para aplicações em escala ambiental e industrial.

Palavras-chave: *Biomassa, adsorção, tratamento de água, sustentabilidade*

ABSTRACT

The Amazon region, despite its vast biodiversity, faces significant challenges, such as the inadequate management of plant residues and the limited access to water treatment systems among the population. In this context, this study evaluated the potential of pacovan banana peel (*Musa paradisiaca* L.) as a precursor material for activated carbon production aimed at the purification of surface waters. The peels were collected from markets in the municipality of Itacoatiara-AM, cleaned, cut, dried at 100 °C for 24 h, ground, carbonized at 400 °C for 1 h, and classified by granulometry. The ash content was determined by calcination at 700 °C for 12 h, and the chemical activation of the charcoal was performed using ZnCl₂ (1:1). The material presented an ash content of 1.5%, indicating high purity, and a yield of 75.05% in the 60-mesh fraction (0.25 mm). Spectroscopic analyses showed superior adsorption performance of the activated carbon compared to the dehydrated biomass and the non-activated charcoal. Isotherm modeling revealed that the activated carbon under agitation (CAA) exhibited better correlation with the Langmuir model, with a maximum adsorption capacity of 230.10 mg·g⁻¹ and a coefficient of determination R² = 0.9794, while the Freundlich model did not adequately represent the experimental data. In the kinetic studies, the pseudo-second-order model provided the best description of the adsorption process, except for the concentration of 25 mg·L⁻¹, which showed better adjustment to the pseudo-first-order model. This behavior was attributed to the high availability of active sites relative to the low amount of adsorbed molecules, favoring a faster and more superficial process. The results demonstrate that the activated carbon produced from pacovan banana peel is an efficient, sustainable, and economically viable alternative for water treatment, showing promising potential for environmental and industrial-scale applications.

Keywords: *Biomass, adsorption, water treatment, sustainability*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma das etapas metodológicas deste estudo.....	25
Figura 2: Casca da banana pacovan	26
Figura3: Cascas limpas	26
Figura 4: Biomassa desidratada.....	27
Figura 5: (A) Liquidificador; (B) biomassa obtida.	27
Figura 6: (A) Mufla; (B) Carvão vegetal da casca da banana pacovan.....	28
Figura 7: Granulometria com telas de 5, 9, 32, 45 e 60 mesh.....	28
Figura 8: Cadinhos de Porcelana.....	29
Figura 9: A) Agitador Magnético Múltiplo B) Espectrofotômetro.	31
Figura 10: Curvas das análises termogravimétricas da casca de banana pacovan. (A) TG/DTG-Biomassa; (B) TG/DTG-Carvão Vegetal; (C) TG/DTG-Carvão ativado.	37
Figura 11: I) Agitação e II) Repouso; A) Biomassa; B) Carvão Vegetal e C) Carvão Ativado.	40
Figura 12: Espectro de adsorção do Carvão Ativado (CA) da banana pacovan em agitação e repouso em diferentes concentrações de Azul de Metileno (AM): (A)10 mg L ⁻¹ , (B) 25 mg L ⁻¹ ; (C) 50 mg L ⁻¹ ; (D) 100 mg L ⁻¹ ; (E) 250 mg L ⁻¹ e (F) 500 mg L ⁻¹ ..	43
Figura 13: Carvão Ativado (CA) da Banana pacovan em agitação e repouso em diferentes concentrações de AM: (A)125 mg/L ⁻¹ ; (B) 150 mg/L ⁻¹ ; e (C) 200 mg L ⁻¹	43
Figura 14: Isoterma de Langmuir e Freundlich da banana pacovan (A) Carvão ativado em agitação (B) carvão ativado em repouso.....	46
Figura 15: Cinética de Adsorção.	48
Figura 16: Cinética de Pseudoprimeira ordem e Pseudosegunda ordem para concentrações de (A)10 mg L ⁻¹ L, (B) 25 mg L ⁻¹ , (C) 50 mg L ⁻¹ , (D) 100 mg L ⁻¹ e (E) 250 mg L ⁻¹	50

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Massa da biomassa de casca de banana pacovan antes e após a desidratação	33
Tabela 2: Parâmetros dos modelos de Langmuir e Freundlich da banana pacovan.	46
Tabela 3: Parâmetros cinéticos obtidos com o modelo de pseudoprimeira ordem para o CAA.....	49
Tabela 4: Parâmetros cinéticos obtidos com o modelo de pseudosegunda ordem para o CAA.....	50

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AM	Azul de metileno
CA	Carvão ativado
CAA	Carvão ativado em agitação
CAR	Carvão ativado em repouso
DTG	Derivada termogravimétrica
RRB	Rosin, Rammler e Bennett
TG	Termogravimetria

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS.....	14
2.2 BANANA PACOVAN (<i>MUSA PARADISIACA</i> L).....	15
2.3 CARBONIZAÇÃO	16
2.4 CARVÃO ATIVADO.....	16
2.5 ISOTERMA DE ADSORÇÃO	18
2.6 CINÉTICA DE ADSORÇÃO.....	19
2.6.1 CINÉTICA DE PSEUDOPRIMEIRA	19
2.6.2 CINÉTICA DE PSEUDOSEGUNDA ORDEM.....	20
2.7 CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS	21
2.8 TEOR DE CINZAS	22
2.9 ANÁLISE TERMOANÁLITICA (TG).....	22
2.10 ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO UV-VIS.....	23
3. OBJETIVOS	24
3.1 OBJETIVO GERAL	24
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
4. METODOLOGIA.....	25
4.1 COLETA DA BIOMASSA	25
4.2 TRATAMENTO PRÉVIO DA BIOMASSA	26
4.3 DESIDRATAÇÃO DA BIOMASSA	26
4.4 TRITURAÇÃO DA BIOMASSA DESIDRATADA	27
4.5 CARBONIZAÇÃO DA BIOMASSA	27
4.6 GRANULOMETRIA.....	28
4.7 TEOR DE CINZAS	29

4.8	CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA, CARVÃO VEGETAL E CARVÃO ATIVADO	30
4.9	PROCESSO DE ATIVAÇÃO QUÍMICA DO CARVÃO ATIVADO.....	30
4.10	OBTENÇÃO DA ISOTERMA DE ADSORÇÃO	30
4.11	ESTUDO DA CINÉTICA DE ADSORÇÃO	31
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1	OBTENÇÃO DO CARVÃO ATIVADO	32
5.2	TEOR DE CINZAS	35
5.3	CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA, CARVÃO VEGETAL E CARVÃO ATIVADO.....	36
5.4	ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO UV/VISÍVEL.....	40
5.5	ISOTERMA DE ADSORÇÃO	46
5.6	CINÉTICA DE ADSORÇÃO.....	48
5.7	CINÉTICA DE PSEUDOPRIMEIRA ORDEM E PSEUDOSEGUNDA ORDEM.....	49
6.	CONCLUSÃO.....	52
	REFERÊNCIAS	53

1. INTRODUÇÃO

O acesso à água apta para o consumo humano pelas comunidades constitui uma das necessidades mais essenciais para a manutenção da vida, compactuando inclusive para a saúde pública. Além de compor a matéria em consideráveis proporções é um elemento necessário à dinâmica dos corpos dos seres vivos participando dos processos naturais existentes em todo o globo. Ademais, sabe-se que está presente em vários mecanismos como reações químicas e biológicas necessárias ao desenvolvimento da vida no planeta (Mendonça *et al.*, 2023).

Por ser uma substância importante para a vida, há uma grande preocupação relacionada à poluição dos grandes rios, lagos e lençóis freáticos causados pelos despejos de efluentes residenciais ou industriais, sejam eles sólido, líquidos ou gasosos. Isso porque podem impactar significativamente o meio ambiente, afetando a qualidade da água, ar, solo e alimentos, ameaçando o equilíbrio dos ecossistemas (Yamamura, 2009).

Particularmente a região amazônica é rica em recursos hídricos e devido à exploração de minérios há relatos de danos severos ao ambiente. Dentre os danos causados pode-se citar: os despejos de diversos tipos de metais pesados na água, destacando-se entre eles o mercúrio dos garimpos (Junior, 2013); e o arsênio a partir da exploração do manganês. No caso do mercúrio, por exemplo, é um poluente global, identificado como um elemento altamente tóxico, devido ao seu caráter cumulativo e persistente no ambiente e em organismos vivos (Rocha, 2025).

Além do exposto, destaca-se que muitas comunidades rurais e ribeirinhas ainda não dispõem de acesso a água previamente tratada para consumo. A presença de contaminantes físicos, químicos e biológicos representa um risco significativo à saúde pública. Microrganismos como *Escherichia coli*, coliformes totais e protozoários podem desencadear doenças como febre, diarreia, amebíase, cólera, hepatite A e leptospirose, entre outras. Esses agravos comprometem diretamente a qualidade de vida das populações afetadas e aumentam a demanda pelos serviços de saúde.

Vale ressaltar que o uso de água sem tratamento adequado também gera impactos ambientais e ameaça diversos seres vivos, incluindo o ser humano. Diante desse cenário, múltiplas pesquisas vêm sendo conduzidas com o objetivo de reduzir ou eliminar os efeitos nocivos associados ao consumo de água contaminada.

A fim de evitar agravantes relacionados ao consumo de água fora dos padrões de potabilidade e proporcionar uma melhor qualidade de vida, necessita-se que se tomem medidas preventivas e promova-se mecanismos para facilitar uma vida saudável para essas

comunidades, fornecendo água apta para o consumo humano. No Brasil, a água limpa, ou seja, a água apta para o consumo humano é outorgada pela portaria GM-MS Nº 888, de 04 de maio de 2021, a qual contém normas de controle e de vigilância (Silva *et al.*, 2021). Logo, é fundamental encontrar formas que venham adequar a água ao consumo obedecendo esta portaria.

Neste sentido, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de criar métodos de tratamento sustentáveis, eficientes e economicamente viáveis. Assim, espera-se que a água seja adequadamente tratada e que os contaminantes sejam eliminados. A remoção de poluentes, como os mencionados anteriormente ou outras substâncias indesejáveis presentes na água, pode ser realizada por meio de métodos de troca iônica, adsorção, processos eletroquímicos, neutralização/precipitação química, além de processos de oxidação ou redução (Silva, 2014).

Particularmente no caso da adsorção, considera-se como um método promissor para remover poluentes em águas residuais devido à sua eficiência econômica e flexibilidade. Vários materiais, como carvão ativado, resina, sílica, argila, nanotubos de carbono, óxido de grafeno e quitosana têm sido explorados para melhorar a capacidade de adsorção de poluentes (Alves *et al.*, 2022).

Portanto, é imprescindível investir em tecnologias sustentáveis e acessíveis, especialmente concebidas para enfrentar os desafios intrínsecos ao tratamento da água destinada ao consumo humano. Entre as citadas, o carvão ativado é um dos adsorventes mais utilizados, pois apresenta grande área superficial, estrutura porosa (essencialmente microporosa), alta capacidade de adsorção e composição química da superfície variável (Piffer; Santos; Souza, 2016). É importante destacar que materiais que possuem um alto teor de carbono, como madeira, hulha, lignina, casca de coco, grão de café, bambu pode ser convertidos em carvão ativado (Sousa, 2019). Neste sentido, sugere-se agregar valor à materiais que seriam jogados fora, como diversos tipos de biomassas vegetais, dentre os quais, pode-se citar a casca da banana.

De acordo com Santos *et al.* (2020), em uma empresa de alimentos, a cada tonelada de banana colhida são geradas aproximadamente 4 toneladas de resíduos lignocelulósicos, compostos por cascas, engaços, frutos rejeitados, entre outros. Esses resíduos da casca da banana são uma fonte significativa de açúcares como glicose, frutose e sacarose, além de conter lignina, pectina, celulose e hemicelulose (Mohapatra e Mishra, 2010).

A utilização dos resíduos poderia reduzir a poluição e agregar valor à cultura da banana que enfrenta desafios de equilíbrio entre consumo e produção no mercado nacional (Cavalcante, 2015). Reforça-se ainda que estudos neste sentido, além de agregar valor ao resíduo, cria

mecanismos de tratamento de baixo custo, fácil utilização e ecologicamente correto. Logo, o carvão ativado da casca da banana pode ser uma boa alternativa para remover contaminantes, sendo acessível para melhorar a qualidade da água a ser consumida por aqueles que não têm acesso a água tratada. Mediante ao exposto, este estudo visa investigar a viabilidade da casca de banana (*Musa paradisiaca* L.) na produção de carvão ativado para tratamento de água superficial.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

A expansão de atividades agroindustriais tem contribuído significativamente para o desenvolvimento econômico e para o abastecimento de matérias-primas e alimentos em escala global. Entretanto, esse setor também se configura como um dos principais geradores de resíduos orgânicos e inorgânicos (Arcanjo, 2022). Milhões de toneladas de subprodutos agroindustriais são geradas ao longo de sua cadeia produtiva, pelo processamento de frutas. Esses resíduos podem ocasionar muitos problemas ambientais (Sena, 2006).

Segundo Nascimento Filho e Franco (2015), as indústrias de polpas e sucos de frutas geram cerca de 40% de resíduos orgânicos, constituídos principalmente por cascas, bagaços e caroços. A composição desses subprodutos varia conforme o manejo adotado no cultivo da matéria-prima e as técnicas aplicadas no processamento. Nas últimas três décadas, tais resíduos têm despertado crescente atenção de ambientalistas, órgãos governamentais, legisladores e da sociedade em geral, devido aos impactos ambientais que podem ocasionar (Portugal *et al.*, 2015).

Oliveira (2021) ressalta que esses subprodutos são compostos por minerais, fibras e compostos antioxidantes, nutrientes importantes para diversas funções fisiológicas do organismo. Contudo, na maioria das vezes, não são aproveitados pelas empresas. Dessa forma, o uso adequado desses materiais pode reduzir o desperdício de alimentos e, ao mesmo tempo, representar uma alternativa como fonte suplementar de nutrientes. Além disso, resíduos agrícolas e agroindustriais têm ganhado destaque como matérias-primas valiosas para a produção de carvão ativado, devido ao seu baixo custo, ampla disponibilidade e elevado teor de carbono. A conversão desses resíduos em carvão ativado agrega valor a materiais que seriam descartados, promove sustentabilidade e oferece uma rota eficiente para obtenção de adsorventes aplicáveis ao tratamento de água.

2.2 BANANA PACOVAN (*MUSA PARADISIACA* L)

A banana pacovan (*Musa Paradisiaca* L), fruto comestível, é classificada como pertencentes à classe das Monocotiledôneas, ordem *Scitaminales*, família *Musaceae* e dentro do gênero *Musa*. Entre suas divisões, destacam-se as seções *Eumusa* e *Australimusa*. A espécie tem origem no continente asiático, de onde se expandiu e passou a ser cultivada em diferentes regiões do mundo (Manica, 1998)

Amplamente consumida em diversas partes do planeta, configura-se como uma das culturas agrícolas de maior relevância global. Em países de clima tropical, desempenha papel essencial na segurança alimentar (Motta, 2022). No contexto mundial, o Brasil ocupa a quarta posição entre os maiores produtores, com uma produção estimada em aproximadamente seis mil toneladas em 2021, movimentando, em 2022, um mercado superior a 11,9 bilhões de reais (IBGE, 2023).

De acordo com Da Silva *et al.* (2020), o Brasil apresenta uma grande diversidade de variedades de banana. Contudo, ao considerar fatores como aceitação pelos consumidores, produtividade, resistência a pragas e doenças, tolerância à seca, porte da planta e adaptação a baixas temperaturas, apenas algumas cultivares demonstram real potencial agrônômico para exploração em escala comercial. Entretanto, o elevado consumo da fruta resulta na geração de grandes quantidades de cascas, geralmente descartadas como resíduo orgânico.

A casca constitui o principal subproduto da banana, representando cerca de 30 a 40% do peso total da fruta. Esse resíduo é abundante e apresenta composição rica em celulose e minerais. O grande volume gerado acarreta não apenas desafios quanto ao descarte adequado, mas também um expressivo desperdício de recursos (Hikal *et al.*, 2022).

Pesquisas evidenciam o potencial da casca de banana como material alternativo para o tratamento de águas e efluentes, podendo ser empregada em diferentes formas, como *in natura*, desidratada e carbonizada, submetida à ativação para obtenção de carvão ativado ou ainda em associação com outros adsorventes (Martins *et al.*, 2015). Nesse contexto, sua aplicação como adsorvente configura-se como uma estratégia sustentável e de baixo custo, alinhada aos princípios de valorização de resíduos agroindustriais. Estudos demonstram que, tanto em sua forma natural quanto carbonizada, a casca apresenta elevada capacidade adsorptiva, destacando-se na remoção de íons metálicos potencialmente tóxicos, como cádmio, chumbo, cromo e ferro (Maia, 2024).

2.3 CARBONIZAÇÃO

De acordo com Lewis (1982), a carbonização corresponde a uma forma de pirólise conduzida sem a presença de oxigênio e em condições de elevada temperatura, onde ocorre a eliminação da maior parte dos compostos voláteis, originando um material sólido, poroso e com alto teor de carbono.

Esse processo desempenha papel essencial na transformação de materiais lignocelulósicos, como madeiras e resíduos agrícolas em carvão. Os componentes principais da biomassa, hemicelulose, celulose e lignina, apresentam diferentes respostas durante a pirólise, degradando-se em intervalos específicos de temperatura e liberando variados tipos de compostos voláteis (Shen; Gu; Bridgwater, 2010).

A hemicelulose, por possuir uma estrutura ramificada e menor estabilidade térmica, sofre decomposição na faixa de 200 °C a 315 °C, liberando dióxido de carbono, ácido acético e, em maior proporção, compostos oxigenados (Shen; Gu; Bridgwater, 2010; Yang *et al.*, 2007). A celulose apresenta maior estabilidade térmica devido à sua estrutura cristalina, degra-se entre 315 °C e 400 °C, com máxima liberação em torno de 355 °C, formando principalmente levoglucosana (Damásio *et al.*, 2015). Já a lignina, caracterizada por suas cadeias aromáticas complexas, sofre decomposição de forma mais lenta e gradual, ocorrendo entre 160 °C e 900 °C, liberando metano, hidrogênio e fenóis, o que contribui para um elevado teor de resíduo carbonáceo (Damásio *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2007).

A qualidade do carvão obtido depende das condições de carbonização, como a temperatura aplicada, a taxa de aquecimento e o tempo de permanência na etapa final do processo. Temperaturas mais elevadas favorecem um maior teor de carbono fixo, enquanto a ausência de oxigênio é essencial para evitar a combustão da biomassa (Mota, 2013). Nesse contexto, estudos recentes mostram que o biocarvão possui grande potencial como combustível, precursor de carvão ativado e alternativa sustentável para o aproveitamento de resíduos agrícolas e urbanos (Hanke *et al.*, 2022), o que reforça sua relevância para este estudo, que utiliza o biocarvão como matéria-prima para produção de carvão ativado.

2.4 CARVÃO ATIVADO

O carvão vegetal produzido pode passar por processos de ativação física ou química, visando aumentar sua área superficial e, conseqüentemente, sua capacidade de adsorção (Leite, 2025). Na ativação química, utilizam-se agentes como ácido fosfórico, hidróxido de potássio ou cloreto de zinco, que, sob elevadas temperaturas, promovem modificações oxidativas na

superfície do carvão, o que favorece o desenvolvimento de poros (Silva; Lucia *et al.*, 2008). Além disso, o aquecimento em conjunto com o agente ativador contribui para a remoção de impurezas e estimula a formação de uma rede porosa mais desenvolvida, o que resulta em um aumento expressivo da área superficial específica. Essa alteração intensifica a eficiência do carvão ativado na adsorção de moléculas indesejáveis em fases líquidas ou gasosas, tornando-o adequado para aplicações ambientais e industriais, como a remoção de poluentes.

Historicamente, o uso industrial do carvão ativado teve início em 1794, na Inglaterra, quando foi empregado como agente descolorante no processamento do açúcar. Atualmente, sua aplicação se estende a diversos setores industriais, atuando tanto na produção quanto no tratamento de resíduos (Santos, 2022). Segundo Pereira (2010), as principais aplicações do carvão ativado incluem o tratamento de água, a descoloração de soluções, a produção de filtros de proteção e sua utilização como catalisador.

No campo ambiental, especialmente no tratamento de efluentes, o emprego do carvão ativado como adsorvente tem ganhado destaque por ser uma técnica eficiente e economicamente viável. Essa abordagem apresenta vantagens frente a métodos convencionais, tais como a baixa geração de resíduos, elevada eficácia na remoção de contaminantes, simplicidade operacional, recuperação facilitada de metais e possibilidade de reaproveitamento do material adsorvente (Guillossou *et al.*, 2019). Além disso, sua capacidade de eliminar uma ampla gama de compostos de difícil degradação em águas poluídas tem impulsionado o interesse pelo uso de carvões ativados de menor custo.

A literatura reporta o uso de diferentes agentes químicos capazes de promover a ativação e a modificação estrutural do biocarvão, conforme demonstrado por Abel (2023) e Sampaio *et al.* (2024). No presente estudo, optou-se pelo cloreto de zinco, considerado um dos ativantes mais utilizados em processos de ativação química. Esse composto interage diretamente na matriz carbonácea e, quando submetido a temperaturas elevadas, contribui tanto para a expansão da área superficial quanto para o incremento da capacidade adsortiva do material (Heylmann *et al.*, 2021).

Para compreender melhor a capacidade adsortiva e a afinidade do adsorbente pelo adsorvato, é necessário analisar seu comportamento em diferentes concentrações, o que pode ser descrito por meio das isotermas de adsorção.

2.5 ISOTERMA DE ADSORÇÃO

Oliveira e colaboradores (2016) destacam que as isotermas de adsorção representam graficamente a relação entre a quantidade de adsorvato retida e sua concentração (ou pressão) na fase líquida ou gasosa, sendo essenciais para compreender e prever o comportamento do processo. Além de indicar a eficiência do adsorvente, as isotermas permitem estimar a capacidade máxima de remoção de contaminantes, contribuindo para a avaliação técnica e econômica do material (Farias, 2013; De Farias *et al.*, 2024).

A análise gráfica das isotermas revela informações fundamentais, como a afinidade entre adsorvente e adsorvato, o tipo de interação predominante e o modo como o equilíbrio é estabelecido, possibilitando comparar o desempenho de diferentes materiais e identificar qual modelo teórico melhor se ajusta aos dados experimentais (Oliveira *et al.*, 2016).

Assim, a seguir, são apresentados os modelos de isotermas utilizados para descrever o comportamento da adsorção, permitindo uma interpretação mais detalhada da eficiência e do mecanismo envolvido no processo.

2.5.1. ISOTERMAS DE LANGMUIR E FREUNDLICH

O modelo de Langmuir, desenvolvido em 1918, considera que a adsorção ocorre em sítios definidos e energeticamente equivalentes na superfície do adsorvente, resultando na formação de uma monocamada (Langmuir, 1918). Modelo representado pela equação 1.

$$q_e = \frac{q_{max} \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e} \quad (1)$$

Onde q_e (mg g^{-1}) a quantidade adsorvida no equilíbrio, q_{max} (mg g^{-1}) a capacidade máxima de adsorção, K_L a constante de Langmuir e C_e (mg L^{-1}) a concentração de equilíbrio. Este modelo é considerado uma isoterma altamente favorável, pois permite atingir a capacidade máxima de adsorção em baixas concentrações de adsorvato, sendo amplamente utilizada em estudos de equilíbrio de adsorção (McCabe; Smith; Harriott, 1993). O modelo de Freundlich, desenvolvido por Herbert Freundlich em 1906, aplica-se especialmente a sistemas caracterizados por superfícies heterogêneas e pela formação de multicamadas (Freundlich, 1906). Modelo representado pela equação 2.

$$q_e = K_f \cdot C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

Sendo K_f a constante de Freundlich que relaciona à capacidade de adsorção e $1/n$ é um parâmetro de intensidade de adsorção.

Após a avaliação das isotermas de adsorção e da capacidade do adsorbente em diferentes concentrações, torna-se necessário compreender a dinâmica do processo ao longo do tempo. Os modelos matemáticos de cinética de adsorção permitem descrever a velocidade com que o adsorvato é removido da solução e identificar os mecanismos predominantes, fornecendo uma visão complementar à análise isotérmica

2.6 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

A cinética de adsorção permite analisar a velocidade com que as moléculas do adsorvato se ligam à superfície do adsorvente, o que facilita a compreensão dos mecanismos que regem o processo. Por outro lado, a velocidade pode ser influenciada por características do adsorvato, como peso molecular e solubilidade; do adsorvente, como sua porosidade; e por fatores do meio, como pH, temperatura e concentração. Conforme descrito por Melo Junior (2021), o processo ocorre em etapas que envolvem a movimentação das moléculas até a superfície (difusão externa), deslocamento pelos poros do material (difusão interna) e, por fim, a fixação na superfície do adsorvente (adsorção) ou eventual liberação (dessorção).

Para identificar o mecanismo responsável pela adsorção de um adsorvato, analisam-se os dados cinéticos por meio de modelos que permitem determinar o tipo de reação química, bem como os processos de difusão e de transferência de massa envolvidos. Nesse estudo, serão empregados os modelos de pseudoprimeira ordem e pseudosegunda ordem para descrever o comportamento cinético do processo.

2.6.1 CINÉTICA DE PSEUDOPRIMEIRA

O modelo de pseudoprimeira ordem pressupõe que a velocidade de ocupação dos sítios ativos de adsorção é proporcional à quantidade de sítios ainda disponíveis (Silva, 2018). O modelo de pseudoprimeira ordem, expresso em termos da capacidade adsorptiva dos sólidos, é representado pela Equação 3.

$$\text{sde} \quad \frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (3)$$

Onde:

k_1 : constante da taxa de adsorção de pseudoprimeira ordem (min^{-1}); q_e e q_t são as quantidades adsorvidas por grama de adsorvente no equilíbrio e no tempo t , respectivamente (mg g^{-1}).

Com a integração da Equação (3); $q_t = 0, t = 0$; quando $q_t = q_e, t = t$, a partir disso se obtém a Equação (4):

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (4)$$

O valor de k_1 e q_e pode ser determinado graficamente em sistema linear onde $\ln(q_e - q_t)$ VS t (tempo). O modelo é definido pela utilização de um ponto ativo presente na superfície do adsorvente.

2.6.2 CINÉTICA DE PSEUDOSEGUNDA ORDEM

O modelo de pseudosegunda ordem baseia-se tanto na quantidade de adsorvato presente na superfície do adsorvente quanto na quantidade em equilíbrio. Nesse caso, a taxa de adsorção é diretamente proporcional ao quadrado do número de sítios ativos disponíveis na superfície. O modelo de adsorção de segunda ordem descreve interações químicas que envolvem a troca ou o compartilhamento de elétrons entre o adsorvato e o adsorvente. Essas interações ocorrem nos sítios ativos da superfície, levando, inicialmente, à formação de uma monocamada. Contudo, podem surgir camadas adicionais devido à ocorrência de fisissorção (Nascimento *et al.*, 2014).

A velocidade de uma reação química pode ser compreendida como a variação na concentração dos reagentes ou produtos ao longo do tempo. Tanto a ordem da reação quanto a constante cinética são obtidas por meio de experimentos, uma vez que a taxa de adsorção está relacionada à capacidade de adsorção em equilíbrio, e não diretamente à concentração do adsorvato. Assim, essa capacidade é influenciada pelo tempo de reação. Além disso, a quantidade adsorvida é proporcional ao número de sítios ativos disponíveis na superfície do adsorvente, resultando na forma expressa pela Equação 5.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (5)$$

Onde:

k_2 : é a constante da taxa de adsorção de pseudosegunda ordem ($\text{g/mg} \cdot \text{min}^{-1}$)

q_e : quantidade adsorvida do soluto por unidade de massa de adsorvente, em $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, no instante t .

q_t : quantidade adsorvida de soluto por unidade de massa de adsorvente, em $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$, no instante t .

k_2 : constante de pseudosegunda ordem ($\text{g}/\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$).

t : corresponde ao período (tempo) de interação entre o adsorvente e o adsorvato, medido em minutos.

Ao realizar a integração considerando as condições inicial e final, $t=0$; $q_t=0$; $t=t$; $q_e=q_t$, obtém-se a Equação 6:

$$q_t = \frac{k_2 \cdot q_e^2 \cdot t}{1 + q_e \cdot k_2 \cdot t} \quad (6)$$

Conforme Thitam e Shukla (2016), os parâmetros q_e e k_2 são determinados a partir do intercepto e da inclinação da reta obtida no gráfico de $(t \text{ vs } q_t)$ em função de t . Quando o modelo cinético de pseudosegunda ordem descreve adequadamente o processo, essa representação gráfica apresenta um comportamento linear com coeficiente de correlação próximo de 1.

Nesse tipo de adsorção, o adsorvato tende a interagir com múltiplos sítios ativos do adsorvente. A taxa inicial de adsorção (h_0 , expressa em $\text{g}/\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$) é determinada considerando o limite em que t tende a zero, conforme expresso na Equação 7.

$$h_0 = k_2 \cdot q_e^2 \quad (7)$$

2.7 CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

As condições em que o experimento é realizado influenciam no comportamento do processo de adsorção. Entre essas condições a agitação, por exemplo, ajuda a manter o contato constante entre o adsorvente e a substância que se deseja remover. Esse movimento facilita a difusão das moléculas para dentro dos poros do material, fazendo com que o equilíbrio de adsorção seja atingido mais rapidamente (Alberton, 2020).

Já nas condições de repouso, o sistema permanece estático, e o transporte das moléculas ocorre de forma mais lenta, apenas por difusão natural. Mesmo apresentando um processo mais lento, o ensaio em repouso é importante para analisar como o material se comporta em condições que se aproximam das reais, nas quais a agitação mecânica não está presente (Silva *et al.*, 2023).

Além das condições experimentais, a determinação do teor de cinzas do adsorvente é essencial para compreender sua composição e correlacionar suas características com o desempenho no processo de adsorção.

2.8 TEOR DE CINZAS

Conforme Azevedo *et al.* (2013), o teor de cinzas é um parâmetro empregado para determinar a quantidade de resíduos inorgânicos remanescentes após a combustão completa de uma amostra orgânica, realizada em temperaturas elevadas, geralmente entre 500 °C e 900 °C. Esses resíduos são formados, principalmente, por sais minerais e óxidos metálicos que não se volatilizam durante o processo de calcinação.

Durante a incineração, os compostos orgânicos voláteis são eliminados, restando substâncias inorgânicas como óxidos metálicos, carbonatos e silicatos, que compõem as cinzas (Vassilev *et al.*, 2010). Assim, o teor de cinzas reflete o conteúdo mineral do material, podendo indicar a presença de impurezas associadas à matéria-prima ou ao processo de ativação.

Em materiais utilizados como adsorventes, como o carvão ativado, é desejável que o teor de cinzas seja baixo. Valores elevados podem reduzir a área superficial e obstruir poros, comprometendo a eficiência de adsorção. Além disso, teores altos de cinzas podem alterar o pH da solução durante o processo adsorptivo, prejudicando a interação entre o adsorvente e o composto a ser removido (De Costa, 2015).

A determinação do teor de cinzas fornece informações sobre a composição do adsorvente, constituindo uma etapa preliminar fundamental que antecede a análise termogravimétrica, a qual permitirá avaliar detalhadamente sua estabilidade térmica, aspecto essencial para correlacionar as características do material com seu desempenho no processo de adsorção.

2.9 ANÁLISE TERMOANÁLITICA (TG)

A termogravimetria (TG) é uma técnica que avalia a variação de massa de um material em função da temperatura, permitindo identificar as etapas como desidratação, decomposição térmica e teor de cinzas (Silva *et al.*, 2001).

Em biomassas lignocelulósicas, a TG evidencia as faixas de degradação das hemiceluloses, celulose e lignina, auxiliando na compreensão do comportamento térmico e na definição das condições ideais para pirólise e ativação (Utsumi *et al.*, 2010). A análise derivada (DTG) complementa a TG ao indicar as temperaturas de máxima taxa de degradação,

facilitando a interpretação de eventos sobrepostos (Ferreira, 2022). Portanto, a TG constitui ferramenta essencial na caracterização e avaliação da estabilidade térmica de adsorventes carbonáceos.

Complementando a caracterização do adsorvente, a espectroscopia de absorção UV-Vis permite investigar suas propriedades ópticas e a interação com o adsorbato em solução. Essa análise fornece informações importantes sobre a presença de grupos funcionais e a capacidade de absorção de radiação, contribuindo para compreender de forma mais completa o desempenho do material no processo de adsorção.

2.10 ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO UV-VIS

A espectroscopia de absorção é uma técnica analítica baseada na interação da radiação eletromagnética com a matéria, permitindo medir a quantidade de luz absorvida por uma substância em função do comprimento de onda (Fernandes *et al.*, 2025). Na faixa do ultravioleta e do visível (UV-Vis), a absorção ocorre devido a transições eletrônicas em moléculas ou íons presentes em solução, que promovem elétrons de orbitais ocupados para orbitais desocupados de maior energia (Costa, 2019). Essa característica permite não apenas a detecção e quantificação de compostos específicos, mas também fornece informações sobre suas propriedades estruturais e eletrônicas, tornando-se uma técnica fundamental em estudos químicos, bioquímicos e ambientais.

Nos estudos de adsorção de corantes em carvão ativado, a espectroscopia UV-Vis é amplamente utilizada para monitorar a remoção do corante da solução, como o azul de metileno (Soares, 2023). A análise das variações na intensidade de absorção em comprimentos de onda específicos permite determinar a concentração residual do corante em diferentes tempos de contato, possibilitando a construção de curvas cinéticas. Desse modo, obtêm-se informações quantitativas sobre a eficiência do processo, incluindo a capacidade máxima de adsorção e a velocidade de remoção do adsorbato (Silva *et al.*, 2024).

Cumprido destacar que, a técnica permite inferir a natureza das interações entre o adsorbato e a superfície do carvão ativado. Mudanças na posição ou na intensidade dos picos de absorção podem indicar a presença de grupos funcionais ativos, alterações estruturais no adsorvente ou a formação de complexos entre o corante e o material (De Souza *et al.*, 2024). Assim, a espectroscopia UV-Vis não apenas quantifica a eficiência de remoção de poluentes, mas também contribui para a compreensão dos mecanismos envolvidos no processo de

adsorção, sendo uma ferramenta essencial para a caracterização e otimização de adsorventes aplicados à remoção de corantes e outros contaminantes em soluções aquosas.

Além disso, por meio da espectroscopia de absorção em comprimentos de onda específicos, é possível determinar a concentração residual do corante ao longo do tempo, construindo curvas cinéticas que revelam a eficiência e a velocidade do processo de adsorção. Portanto, além de fornecer dados quantitativos, a técnica permite inferir características qualitativas da interação adsorbato-adsorvente (Santos *et al.*, 2022).

Dessa forma, a espectroscopia UV-Vis integra-se às análises de composição (teor de cinzas) e estabilidade térmica (Análise Termogravimétrica), oferecendo uma visão completa do comportamento do adsorvente e permitindo correlacionar suas propriedades físico-químicas com o desempenho na remoção de poluentes em soluções aquosas.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial da casca da banana pacovan (*Musa paradisiaca* L.) como material precursor de carvão ativado para tratamento de água superficial.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparar o carvão ativado com a casca da banana pacovan (casca madura);
- Determinar a granulometria do carvão ativado obtido;
- Avaliar a capacidade máxima de adsorção da biomassa *in natura* carbonizada e do carvão ativado usando o corante azul de metileno como adsorbato;
- Determinar o teor de cinzas;
- Estudar a cinética de Adsorção do Carvão ativado utilizando como adsorbato o corante azul de metileno;
- Analisar a estabilidade térmica da biomassa, carvão vegetal e carvão ativado.

4. METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Química 213 do Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia, da Universidade Federal do Amazonas. As etapas de obtenção do carvão ativado são mostradas na Figura 1.



Figura 1: Fluxograma das etapas metodológicas deste estudo

Fonte: Autor (2025)

Cada uma das etapas empregadas na obtenção do carvão ativado é descrita a seguir, de forma sequencial e sistemática, a fim de esclarecer os procedimentos adotados e as condições experimentais envolvidas na produção do material.

4.1 COLETA DA BIOMASSA

As cascas da banana pacovan (*Musa paradisiaca* L), foram coletadas no município de Itacoatiara-AM em 08 de agosto 2024. A Figura 2 mostra a imagem do material coletado, totalizando 1,58 Kg de cascas.



Figura 2: Casca da banana pacovan

Fonte: Autor (2024)

4.2 TRATAMENTO PRÉVIO DA BIOMASSA

Inicialmente, as cascas foram lavadas em água corrente para a remoção de sujidades, como terra, poeira e resíduos de origem animal. A Figura 3 apresenta as cascas devidamente higienizadas e prontas para o processo de desidratação.



Figura 3: Cascas limpas

Fonte: Autor (2024)

4.3 DESIDRATAÇÃO DA BIOMASSA

A desidratação foi realizada em estufa SPlabor, modelo SP-40014, por um período de 26 horas a 110 °C, obtendo-se a biomassa devidamente seca. Concluída essa etapa, o material foi fragmentado em pequenos pedaços para facilitar a trituração (Figura 4).



Figura 4: Biomassa desidratada

Fonte: Autor (2024)

4.4 TRITURAÇÃO DA BIOMASSA DESIDRATADA

As cascas da banana pacovan desidratadas foram submetidas à trituração em liquidificador, obtendo-se a biomassa processada empregada nas etapas subsequentes da avaliação adsortiva (Figura 5).



Figura 5: (A) Liquidificador; (B) biomassa obtida

Fonte: Autor (2024)

4.5 CARBONIZAÇÃO DA BIOMASSA

O processo de carbonização foi realizado em triplicata, utilizando uma mufla SPlabor, modelo SP1200 (Figura 5). Para cada repetição, foram adicionados 60,00 g de biomassa em cadinhos de porcelana (Figura 5B) e submetidos ao aquecimento a 500 °C por aproximadamente 1 hora. O equipamento foi desligado quando se verificou a ausência de fumaça, condição indicativa da formação do carvão vegetal, conforme descrito por Fortaleza *et al.* (2019).

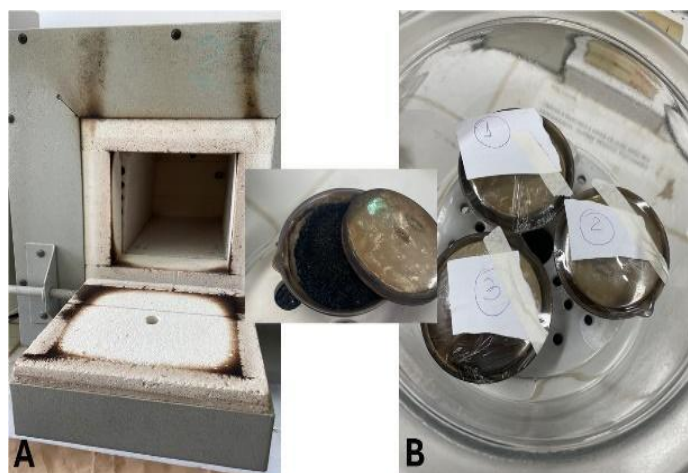


Figura 6: (A) Mufla; (B) Carvão vegetal da casca da banana pacovan.

Fonte: Autor (2024)

4.6 GRANULOMETRIA

Após a carbonização, o peneiramento foi realizado por 15 minutos utilizando um agitador de peneiras modelo AG SS, com telas de 5, 9, 32, 45 e 60 mesh (Figura 7). Esse procedimento assegura uma distribuição granulométrica uniforme das partículas de carvão vegetal, promovendo a homogeneidade das amostras para análises posteriores e possibilitando a avaliação detalhada das áreas superficiais e do rendimento em cada fração granulométrica.



Figura 7: Granulometria com telas de 5, 9, 32, 45 e 60 mesh

Fonte: Autor (2024)

4.7 TEOR DE CINZAS

O carvão vegetal obtido do processo anterior foi adicionado, em triplicata, em cadinhos de porcelana (Figura 8) e colocados na mufla a 700 °C por um período de 12 horas, até que as massas ficassem constantes, restando apenas cinzas.

O carvão vegetal obtido na etapa anterior foi transferido, em triplicata, para cadinhos de porcelana (Figura 8) e submetido à mufla a 700 °C por 3 horas (Figura 8). Após o aquecimento, o material foi resfriado em dessecador e posteriormente pesado em balança analítica. Esse procedimento foi repetido até a obtenção de massa constante.



Figura 8: Cadinhos de Porcelana na mufla

Fonte: Autor (2024)

Após o processo de calcinação, os cadinhos foram resfriados em dessecador e o material resultante foi pesado para então calcular o teor de cinzas de cada amostra, conforme a Equação 7.

$$Z = \frac{(M_2 - M_1) \times 100}{M} \quad (7)$$

Onde:

M_1 massa do cadinho (g);

M_2 massa do cadinho mais a massa das cinzas (g);

M é a massa da amostra

Z percentual de cinza (%).

4.8 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA, CARVÃO VEGETAL E CARVÃO ATIVADO

As amostras de biomassa, carvão vegetal e carvão ativado foram submetidas à análise termogravimétrica em balança Shimadzu, modelo DTG-60. Para essa etapa, utilizou-se cadinho de alfa-alumina contendo aproximadamente 7,0 mg de amostra, com aquecimento de 25 °C a 500 °C, sob atmosfera dinâmica de nitrogênio, fluxo de 50 mL/min e razão de aquecimento de 5 °C/min.

As curvas DSC foram obtidas em equipamento de fluxo de calor da marca Shimadzu, modelo DTG-60, empregando cadinhos de alumínio com cerca de 3,0 mg de amostra. As análises foram conduzidas em ciclos únicos de aquecimento entre 30 °C e 300 °C, sob atmosfera dinâmica de nitrogênio, fluxo de 80 mL/min e razão de aquecimento de 5 °C/min. As análises de TG e DSC foram realizadas em parceria com a Universidade Federal do Rio de Janeiro.

4.9 PROCESSO DE ATIVAÇÃO QUÍMICA DO CARVÃO ATIVADO

O carvão obtido foi impregnado com $ZnCl_2$ puro na proporção de 1:1 (m/m). Estes foram misturados durante 30 minutos e secos a 100 °C por 24 horas e, posteriormente, ativados à 500°C por 3 horas (Bugiereck *et al.*, 2013). Após resfriamento, o carvão ativado obtido foi lavado com ácido clorídrico e depois sucessivas vezes com água destilada para a retirada dos resíduos do agente ativante e desobstrução dos poros formados (Encarnação, 2019).

4.10 OBTENÇÃO DA ISOTERMA DE ADSORÇÃO

Para determinar a capacidade máxima de adsorção do azul de metileno (AM) pelo carvão ativado, os ensaios foram conduzidos em batelada. As soluções de AM foram preparadas nas concentrações de 10, 25, 50, 100, 250 e 500 mg/L⁻¹. Em cada ensaio, 10,0 mg do adsorvente (biomassa desidratada, carvão vegetal ou carvão ativado) foram adicionados a 10,0 mL da solução nas diferentes concentrações, estabelecendo uma relação massa/volume de 1,0 g·L⁻¹. As amostras permaneceram em contato por 24 horas, à temperatura ambiente, sob duas condições experimentais: agitação, utilizando Agitador Magnético Múltiplo SPLABOR, modelo SP-10015/S (Figura 9A), e repouso. Após o tempo de contato, em ambas as condições, as suspensões foram filtradas e a concentração residual de AM foi determinada em espectrofotômetro UV/VIS de varredura (BEL, modelo UV M51), no comprimento de onda de 665 nm (Figura 9B).



Figura 9: A) Agitador Magnético Múltiplo B) Espectrofotômetro

Fonte: Autor (2025)

A quantidade adsorvida em equilíbrio (q_e em $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) foi calculada usando-se a Equação (8):

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (8)$$

em que C_0 é a concentração inicial da solução ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), C_e é a concentração de equilíbrio ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), V é o volume da solução (mL) e m a massa do adsorvente (mg). No presente estudo, $V=10\text{mL}$ e $m=10\text{mg}$.

Os valores de q_e em função de C_e foram ajustados aos modelos de Freundlich (Equação 9) e Langmuir (Equação 10), utilizando o software Origin®.

$$q_e = K_f \cdot C_e^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

onde K_f ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot(\text{L}\cdot\text{mg}^{-1})$), $1/n$ é a constante relacionada à capacidade de adsorção e n expressa a intensidade do processo ($0 < 1/n < 1$ indica adsorção favorável).

$$q_e = \frac{q_{\max}K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (10)$$

onde q_{\max} ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) representa a capacidade máxima de adsorção em monocamada e K_L ($\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$) é a constante de Langmuir, relacionada à afinidade do adsorvente pelo adsorbato.

A qualidade dos ajustes foi comparada por meio dos coeficientes de determinação ajustados (R^2).

4.11 ESTUDO DA CINÉTICA DE ADSORÇÃO

O estudo foi realizado para determinar o tempo necessário para se atingir o equilíbrio de adsorção. Assim, para os ensaios da cinética utilizou-se 10 mg de carvão ativado em contato

com 10 mL de soluções de AM em diferentes concentrações (10, 25, 50, 100, 250 e 500 mg/L⁻¹) à temperatura ambiente, sob condições de agitação. A concentração restante do AM foi analisada em um espectrofotômetro de varredura UV/VISÍVEL (Marca BEL, Modelo UV M51) no comprimento de onda de 665 nm em diferentes tempos de contato (0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 6,0; 12 e 24h) (Encarnação, 2019). Para descrever a cinética de adsorção, foram utilizados modelos matemáticos que ajudam a prever o comportamento do sistema e a entender os mecanismos envolvidos.

Os modelos mais utilizados são o de pseudoprimeira ordem e o de pseudosegunda ordem. O primeiro considera que a taxa de adsorção é diretamente proporcional à quantidade de adsorvato ainda não adsorvida, sendo frequentemente aplicado para descrever o estágio inicial do processo, quando a concentração do adsorvato é elevada. O modelo de pseudosegunda ordem, por sua vez, pressupõe que a taxa de adsorção depende tanto da quantidade de adsorvato quanto do número de sítios disponíveis na superfície do adsorvente. Esse modelo tende a apresentar melhor ajuste ao processo ao longo do tempo, abrangendo desde o início até o alcance do equilíbrio.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 OBTENÇÃO DO CARVÃO ATIVADO

A variação de massa da biomassa ao longo das etapas de limpeza e desidratação constitui um aspecto fundamental na produção do carvão vegetal. A quantidade inicial de cascas de banana pacovan foi de aproximadamente 1,58 kg (Tabela 1), e, durante o processamento, observou-se uma redução acentuada, resultando em 224,61 g após a desidratação, o que corresponde a uma diminuição de 85% em relação à massa inicial. Essa perda substancial é atribuída ao elevado teor de água e à presença de compostos voláteis nas cascas, cuja eliminação, segundo Ramos *et al.* (2019), envolve a liberação de substâncias como monóxido de carbono, hidrogênio e outros componentes durante o aquecimento. Essa etapa é essencial para que a biomassa adquira condições adequadas à carbonização, assegurando maior eficiência nas fases subsequentes.

Tabela 1: Massa da biomassa de casca de banana pacovan antes e após a desidratação

Biomassa	Tipo	Massa (g)
Casca de banana pacovan	In natura	1.580,750 g
	Desidratada	224,614 g

Fonte: Autor (2024).

O material desidratado foi submetido à carbonização, resultando em 77,77 g de carvão vegetal e rendimento de 4,92%. Segundo Alonso *et al.* (2013), esse baixo rendimento está relacionado às características das cascas de banana, cuja composição inclui celulose e hemicelulose, componentes que apresentam elevada suscetibilidade à degradação térmica durante a carbonização, o que reforça a eficiência do processo de carbonização (Santana Junior, 2018).

A Tabela 2 apresenta os valores de massa e rendimento do carvão vegetal obtidos a partir da separação granulométrica da biomassa carbonizada. Observa-se que os diferentes tamanhos de malha influenciaram diretamente a quantidade de material retido em cada fração, evidenciando a heterogeneidade natural do carvão produzido. As malhas 9 e 60 foram as que apresentaram os maiores rendimentos, com 33,53% e 30,73%, respectivamente, indicando que uma parte significativa do carvão obtido apresenta granulometria intermediária e fina. Já as malhas 5, 32 e 45 apresentaram menores contribuições, sugerindo menor proporção de partículas muito grossas ou de granulometria intermediária mais específica.

Tabela 2: Variação do rendimento do carvão vegetal produzido em diferentes granulometrias

Material	Mesh	Massa do carvão (g)	Rendimento %
Carvão Vegetal	5	8,298	10,67
	9	26,073	33,53
	32	8,667	11,14
	45	10,830	13,92
	60	23,902	30,73
Rendimento Total	—	77,77	99,99
Ajuste modelo RRB			
R ² = 0,82			

Fonte: Autor (2024)

A predominância de partículas associadas às malhas 9 e 60 é relevante, pois o tamanho das partículas tem impacto direto na área superficial disponível para adsorção. Partículas mais finas, como as associadas à malha 60, possuem maior área específica, favorecendo a difusão de moléculas adsorvidas e ampliando a eficiência adsortiva do material. Esse comportamento está em consonância com Reis (2013), ao afirmar que a redução do tamanho das partículas intensifica a reatividade devido à melhor distribuição do calor nas microestruturas porosas do material.

Além disso, a estrutura porosa formada durante a carbonização, desempenha papel fundamental no comportamento adsortivo do carvão vegetal. Conforme destacado por Souza *et al.* (2019), essas estruturas favorecem a remoção de contaminantes, como metais pesados e corantes, reforçando a viabilidade do material obtido neste estudo. Dessa forma, a análise dos rendimentos granulométricos permite compreender não apenas as alterações físicas decorrentes da carbonização, mas também as potencialidades do carvão para aplicações ambientais baseadas em adsorção.

Nesse contexto, os rendimentos obtidos para as diferentes granulometrias foram também ajustados ao modelo Rosin, Rammler e Bennett (RRB), com o objetivo de avaliar a adequação desse modelo à distribuição do carvão vegetal analisado. O ajuste apresentou um coeficiente de determinação de $R^2=0,82$, indicando que o modelo descreve de maneira satisfatória a variação do material nas diferentes faixas de Mesh. Esse resultado mostra que o carvão produzido segue um comportamento estatístico típico de materiais particulados, em que a probabilidade de ocorrência de partículas menores aumenta progressivamente.

A coerência entre a predominância de partículas finas observada experimentalmente e o bom ajuste ao modelo RRB reforça que o carvão produzido apresenta distribuição granulométrica adequada para processos adsortivos. Assim, o modelo RRB foi considerado apropriado para representar os dados experimentais e complementar a caracterização da amostra, fortalecendo as evidências do potencial adsortivo do material.

O processo de ativação química é fundamental para aprimorar a eficiência adsortiva do carvão, podendo ser realizado com diferentes agentes ativantes. Embora o ácido fosfórico seja frequentemente indicado como uma alternativa mais ecológica, diversos estudos apontam o cloreto de zinco como o reagente de melhor desempenho em muitos materiais carbonáceos. Além disso, o $ZnCl_2$ contribui de forma significativa para o aumento do volume de poros, efeito que depende diretamente da proporção empregada no processo (Susanti *et al.*, 2022).

No presente estudo, optou-se pela utilização do $ZnCl_2$, submetendo-se 8,02 g de carvão vegetal à ativação na proporção 1:1, o que resultou em 5,93 g de carvão ativado e rendimento

de 75,05%. Neste contexto, o rendimento refere-se à razão entre a massa final de carvão ativado e a massa inicial de carvão vegetal submetida ao processo, expressa em porcentagem. Resultados próximos foram reportados por Subramanian *et al.* (2007), com rendimentos de 75% para carvão obtido de casca de banana nanica e de 60% a 75% para casca de laranja, reforçando a eficiência do método adotado. Conforme destaca Claudino (2003), rendimentos elevados refletem processos produtivos eficientes, capazes de reduzir desperdícios e agregar valor à resíduos agroindustriais.

Além disso, a literatura evidencia que a ativação química apresenta vantagens em relação à ativação física, especialmente por proporcionar maior rendimento de massa e favorecer o desenvolvimento de uma porosidade mais pronunciada. Como consequência, ocorre um aumento da área superficial e da capacidade adsorptiva do carvão ativado, ampliando sua eficiência na remoção de poluentes em água (Lozano-Castelló *et al.*, 2007; Piza, 2008).

Por fim, estudos recentes, como os de Souza *et al.* (2023) e Heylmann *et al.* (2021), demonstram que o cloreto de zinco é eficiente na produção de carvão ativado com estrutura porosa apropriada para a adsorção de corantes têxteis, incluindo Preto Reativo 5 e Azul de Metileno. Dessa maneira, a alta eficiência de remoção observada nesses trabalhos evidencia o potencial do carvão ativado produzido para o tratamento de efluentes têxteis, corroborando os resultados obtidos nesta pesquisa.

5.2 TEOR DE CINZAS

O teor de cinzas obtido neste estudo foi de 1,5% na fração 60 *mesh* (0,25 mm), valor que reflete a eficiência do processo de carbonização e confirma sua qualidade, conforme destacado por Lopes (2013), que associa baixos teores de cinzas à redução de materiais inorgânicos não combustíveis. Esse resultado está em conformidade com valores descritos na literatura, que variam entre 0,2% e 9,5% (Webley; Sun, 2010), além de atender ao critério proposto por Loureiro (2021), que considera teores inferiores a 15% adequados para assegurar a qualidade do carvão ativado.

As cinzas, compostas essencialmente por minerais não carbonáceos, podem comprometer o desempenho do carvão ativado, interferindo nas interações entre a superfície do material e as moléculas adsorvidas, o que reduz a eficiência do processo de adsorção (Rivera-Utrilla *et al.*, 2005). Nesse sentido, a obtenção de baixo teor de cinzas, como observado neste estudo, representa uma vantagem, sobretudo na fração de 60 *mesh*. Essa granulometria foi adotada como referência por apresentar partículas mais finas, com maior área superficial

específica e menor teor de cinzas, características que favorecem o potencial adsorptivo do carvão ativado e aumentam sua sensibilidade aos efeitos adversos de resíduos minerais.

Sob essa perspectiva, De Costa (2015) ressalta que, embora o teor de cinzas seja um parâmetro importante para a avaliação da qualidade do carvão ativado, ele não deve ser analisado de forma isolada, uma vez que impacta diretamente o desempenho e a sustentabilidade do material. Assim, o valor de 1,5% encontrado neste trabalho, além de estar de acordo com os padrões relatados na literatura, evidencia a viabilidade do carvão ativado obtido a partir da casca de banana pacovan e reforça a eficiência do processo empregado para sua produção.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA, CARVÃO VEGETAL E CARVÃO ATIVADO

A avaliação do comportamento térmico dos materiais é essencial para compreender as etapas de decomposição, estabilidade e transformações estruturais decorrentes dos processos de preparação do adsorvente. Nesse contexto, as análises termogravimétricas permitem identificar perdas de massa associadas à eliminação de água, compostos voláteis e degradação dos constituintes orgânicos, fornecendo informações fundamentais sobre a qualidade do carvão produzido.

A Figura 10 apresenta as curvas TG/DTG obtidas para as três formas do material derivado da casca de banana pacovan, (A) biomassa desidratada, (B) carvão vegetal e (C) carvão ativado, permitindo compreender como a biomassa se comporta termicamente ao longo das etapas de secagem, pirólise e ativação. Essas curvas evidenciam as etapas de degradação térmica, perda de massa e estabilidade do material, fornecendo subsídios para avaliar sua transformação em carvão vegetal e carvão ativado.

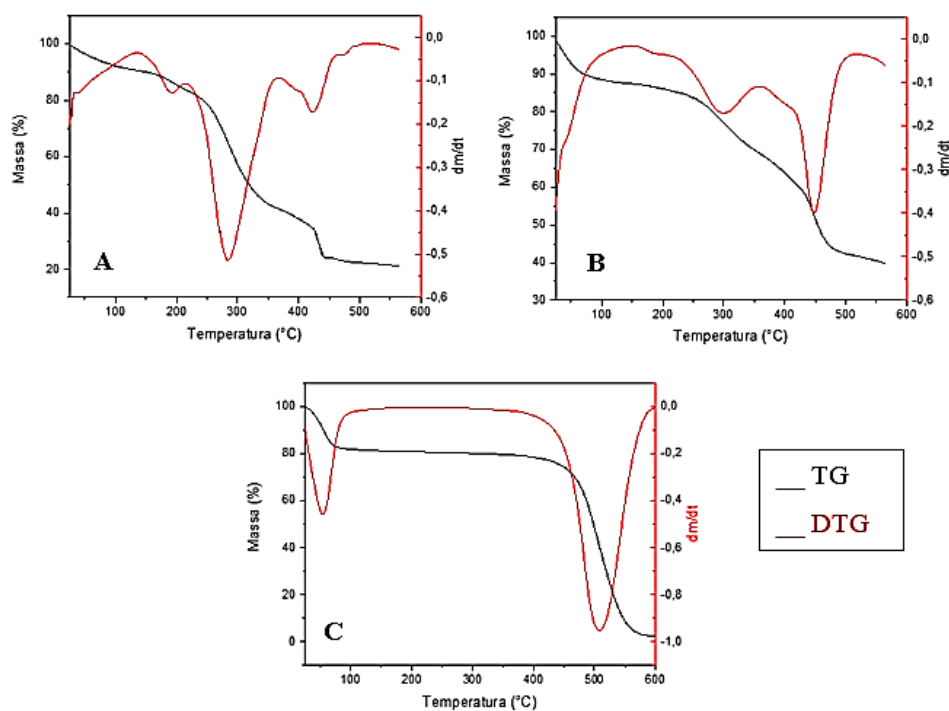


Figura 10: Curvas das análises termogravimétricas da casca de banana pacovan. (A) TG/DTG-Biomassa; (B) TG/DTG-Carvão Vegetal; (C) TG/DTG-Carvão ativado

Fonte: Autor (2025)

O perfil TG/DTG da biomassa desidratada (Figura 10A) apresenta comportamento característico de materiais lignocelulósicos, evidenciando três etapas principais de degradação térmica. A primeira ocorre em temperaturas inferiores a 150 °C e corresponde essencialmente à eliminação da umidade adsorvida e de pequenas frações de compostos voláteis de baixa estabilidade térmica. Essa etapa inicial é típica de biomassas naturais e reflete a elevada capacidade higroscópica do material.

A segunda etapa, marcada por um pico intenso na curva DTG em torno de 250–300 °C, representa o processo de decomposição das frações hemicelulósicas e celulósicas, constituintes fundamentais da biomassa. Segundo Bediako *et al.* (2019), esse intervalo térmico é característico da degradação rápida desses polímeros, que possuem estruturas mais simples e termicamente menos resistentes. A hemicelulose, por ser amorfa e apresentar menor estabilidade térmica, sofre decomposição inicial; em seguida, ocorre a ruptura das ligações glicosídicas da celulose, acarretando uma perda de massa mais acentuada.

A terceira etapa, observada entre cerca de 330 e 400 °C, corresponde à decomposição da lignina, componente mais complexo e com maior diversidade estrutural na biomassa. A lignina apresenta ampla faixa de degradação devido à presença de diferentes tipos de ligações

C–C e C–O, que se rompem de forma gradual conforme a temperatura aumenta. Esse comportamento é coerente com o descrito por Orozco *et al.* (2014), que destacam a degradação lenta e progressiva da lignina em comparação à hemicelulose e à celulose.

No conjunto, as três etapas refletem a natureza heterogênea da biomassa e sua elevada proporção de compostos voláteis, resultando em significativa perda de massa ao longo do aquecimento. Esse padrão evidencia não apenas a composição lignocelulósica típica da casca de banana, mas também sua suscetibilidade à decomposição térmica, característica essencial para sua conversão posterior em carvão vegetal e carvão ativado.

Em relação ao carvão vegetal (Figura 10B), observa-se um comportamento térmico mais estável quando comparado à biomassa original, consequência direta da remoção prévia de compostos voláteis e da degradação das frações hemicelulósicas e celulósicas durante a carbonização. A perda de massa inicial é bastante reduzida, concentrando-se majoritariamente abaixo de 300 °C, faixa associada à liberação de água residual retida em microestruturas carbonizadas, conforme descrito por Rowell *et al.* (2025).

A etapa mais significativa de degradação ocorre entre aproximadamente 300 e 450 °C, intervalo em que se observa um pico principal na curva DTG. Esse evento está relacionado à decomposição térmica da celulose residual e de parte da lignina ainda presente no material, que não foi completamente degradada durante a carbonização. De acordo com Yang *et al.* (2007), a lignina apresenta ampla faixa de decomposição térmica devido à sua estrutura altamente aromática e mais recalcitrante, o que explica a continuidade da perda de massa em temperaturas mais elevadas.

Uma terceira etapa, que se estende de cerca de 450 a 600 °C, corresponde à degradação de frações lignínicas mais condensadas e termicamente resistentes. Esse comportamento confirma que o processo de decomposição térmica elimina grande parte dos constituintes voláteis, mas não promove a completa degradação dos componentes aromáticos de maior estabilidade.

Como resultado, as curvas TG/DTG revelam um material com perda de massa total substancialmente menor e picos de degradação menos intensos que os observados na biomassa. A predominância de eventos térmicos em faixas mais elevadas de temperatura reforça o aumento da estabilidade térmica do carvão vegetal e indica a formação de uma matriz carbonácea mais densa e condensada após o processo de carbonização.

No carvão ativado (Figura 10C), o perfil TG revela o material com a maior estabilidade térmica dentre as três etapas do processo. A primeira perda de massa, observada até cerca de 90 °C, corresponde à eliminação da umidade residual ainda retida nos poros, comportamento

semelhante ao descrito por Rovani (2015). Em seguida, ocorre uma faixa ampla de degradação entre aproximadamente 90 e 500 °C, atribuída à decomposição de grupos oxigenados introduzidos ou expostos durante o processo de ativação química, bem como à liberação de resíduos orgânicos que não foram completamente convertidos durante a carbonização. Essa etapa é menos intensa que as observadas na biomassa, refletindo o elevado grau de carbonização e a menor quantidade de compostos voláteis. Por fim, a região entre 500 e 600 °C indica a ruptura de estruturas carbonáceas mais consolidadas, característica de materiais altamente organizados e ricos em carbono fixo, conforme apontado por Gomes (2021). A menor perda global de massa reforça o caráter altamente estável e a estrutura mais ordenada típica do carvão ativado.

A análise comparativa entre os três perfis térmicos evidencia claramente a evolução estrutural do material ao longo das etapas biomassa → carvão vegetal → carvão ativado. Na biomassa (A), observa-se o maior número de eventos térmicos, resultantes da presença de hemiceluloses, celuloses e lignina em diferentes estágios de degradação, o que leva à elevada perda de massa total. No carvão vegetal (B), após a pirólise, grande parte dos constituintes termolábeis já foi removida, restando estruturas carbonosas mais resistentes; assim, a perda de massa é menor e os eventos térmicos tornam-se menos intensos e deslocados para temperaturas mais altas, indicando maior estabilidade. Finalmente, no carvão ativado (C), a ativação química intensifica a organização estrutural do material, reduz ainda mais o teor de espécies voláteis e promove o desenvolvimento de uma matriz carbonácea altamente estável, resultando na curva TG com menor variação de massa e degradação concentrada em temperaturas superiores.

Essa comparação final demonstra que cada etapa do processo desidratação, carbonização e ativação contribuiu progressivamente para a formação de um material termicamente mais estável, poroso e adequado para aplicações adsorptivas, refletindo a eficiência do método empregado na transformação da casca de banana pacovan em carvão ativado.

5.4 ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO UV/VISÍVEL

Durante os ensaios de adsorção com o corante azul de metileno, observou-se que todos os materiais obtidos a partir da banana pacovan, biomassa desidratada (11A), carvão vegetal (11B) e carvão ativado (11C) provocaram alterações perceptíveis na coloração das soluções após o contato com a amostra (Figura 11). As diferenças observadas entre as amostras agitadas e em repouso evidenciam a influência das condições experimentais sobre a eficiência do processo adsortivo.

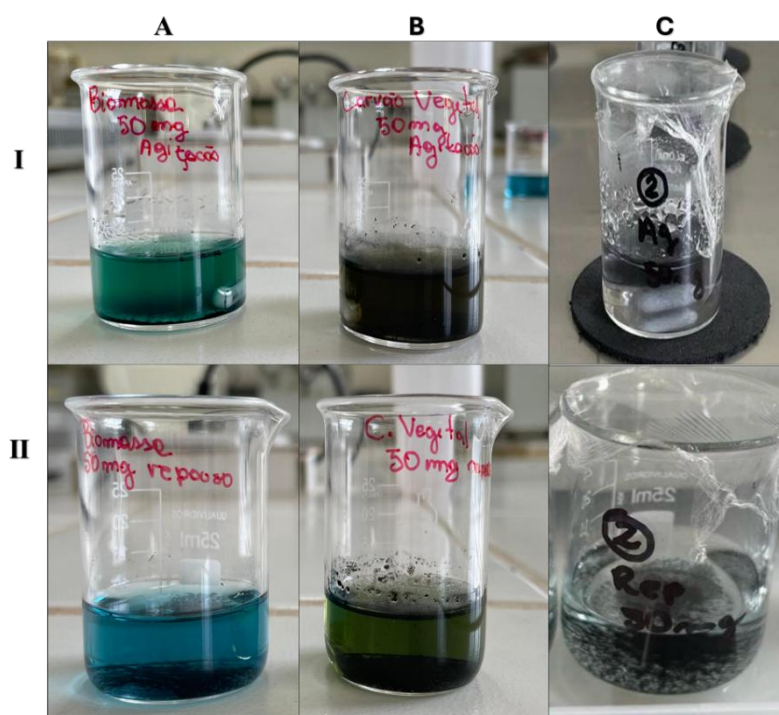


Figura 11: I) Agitação e II) Repouso; A) Biomassa 50 mg/L⁻¹; B) Carvão Vegetal 50mg/L⁻¹ e C) Carvão Ativado 50 mg/L⁻¹.

Fonte: Autor (2025).

Nas condições de agitação, a solução contendo a biomassa manteve uma coloração azul-esverdeada, evidenciando baixa eficiência de adsorção. Esse comportamento resulta da natureza lignocelulósica do material *in natura*, composto predominantemente por celulose, hemicelulose e lignina, estruturas ainda não carbonizadas, que possuem baixa área superficial, porosidade pouco desenvolvida e disponibilidade reduzida de grupos funcionais capazes de interagir com o azul de metileno (Guarda, 2023).

Após o repouso, a coloração permanece praticamente inalterada, confirmando a ausência de remoção significativa do corante. Além das limitações estruturais da biomassa, a presença de compostos naturais característicos da casca de banana pacovan, como taninos e

saponinas, pode influenciar na alteração da cor da solução, sem necessariamente indicar adsorção efetiva (Pereira, 2014).

Schultz (2023), destacam que esses metabólitos secundários foram identificados em análises fitoquímicas da biomassa e estão diretamente associados às mudanças visuais observadas nas soluções tratadas. Dessa forma, a coloração azul-esverdeada não representa diminuição da concentração do corante, mas sim o resultado de interações químicas e físico-químicas entre os compostos liberados pela biomassa em meio aquoso.

Pereira (2014) acrescenta que esses metabólitos absorvem radiação na mesma faixa espectral do azul de metileno, provocando sobreposição de bandas de absorção e interferindo na interpretação visual e espectrofotométrica dos resultados. Assim, qualquer mudança de cor deve ser analisada com cautela, uma vez que decorre mais da liberação desses compostos naturais do que de um processo real de adsorção.

O desempenho mais modesto do carvão vegetal na remoção do azul de metileno pode ser compreendido a partir das transformações estruturais e químicas que ocorrem durante a carbonização. Esse processo térmico provoca a degradação parcial dos principais componentes da biomassa, celulose, hemicelulose e lignina, resultando em um material com composição química e morfologia significativamente alteradas. A decomposição desses polímeros reduz a presença de grupos funcionais oxigenados, como hidroxilas ($-OH$), carbonilas ($C=O$) e carboxilas ($-COOH$), que desempenham papel importante na adsorção por meio de interações eletrostáticas e ligações de hidrogênio com moléculas catiônicas como o azul de metileno. A diminuição desses grupos limita a afinidade superficial do carvão vegetal pelo corante (Silva *et al.*, 2023).

Outro fator determinante é a modificação na estrutura porosa. Durante a carbonização, ocorre a liberação de materiais voláteis e a reorganização das cadeias carbonosas, originando estruturas mais densas e compactas. Essa reorganização reduz a área superficial específica e a conectividade entre poros, diminuindo a capacidade de difusão das moléculas de corante até os sítios ativos. Embora a carbonização gere microporos, eles geralmente apresentam baixo desenvolvimento e acessibilidade restrita, comprometendo a capacidade de adsorção.

Durante a etapa de agitação, o carvão vegetal apresenta uma remoção inicial perceptível do corante. Esse comportamento está associado à abertura parcial de poros e ao acesso facilitado do azul de metileno à superfície carbonácea. A eliminação prévia de compostos voláteis favorece a formação de estruturas aromáticas parcialmente condensadas, capazes de estabelecer interações $\pi-\pi$ com o corante, além de interações de van der Waals. Essas características

explicam por que, mesmo tendo menos grupos funcionais oxigenados do que a biomassa, o carvão ainda demonstra maior capacidade inicial de adsorção.

No período de repouso, observa-se nova redução da coloração, porém em intensidade moderada. Esse comportamento indica que, apesar de apresentar desempenho superior ao da biomassa *in natura*, o carvão vegetal mantém limitações impostas por sua porosidade relativamente baixa, pela distribuição irregular dos microporos e pela presença de estruturas carbonáceas pouco desenvolvidas. Em razão disso, sua adsorção tende a ocorrer majoritariamente por fisorção, mecanismo dependente de forças fracas e menos eficiente que a quimissorção observada em materiais ativados ou em biocarvões com funcionalização superficial intensa.

Assim, o carvão vegetal apresenta um comportamento intermediário: melhor que a biomassa *in natura* devido às transformações estruturais promovidas pela carbonização, como a remoção de componentes voláteis e o aumento da organização da matriz carbonácea, porém ainda inferior aos materiais ativados, que possuem maior área superficial, superfície mais funcionalizada e maior afinidade energética pela adsorção de corantes catiônicos.

O carvão ativado apresenta comportamento marcadamente distinto. A ativação química com $ZnCl_2$ gera ampla rede de microporos e mesoporos. Na etapa de agitação, observa-se descoloração intensa da solução, evidenciando rápida difusão do corante para os poros. Após o repouso, a solução permanece praticamente incolor, demonstrando a alta eficiência adsortiva e a capacidade de remoção quase completa do corante. Esse desempenho se relaciona à elevada área superficial, grande volume de poros e alta densidade de sítios ativos – características essenciais de carvões ativados bem estruturados.

A análise conjunta evidencia uma evolução consistente do potencial adsortivo ao longo da transformação biomassa → carvão vegetal → carvão ativado, demonstrando que cada etapa de processamento confere propriedades estruturais progressivamente mais favoráveis à remoção do azul de metileno. A biomassa *in natura*, por apresentar estrutura lignocelulósica intacta, baixa porosidade e superfície limitada em grupos funcionais acessíveis, exibe adsorção mínima. O carvão vegetal, por sua vez, resulta da remoção parcial de frações voláteis e do início da formação de microporos, apresentando desempenho intermediário decorrente tanto da abertura estrutural inicial quanto da presença de domínios aromáticos que favorecem interações físico-químicas moderadas com o corante. Já o carvão ativado, obtido por ativação química, manifesta desenvolvimento substancial de porosidade, aumento expressivo da área superficial específica e maior disponibilidade de sítios ativos, possibilitando adsorção rápida, eficiente e com elevada capacidade de retenção de moléculas orgânicas. O conjunto de imagens confirma

qualitativamente essa progressão, evidenciando que a ativação química potencializa de forma significativa a eficiência adsortiva.

As análises apresentadas nos gráficos (Figura 12) demonstram de forma consistente que o carvão ativado sob condição de agitação apresenta maior eficiência adsortiva em comparação ao mesmo material mantido em repouso. Esse comportamento é evidenciado pela redução mais acentuada das bandas características do azul de metileno, especialmente na região de aproximadamente 664–668 nm, correspondente ao pico de absorbância máximo do corante, ao longo das diferentes concentrações avaliadas (10 a 500 mg/L⁻¹).

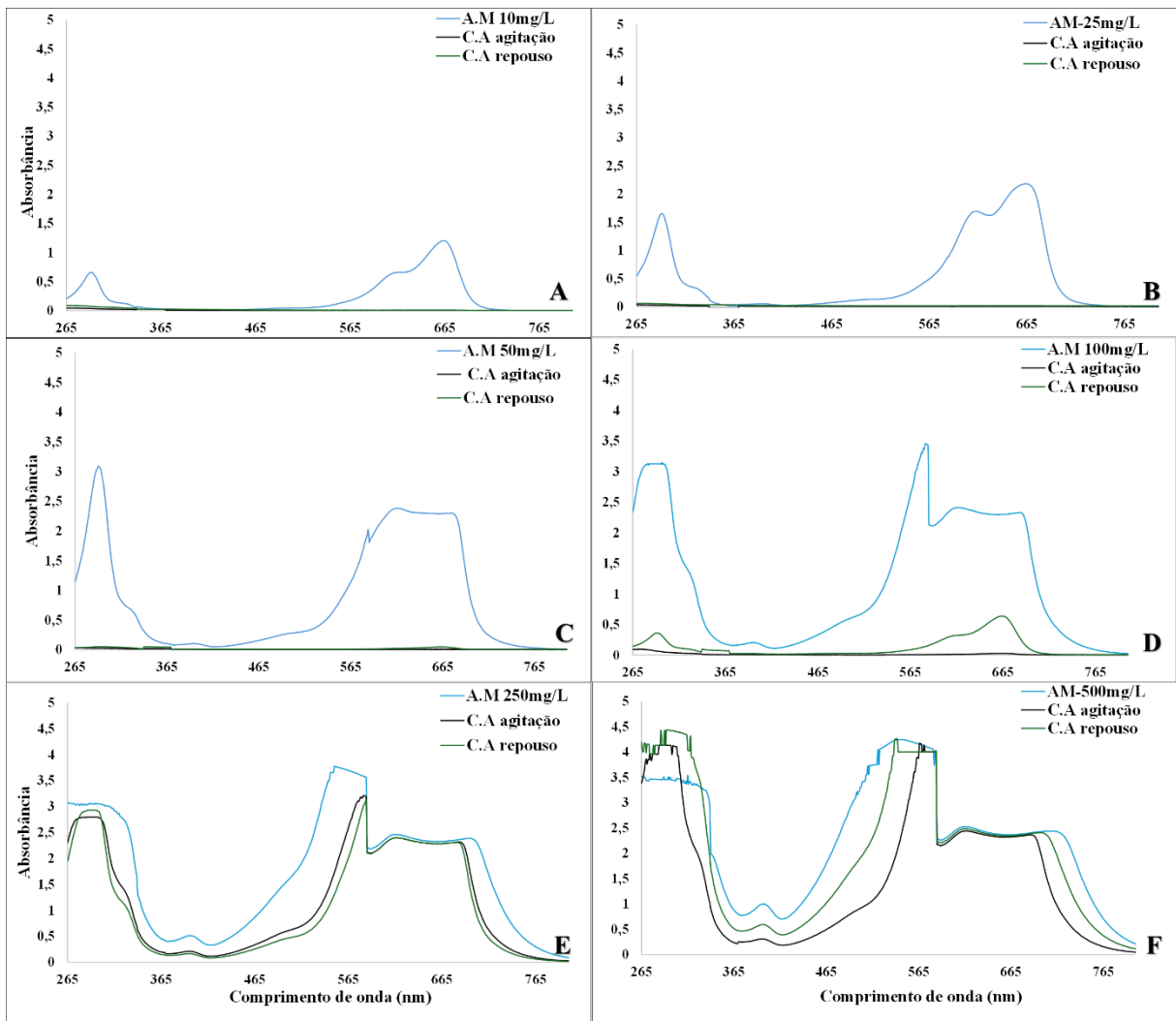


Figura 12: Espectro de adsorção do carvão ativado (CA) da banana pacovan em agitação e repouso em diferentes concentrações de azul de metileno (AM): (A) 10 mg/L⁻¹; (B) 25 mg/L⁻¹; (C) 50 mg/L⁻¹; (D) 100 mg/L⁻¹; (E) 250 mg/L⁻¹; e (F) 500 mg/L⁻¹.

Fonte: Autor (2025).

De acordo com Paulino (2020), o pico de absorção do azul de metileno (AM) na região entre 645 e 665 nm está diretamente associado à presença de grupos cromóforos contendo a ligação dimetilamino ($-\text{N}(\text{CH}_3)_2$), que participa de transições eletrônicas do tipo $\pi-\pi^*$ e $n-\pi^*$. Essas transições conferem ao corante sua coloração azul característica e tornam essa faixa espectral um marcador sensível para monitorar a eficiência do processo de adsorção. Assim, a redução da intensidade desse pico é um indicativo direto da remoção das moléculas de AM da solução.

Na Figura 12, observa-se que, para concentrações mais baixas (10, 25, 50 e 100 mg/L^{-1}), há uma diminuição nítida e progressiva da banda entre 645 e 665 nm após o contato com o carvão ativado CA, tanto em agitação quanto em repouso. Essa atenuação evidencia a remoção efetiva do corante, especialmente porque essa banda está associada à forma monomérica do AM em solução, a qual apresenta maior mobilidade e, portanto, é mais facilmente adsorvida. Sob agitação, o desaparecimento quase completo do pico indica elevada eficiência do CA, resultado da intensificação do transporte de massa e da maior frequência de colisões entre adsorbato e superfície porosa.

Nas condições em repouso, nota-se absorvância residual a partir da concentração 100 mg/L^{-1} , sugerindo que o processo de adsorção ocorre com menor rapidez. Isso pode ser atribuído à formação de gradientes de concentração próximos à superfície do adsorvente, dificultando a difusão das moléculas até os microporos. Ainda assim, a tendência de redução da banda confirma que o carvão ativado é eficiente mesmo sem agitação, embora em ritmo mais lento.

Quando o sistema é submetido às concentrações mais elevadas (250 e 500 mg/L^{-1}), conforme ilustrado nas Figuras 12E e 12F, não se observa diferença significativa entre as condições de agitação e repouso. Em ambas as situações, as bandas espectrais permanecem praticamente inalteradas, sem redução expressiva de absorvância. Esse comportamento indica que, nessas concentrações mais altas, o carvão ativado atinge rapidamente sua capacidade de adsorção, levando o sistema a um estado próximo da saturação. Dessa forma, a limitação observada decorre não da condição operacional (agitação ou repouso), mas da insuficiência de sítios ativos disponíveis para remover o contaminante em concentrações tão elevadas.

A literatura também aponta que concentrações elevadas de azul de metileno podem limitar a interação do grupo metil do corante com o meio aquoso, dificultando sua dispersão e aumentando a tendência de formação de agregados (De Souza *et al.*, 2024). Essa mudança no ambiente local pode alterar a polaridade do solvente, favorecer a dimerização ou até provocar deslocamentos do pico de absorção, fenômenos que impactam diretamente o processo de

adsorção e podem exigir maior massa de adsorvente para compensar a menor disponibilidade de moléculas monoméricas.

Com base nesses princípios, avaliam-se concentrações intermediárias do corante (125, 150 e 200 mg L⁻¹), com o objetivo de estimar o limite máximo de adsorção do carvão ativado produzido a partir da casca da banana pacovan. Na concentração de 125 mg/L⁻¹; (Figura 13A), o carvão ativado sob agitação promove quase a completa eliminação da banda em 665 nm, evidenciando elevada taxa de remoção e indicando que os sítios ativos ainda estão amplamente disponíveis. Ao elevar a concentração para 150 mg/L⁻¹, (Figura 13B), observa-se o reaparecimento discreto da banda, mesmo em agitação, sugerindo que o material se aproxima da saturação. Esse leve aumento da absorbância indica que parte das moléculas do corante permanece na solução, embora a maior parte continue sendo removida de forma eficiente.

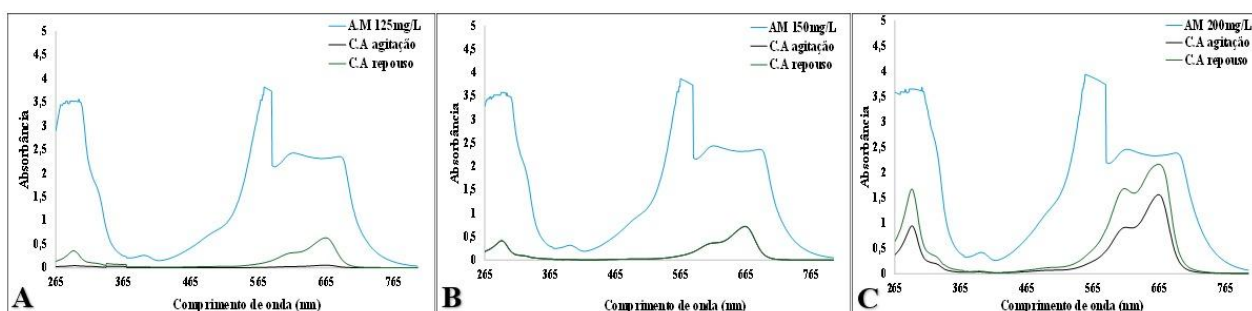


Figura 13: Carvão Ativado (CA) da Banana pacovan em agitação e repouso em diferentes concentrações de AM: (A) 125 mg/L⁻¹; (B) 150 mg/L⁻¹; e (C) 200 mg L⁻¹.

Fonte: Autor (2025).

Na condição mais concentrada (200 mg/L⁻¹; Figura 13C), a intensidade da banda aumenta de forma significativa, mesmo no sistema sob agitação. Esse comportamento revela que a capacidade máxima de adsorção do carvão ativado utilizando 10 mg de adsorvente foi ultrapassada, impossibilitando a remoção completa do corante. Assim, inferimos que a eficiência máxima do material ocorre em concentrações próximas de 150 mg/L⁻¹; acima desse valor, há perda evidente de desempenho devido à saturação dos poros e ocupação total dos sítios ativos disponíveis.

De modo geral, a análise dos espectros confirma que o carvão ativado da banana pacovan apresenta excelente potencial adsorptivo, especialmente sob agitação, e que sua capacidade máxima tende a se estabilizar entre 150 e 200 mg/L⁻¹, faixa na qual a competição por sítios ativos e os fenômenos de agregação do corante tornam-se mais expressivos. Além disso, observou-se que a remoção do azul de metileno é fortemente dependente da concentração inicial, pois em baixas concentrações, ocorre redução expressiva das bandas de absorção,

indicando elevada disponibilidade de sítios ativos e rápida difusão das moléculas para a superfície e microestruturas do adsorvente. Entretanto, à medida que a concentração aumenta, o sistema passa a operar próximo da saturação, e o desempenho adsorptivo torna-se limitado pela escassez de sítios disponíveis. Assim, nas concentrações mais elevadas, o comportamento entre agitação e repouso torna-se semelhante, com bandas espectrais praticamente inalteradas.

Esse conjunto de evidências está de acordo com estudos prévios, como os de Xie *et al.* (2020) e Abdollahi (2021), que destacam que a eficiência de materiais carbonáceos ativados depende tanto da área superficial e porosidade quanto da razão entre quantidade de soluto e capacidade máxima de adsorção.

5.5 ISOTERMA DE ADSORÇÃO

Os dados experimentais das amostras de banana pacovan, para o carvão ativado em repouso (CAR) e carvão ativado em agitação (CAA), foram ajustados aos modelos de Langmuir e Freundlich (Figura 14), cujos parâmetros encontram-se na Tabela 3. A partir da análise das isotermas e dos coeficientes de determinação (R^2), foi possível avaliar a viabilidade e a favorabilidade da adsorção do azul de metileno em cada condição estudada.

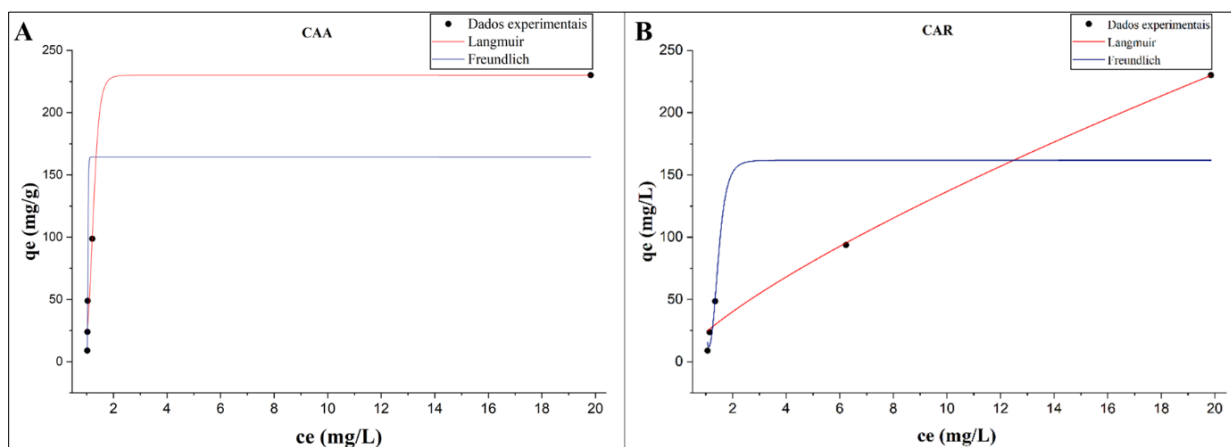


Figura 14: Isoterma de Langmuir e Freundlich da banana pacovan (A) Carvão ativado em agitação (B) carvão ativado em repouso.

Fonte: Autor (2025).

Tabela 2: Parâmetros dos modelos de Langmuir e Freundlich da banana pacovan.

Amostras	Langmuir			Freundlich		
	q_{\max} (mg/g)	K_L	R^2	$k_f \text{ mg/g(l/mg)}^{1/n}$	$1/n$	R^2
CAR	31874,4561	0,00074	0,9806	161,7736	-67,9631	0,7031
CAA	230,1037	0,10094	0,9794	164,4808	-871,7173	0,7305

Fonte: Autor (2025)

A análise das isotermas de adsorção (Figura 14) obtidas para o carvão ativado da banana pacovan evidencia diferenças marcantes entre as condições de agitação (CAA) e repouso (CAR), refletidas tanto no comportamento gráfico quanto nos parâmetros ajustados pelos modelos de Langmuir e Freundlich (Tabela 3). Para o CAA, o modelo de Langmuir apresentou excelente desempenho, com $q_{\max} = 230,1037 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ e constante de Langmuir $K_1 = 0,10094$, indicando alta afinidade do azul de metileno pela superfície do adsorvente. Esse valor relativamente elevado de K_1 sugere que a agitação favorece o transporte de massa, ampliando o acesso do corante aos microporos, mesoporos e macroporos, conforme discutido por Pereira *et al.* (2008). A forma típica da isoterma rapidamente ascendente e logo tendendo ao platô reforça a predominância de adsorção em monocamada, corroborada pelo alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9794$), que confirma o ajuste adequado ao modelo de Langmuir.

No caso do CAR, embora o ajuste de Langmuir também apresente R^2 elevado (0,9806), o valor extremamente alto de q_{\max} ($31.874,4561 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) identifica uma clara superestimação, indicando que o sistema não atingiu equilíbrio nas concentrações avaliadas. Essa incoerência evidencia que, em repouso, o processo adsorptivo é limitado por restrições difusionais, resultando em isotermas que não apresentam tendência bem definida ao platô, o que compromete a extrapolação dos parâmetros. A baixa constante de Langmuir ($K_1 = 0,00074$) reforça a menor afinidade do adsorbato pela superfície sob essa condição, coerente com a reduzida intensidade de transporte de massa quando o sistema permanece estático.

O modelo de Freundlich apresentou limitações significativas para ambas as condições. Apesar dos R^2 moderados (0,7031 para CAR e 0,7305 para CAA), os valores negativos de $1/n$, parâmetro que, segundo Morais (2014), deve refletir favorabilidade da adsorção em superfícies heterogêneas, tornam o modelo fisicamente inviável para este sistema. Tais inconsistências, também relatadas por Vigdorowitsch (2021), são indicativas de que o comportamento adsorptivo não segue a tendência empírica prevista por Freundlich, possivelmente devido à natureza altamente microporosa do carvão ativado e à rápida ocupação dos sítios de maior energia, fenômenos que o modelo não é capaz de descrever adequadamente.

De modo geral, a interpretação combinada das isotermas e dos parâmetros ajustados mostra que o modelo de Langmuir é o mais adequado para representar a adsorção do azul de metileno pelo carvão ativado da banana pacovan, especialmente sob agitação, condição em que se observa maior afinidade, melhor definição do platô de equilíbrio e capacidade máxima coerente com materiais carbonáceos de alta porosidade. A agitação otimiza a difusão externa e interna, resultando em maior eficiência adsorptiva, enquanto o repouso limita o acesso aos sítios disponíveis, prejudicando a modelagem e levando a superestimações. A inadequação do modelo

de Freundlich reforça que o sistema opera predominantemente por adsorção em monocamada, alinhando-se a estudos prévios com biossorventes e carvões ativados (Bugiereck *et al.*, 2013; Cruz, 2009).

5.6 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

A Figura 15 representa a cinética de adsorção do AM em diferentes concentrações (10, 25, 50, 100 e 250 mg/L⁻¹), utilizando 10 mg de carvão ativado sob agitação (CAA). Para as concentrações de 10 mg/L e 25 mg/L⁻¹, observa-se uma queda abrupta na absorvância nos primeiros minutos, sugerindo remoção imediata do corante e rápido alcance do equilíbrio. Esse comportamento é característico de sistemas com elevada disponibilidade de sítios ativos e é consistente com o modelo de Langmuir, que assume a formação de monocamadas em superfícies homogêneas com taxa de adsorção equivalente à taxa de dessorção em equilíbrio (Kiane, 2024).

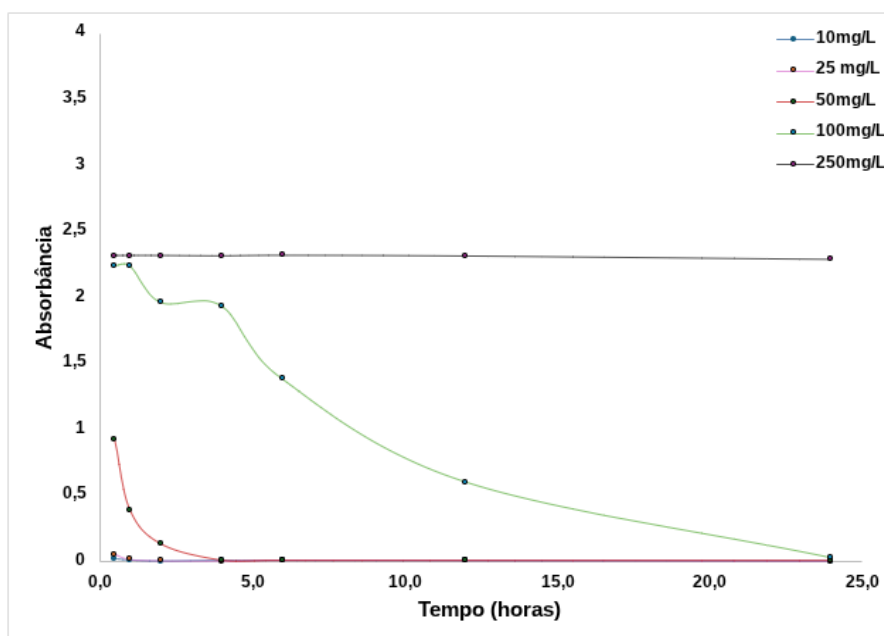


Figura: 15 Cinética de Adsorção

Fonte: Autor (2025)

No caso da concentração de 50 mg/L⁻¹, a adsorção ocorre majoritariamente nas primeiras 4 horas, com estabilização subsequente da curva, indicando que o equilíbrio foi atingido após esse período. Esse perfil evidencia um sistema ainda favorável do ponto de vista cinético, embora com maior ocupação dos sítios ativos.

A 100 mg/L^{-1} , observa-se uma diminuição gradual e contínua da absorvância ao longo de 20 horas, indicando que o sistema necessita de um tempo significativamente maior para atingir o equilíbrio. Esse comportamento pode estar associado à competição entre moléculas do adsorvato por sítios limitados e a efeitos de resistência à difusão, especialmente em concentrações mais elevadas. Resultados semelhantes foram descritos por Mittal *et al.* (2010), onde o aumento da concentração levou a uma fase inicial rápida seguida de um platô, devido à saturação progressiva da superfície adsorvente.

Por fim, para 250 mg/L^{-1} ; a curva permaneceu praticamente inalterada durante todo o período experimental, sugerindo que a capacidade adsorvativa do carvão foi rapidamente superada, resultando em adsorção mínima. A ausência de variações significativas entre 6 e 24 horas reforça que o sistema alcançou rapidamente um equilíbrio de baixa eficiência, no qual os sítios ativos disponíveis estavam totalmente ocupados. Tal condição é compatível com o modelo proposto por Anirudhan e Ramachandran (2007), que descreve equilíbrio com baixas taxas de adsorção e dessorção quando a saturação da superfície é precoce.

5.7 CINÉTICA DE PSEUDOPRIMEIRA ORDEM E PSEUDOSEGUNDA ORDEM

A avaliação da cinética de adsorção do AM utilizando carvão ativado sob agitação foi realizada com base nos modelos de pseudoprimeira ordem e pseudosegunda ordem. Os parâmetros cinéticos obtidos estão apresentados nas Tabelas 4 e 5, enquanto os ajustes gráficos encontram-se na Figura 16(A–E).

Tabela 3: Parâmetros cinéticos obtidos com o modelo de pseudoprimeira ordem para o CAA.

Concentração (mg.L)	q_e (mg mg)	K_1	R^2
10	10,1235	8,9351	0,8173
25	25,1235	8,5292	0,9523
50	49,6980	3,9360	0,9142
100	90,1511	4,8101	0,1789
250	232,6371	17,1833	0,0381

Fonte: Autor (2025)

Tabela 4: Parâmetros cinéticos obtidos com o modelo de pseudosegunda ordem para o CAA.

Concentração (mg.L)	q_e (mg mg)	K_2	R^2
10	10,1426	15,9430	0,8276
25	25,1766	5,4889	0,8768
50	50,7717	0,2368	0,9794
100	92,9103	0,1295	0,4781
250	232,6474	21,8041	0,1511

Fonte: Autor (2025)

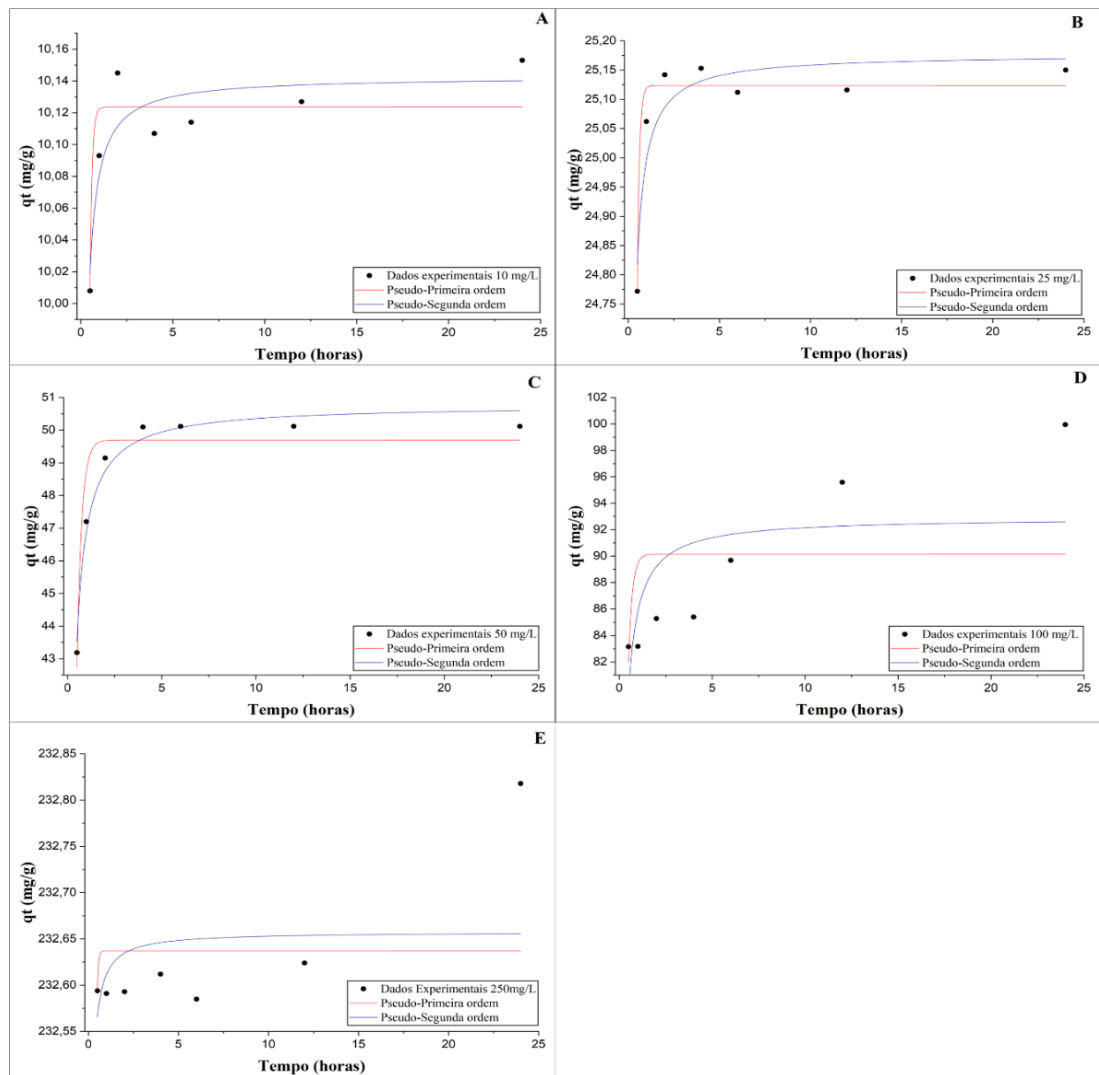


Figura 16: Cinética de seudoprimeira ordem e pseudosegunda ordem para concentrações de (A) 10 mg/L⁻¹, (B) 25 mg/L⁻¹, (C) 50 mg/L⁻¹, (D) 100 mg/L⁻¹ e (E) 250 mg/L⁻¹.

Fonte: Autor (2025)

De modo geral, observou-se que o modelo de pseudosegunda ordem foi o que melhor representou os dados experimentais, apresentando coeficientes de determinação (R^2) mais elevados em concentrações de 50, 100 e 250 mg/L⁻¹; (Tabela 5). Esse comportamento indica que o processo de adsorção ocorre predominantemente por quimissorção, mecanismo no qual há interação química entre os grupos funcionais presentes na superfície do adsorvente e as moléculas do corante. Tal mecanismo envolve compartilhamento ou troca de elétrons, resultando em ligações mais fortes e seletivas, como proposto por Ho e McKay (1999).

Miretzsky *et al.* (2010) destacam que o modelo de pseudosegunda ordem assume quase todas as condições do modelo de pseudoprimeira ordem, com a diferença fundamental de que se trata de uma reação de segunda ordem envolvendo dois sítios adsorptivos. Além disso, esse modelo considera que a taxa de adsorção é proporcional ao número de sítios ativos desocupados, e que a etapa limitante do processo é governada por quimissorção, isto é, uma reação química com envolvimento direto dos elétrons do adsorvato e do adsorvente.

A superioridade do modelo de pseudosegunda ordem é reforçada pela menor diferença entre os valores experimentais de q_{eq} e q_e e os valores teóricos previstos, além da melhor aderência das curvas ajustadas às curvas experimentais, conforme visualizado nas Figuras 16C–E (50, 100 e 250 mg/L⁻¹); Essa aderência evidencia que, à medida que a concentração de AM aumenta, há maior ocupação dos sítios ativos e formação de ligações químicas específicas, características de sistemas cineticamente controlados por quimissorção. Além disso, observa-se um esgotamento gradual dos sítios ativos, promovendo a formação de ligações químicas mais fortes e seletivas, compatíveis com o modelo de pseudosegunda ordem, conforme discutido por Guo & Wang (2019).

Entretanto, uma exceção foi identificada para a concentração de 25 mg/L⁻¹, onde o modelo de pseudoprimeira ordem apresentou melhor ajuste ($R^2 = 0,9523$), superando o modelo de pseudosegunda ordem ($R^2 = 0,8768$). A curva correspondente na Figura 15B mostra excelente correlação com o modelo de pseudoprimeira ordem, indicando que, neste caso, o mecanismo predominante está mais relacionado à físissorção, caracterizada por interações fracas e de natureza física, como forças de Van der Waals. Esse tipo de adsorção é geralmente mais rápido, superficial e favorecido quando a quantidade de moléculas de adsorvato é baixa em relação à disponibilidade de sítios ativos, como ocorre em concentrações diluídas (Jodeh *et al.*, 2016; Meili *et al.*, 2017).

Na concentração de 10 mg/ L⁻¹, ambos os modelos apresentaram R^2 semelhantes (0,8276 para pseudosegunda ordem e 0,8173 para pseudoprimeira ordem), sugerindo que o

sistema pode estar operando sob um regime misto, onde interações físicas e químicas ocorrem simultaneamente. A curva de ajuste na Figura 16A confirma essa ambiguidade, com boa concordância para os dois modelos, embora com leve vantagem para a pseudosegunda ordem no valor previsto de q_{eq} e q_e .

Para a concentração mais elevada, 250 mg/L^{-1} , observou-se limitação nos dois modelos clássicos. Apesar de a pseudosegunda ordem apresentar melhor ajuste ($R^2 = 0,1511$) contra $0,0381$ da pseudoprimeira ordem), o baixo valor do coeficiente de determinação e a discrepância entre os dados experimentais e os valores previstos indicam saturação precoce do adsorvente e possível formação de multicamadas ou bloqueio de poros (Figura 16E). Esse comportamento não é contemplado pelos modelos cinéticos convencionais, o que reforça a necessidade de utilizar abordagens complementares, como o modelo de difusão intrapartícula ou modelos de resistência à transferência de massa (Ferreira *et al.*, 2014).

Portanto, os resultados obtidos neste estudo apontam que o modelo de pseudosegunda ordem é mais adequado para descrever a cinética de adsorção do AM pelo carvão ativado da banana pacovan, especialmente em concentrações moderadas a elevadas. A predominância desse modelo sugere um processo governado por interações químicas, possivelmente com formação de complexos ou ligações específicas entre o corante e os grupos funcionais presentes na superfície do adsorvente. No entanto, ressalta-se que a quimissorção pode limitar a regeneração e reutilização do material, uma vez que a remoção de moléculas fortemente adsorvidas pode demandar tratamentos químicos ou térmicos mais agressivos.

6. CONCLUSÃO

O carvão ativado obtido a partir da biomassa da casca de banana pacovan apresentou rendimento satisfatório (75,05%) em relação ao carvão vegetal, além de baixo teor de cinzas (1,5%), indicando elevada pureza e qualidade do material produzido. Tais características físico-químicas reforçam seu potencial para aplicações em processos de purificação de água, que requerem adsorventes com alta eficiência e seletividade. Nos estudos de adsorção, observou-se elevada eficiência do carvão ativado sob agitação na remoção do corante AM, com expressiva redução da absorbância ao longo do tempo, especialmente em concentrações mais baixas, nas quais o sistema atinge o equilíbrio rapidamente.

Entre os modelos de isoterma avaliados, o de Langmuir apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, indicando adsorção em monocamada sobre uma superfície homogênea, com capacidade máxima de adsorção de $230,10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. Por outro lado, o modelo de Freundlich

mostrou-se pouco representativo, sugerindo que a superfície do adsorvente não apresenta heterogeneidade significativa.

Quanto aos estudos cinéticos, o modelo de pseudosegunda ordem foi o que melhor descreveu o comportamento adsorptivo na maioria das concentrações, compatível com um mecanismo de quimissorção, caracterizado por interações químicas mais fortes entre adsorvente e adsorvato. Dessa forma, os resultados obtidos evidenciam que o carvão ativado derivado da casca de banana pacovan apresenta propriedades físico-químicas adequadas e desempenho adsorptivo relevante, ajustando-se preferencialmente ao modelo de Langmuir e à cinética de pseudosegunda ordem. Esses achados reforçam seu potencial como uma alternativa eficiente, sustentável e de baixo custo para a remoção de contaminantes orgânicos em meio aquoso.

REFERÊNCIAS

ABDOLLAHI, Reza; SOHRABI, Negin; MOHAMMADI, Reza. Síntese e aplicação de nanocompósito magnético de carvão ativado modificado por óxido de cálcio para remoção de corante verde malaquita de solução aquosa: estudo isotérmico e cinético do processo de adsorção. **Journal of Water and Wastewater** , v. 32, n. 4, p. 47-66, 2021.

ABEL, Leticia Gabriele Crespilho; DE OLIVEIRA ROCHA, Kleper; GAVA, Maristela. O USO DO CARVÃO DE BAMBU PARA REMOÇÃO DE CONTAMINANTES EM ÁGUA. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, v. 4, n. 2, p. 1-9, 2023.

ALAFNAN, Saad et al. Langmuir adsorption isotherm in unconventional resources: Applicability and limitations. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 207, p. 109172, 2021.

ALBERTON, Matheus Borghezani; LINDINO, Cleber Antonio. ADSORÇÃO DO HORMÔNIO 17 α -METILTESTOSTERONA EM SOLOS. **Periódico Tchê Química**, v. 17, n. 35, 2020.

ALONSO, D. M.; GALLO, J. M. R.; MELLMER, M. A.; WETTSTEIN, S. G.; DUMESIC, J. A. Direct conversion of cellulose to levulinic acid and gamma-valerolactone using solid acid catalysts. **Catalysis Science and Technology**, v. 3, n. 4, p. 927-931, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1039/c2cy20689g>

ALVES, A. T. et al. Produção de carvão ativado através de resíduos da Castanheira-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) voltados na solução para o tratamento de águas. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 12, p. e394111234482, 18 set. 2022.

ANIRUDHAN, TS; RAMACHANDRAN, M. Bentonita modificada com surfactante como adsorvente para a remoção de ácido húmico de águas residuais. **Applied clay science** , v. 35, n. 3-4, p. 276-281, 2007.

ARCANJO, M. C. N.; COSTA, D. V. Utilização de resíduos de frutos na produção e composição nutricional da larva de *Tenebriomolitor*. **Ciência Animal**, v.32, n.3, p.27-37, 2022.

AZEVEDO, Azevedo et al. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA FINAL DE CARBONIZAÇÃO E DA TAXA DE AQUECIMENTO NO RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO E TEOR DE CINZAS DO CARVÃO DE *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, v. 9, n. 16, p. 1279–1287, 2013.

BÁRTA, Renata Linassi et al. Qualidade da água para consumo humano no Brasil: revisão integrativa da literatura. **Vigilância Sanitária em Debate: Sociedade, Ciência & Tecnologia**, v. 4, pág. 74-85, 2021.

BEDIAKO, John Kwame et al. Caracterização dos componentes bioquímicos residuais de biomassas de casca de banana extraídas sequencialmente e suas aplicações em remediação ambiental. **Waste Management**, v. 89, p. 141-153, 2019.

BENTES, Vera Lúcia Imbiriba. **Preparação e caracterização de compósitos a base de fosfatos de ferro suportados em carvões ativado de resíduos de caroços de açaí e do endocarpo de tucumã para aplicação ambiental**. 2017. 137 f. Tese (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

BUGIERECK, Alexandra Monego et al. Avaliação da capacidade adsorptiva de carvão ativado quimicamente a partir de casca de banana. **Revista Acta Ambiental Catarinense**, v. 10, n. 1/2, p. 45-60, 2013.

CAVALCANTE, V. R. **Produção de carvão ativado a partir de resíduos de coco, banana e laranja**. Recife: Universidade Católica de Pernambuco, 25 fev. 2015.

CLAUDINO, A. **Preparação de carvão ativado a partir de turfa e sua utilização na remoção de poluentes**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis -SC, pp.100, 2003.

COSTA, Helson Moreira da. **Ensaio Mecânicos**. Rio de Janeiro: Estácio, 2019.

CRUZ, Maria A R. da; Utilização da casca de banana como biossorvente. 2009 74 f. Dissertação – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2009.

DA SILVA CAMPELO, Maria Eliene et al. Caracterização e aceitação sensorial de banana prata (*musa paradisiaca*) produzida em sistemas orgânico e convencional. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 65623-65640, 2020.

DAMÁSIO, Renato Augusto Pereira et al. Controle da Carbonização em Forno Circular por Meio da Temperatura Interna. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 6, n. 1, p. 10.12953/2177-22, 1 maio 2015.]

DE COSTA, Patrícia D.; FURMANSKI, Luana M.; DOMINGUINI, Lucas. Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de casca de nozes para adsorção de azul de metileno. **Revista virtual de química**, v. 7, n. 4, p. 1272-1285, 2015.

DE COSTA, Patrícia D.; FURMANSKI, Luana M.; DOMINGUINI, Lucas. Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de casca de nozes para adsorção de azul de metileno. **Revista virtual de química**, v. 7, n. 4, p. 1272-1285, 2015.

DE FARIAS, Josivalter Araújo et al. ISOTERMAS DE ADSORÇÃO DE LANGMUIR PARA FÓSFORO EM SOLOS DE ALAGOAS. **Revista Ciência Agrícola**, v. 22, n. especial, 2024.

DE SOUZA RODRIGUES, Fábio et al. Análise da qualidade de solução tópica de azul de metileno. **Revista Ensaios Pioneiros**, v. 8, n. 1, 2024.

ENCARNAÇÃO, J. R. Estudo de adsorção do carvão ativado preparado a partir do beneficiamento de resíduos de madeira. **ICET/UFAM**, 2019.

FARIAS., O. R. **Estudo da adsorção de cromo hexavalente em altas concentrações**. 2013. Dissertação - Mestre em engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

FERNANDES, Maria Eduarda et al. Aplicação da espectroscopia de absorção na determinação do Índice da Qualidade da Água (IQA). 2025.

FERREIRA, Ilomara Vasconcelos. Carvão ativado de resíduo de Baru para adsorção de fármacos. 2022.

FERREIRA, R. N. et al. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. **Universidade Federal do Ceará**, 2014.

FORTALEZA, Amanda Pinheiro et al. Biomassa de espécies florestais para produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1436-1451, 2019.

GOMES, Pedro Barroso; BIANCHI, Maria Lúcia; MAGALHÃES, Fabiano. Obtenção de carvão ativado a partir do resíduo fuligem de candeia. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 02, p. e12965, 2021.

GUARDA, Jamile. Injeção de biomassa em altos-fornos: uma revisão sistemática da literatura. 2023.

GUILLOSSOU, R.; LE ROUX, J.; MAILLER, R.; VULLIET, E.; MORLAY, C.; NAULEAU, F.; GASPERI, J.; ROCHER, V. Organic micropollutants in a large wastewater treatment plant: what are the benefits of an advanced treatment by activated carbon adsorption in comparison to conventional treatment? *Chemosphere*, v. 218, p. 1050-1060, 2019.

GUO, Xuan; WANG, Jianlong. Um modelo cinético geral para adsorção: Análise teórica e modelagem. **Journal of Molecular Liquids**, v. 288, p. 111100, 2019.

HANKE, Daniel et al. Produção e caracterização de biocarvão a partir de diferentes fontes de biomassa vegetal: aproveitamento de resíduos arbóreos e agrícolas sem destinação apropriada. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 10, n. 2, 3 mar. 2022.

HEYLMANN, Kelly Kathleen Almeida et al. Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de caroço de pêssego no tratamento de efluente têxtil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, n. 3, p. 485-494, 2021.

HEYLMANN, Kelly Kathleen Almeida et al. **Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de caroço de pêssego no tratamento de efluente têxtil**. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 26, n. 3, p. 485-494, 2021.

HIKAL, W. M. et al. Banana Peels: a waste treasure for human being. **Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine**, v. 2022, p. 1-9, 2022.

HO, Y. S.; MCKAY, G. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, v. 34, n. 5, p. 451–465, 1999.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

JODEH, Shehdeh et al. **Adsorption of diclofenac from aqueous solution using Cyclamen persicum tubers based activated carbon (CTAC)**. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, [s.l.], v. 20, n. 1, p. 32-38, 2016. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaubas.2014.11.002>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1016/j.jaubas.2014.11.002>. Acesso em: 07 agos. 2025.

JÚNIOR, Affonso Celso Gonçalves. Descontaminação e monitoramento de águas e solos na região amazônica utilizando materiais adsorventes alternativos, visando a remoção de metais pesados tóxicos e pesticidas. **Inc. Soc., Brasília, DF**, v. 6, n. 2, p. 105-113, 2013.

KHALILI, Nasrin R. et al. Produção de carvão ativado micro e mesoporoso a partir de lodo de fábrica de papel: I. Efeito da ativação com cloreto de zinco. **Carbono**, v. 38, n. 14, p. 1905-1915, 2000.

KIANI, Daniyal; WACHS, Israel E. O enigma dos "sítios de pares" na cinética da reação de Langmuir-Hinshelwood em catálise heterogênea. **ACS catalysis**, v. 14, n. 13, p. 10260-10270, 2024.

LANGMUIR, Irving. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal of the American Chemical society**, v. 40, n. 9, p. 1361-1403, 1918.

LEITE, Bruna Jann. Remoção de glifosato em meio aquoso usando carvão ativado proveniente de resíduos da casca da Acácia Negra (*Acácia mearnsii* De Wild). 2025

LEWIS, I. C. Chemistry of carbonization. **Carbon**, v. 20, n. 6, p. 519–529, 1 jan. 1982.

LOPES, C. W. et al. Síntese e caracterização de carvões ativados derivados do sabugo de milho. **Perspectiva Erechim**, v. 37, p. 27-35, 2013.

LOUREIRO, Breno Assis et al. Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corybia spp* para uso industrial. **Ciência Florestal**, v. 31, p. 214-232, 2021.

LOZANO-CASTELLÓ, D.; CALO, J. M.; CAZORLA-AMORÓS, D.; LINARESSOLANO, A. Carbon activation with KOH as explored by temperature programmed techniques, and the effects of hydrogen. **Carbon**, Oxford, v. 45, n. 13, p. 2529-2536, Nov. 2007.

MAIA, L. S.; PEREIRA, P H. F.; DA SILVA, A I. C.; DA COSTA, T B.; MULINARI, DR. ROSA, D.; A novel starch-based composite hydrogel enhanced by activated charcoal from the banana peel for water decontamination. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 141, n. 29, 2024.

MANICA, I. **Bananas: do plantio ao amadurecimento**. Porto Alegre: Cinco Continentes, 1998. p.99.

MARTINS, Wanessa Alves et al. Reaproveitamento de resíduos agroindustriais de casca banana para tratamento de efluentes. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 1, p. 15, 2015.

MCCABE, Smith; SMITH, J. Harriott. **Unit operation of chemical engineering**, v. 5, 1993.

MCCABE, Warren L.; SMITH, Julian C.; HARRIOTT, Peter. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 5. ed. United States: McGraw-Hill, Inc, 1993. 1130 p.

MEILI, Lucas et al. Fibra de Ouricuri (*Syagrus coronata*): um novo biossorvente para remover azul de metileno de soluções aquosas. **Water Science and Technology**, v. 75, n. 1, p. 106-114, 2017.

MELO JÚNIOR, Clécio de Albuquerque. Cinética de adsorção de diclofenaco sódico em carvão ativado granulado. 2021.

MENDONÇA, A. L. P.; SILVA FILHO, E. C. E; MAMED, D. DE O. As águas da região norte brasileira e a luta das comunidades ribeirinhas do estado do Amazonas pela água potável. **Revista do Direito Público**, v. 18, n. 2, p. 187–204, 2023.

MIRETZKY, Patricia; MUÑOZ, Carolina; CARRILLO-CHAVEZ, Alejandro. Cd (II) removal from aqueous solution by *Eleocharis acicularis* biomass, equilibrium and kinetic studies. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 8, p. 2637-2642, 2010.

MITTAL, Alok et al. Adsorção do corante perigoso cristal violeta de águas residuais por materiais residuais. **Journal of colloid and interface science**, v. 343, n. 2, p. 463-473, 2010.

MOHAPATRA, D.; MISHRA, S.; Sutar, N. Banana and its by-product utilisation: An overview. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v. 69, p. 323-329, 2010.

MORAIS, E. D. Produção de carvão ativado a partir do mesocarpo do coco-da-baía (*Cocos nucifera* Linn) utilizando H₃PO₄, CH₃COONa e KOH como ativantes. 2014.

Mota FCM. Análise da cadeia produtiva do carvão vegetal oriundo de *Eucalyptus* sp. no Brasil [dissertação]. Brasília: Universidade de Brasília; 2013.

MOTTA, GE; Angonese, M.; Valencia, GA; Ferreira, SRS Além da casca: Abordagem de biorrefinaria de outros resíduos de banana como trampolim para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas. *Sustain. Chem. Pharm.* 2022, 30, 100893.

NASCIMENTO FILHO, W. B.; FRANCO, C. R. Avaliação do potencial dos resíduos obtidos através do processamento agroindustrial no Brasil. **Revista Virtual de Química**, vol.7, n. 6, p. 1968-1987, 2015.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do et al. ADSORÇÃO: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Imprensa Universitária, Universidade Federal do Ceará - UFC 2014. 258 p.

OLIVEIRA, F. M.; COELHO, L. M.; MELO, E. I. **Resíduos agroindustriais como adsorventes para remoção de azul de metileno em meio aquoso**. 2016. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Química) - Universidade Federal de Goiás, Catalão.

OLIVEIRA, Vanessa Caroline de; MENDES, Fabrícia Queiroz. Formulação de novos produtos a partir do aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma revisão narrativa. **Ciências Agrárias: o avanço da ciência no Brasil**, v. 2, p. 98-115, 2021.

OROZCO, Raymundo Sánchez et al. Characterization of lignocellulosic fruit waste as an alternative feedstock for bioethanol production. **BioResources**, v. 9, n. 2, p. 1873-1885, 2014.

PAULINO, Hellen Fernanda da Silva. **Avaliação da influência da temperatura em farinha de maca peruana (*Lepidium meyenii* Walp) utilizando-se espectroscopia e quimiometria**. 2020.

PEREIRA, Aline. **Determinação do perfil químico e da atividade cicatrizante de extratos de casca de banana cultivar prata anã (*Musa sp.*) e o desenvolvimento de um curativo para pequenas lesões**. 2014. Tese de Doutorado. PhD thesis. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/Florianópolis.

PEREIRA, E. I. **Produção de Carvão ativado a partir de diferentes percursos utilizando FeCl₃ como agente ativante**. 2010. p. 72. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais – MG, 2010

PEREIRA, Elaine et al. Preparação de carvão ativado em baixas temperaturas de carbonização a partir de rejeitos de café: utilização de FeCl₃ como agente ativante. **Química Nova**, v. 31, n. 6, p. 1296–1300, 2008.

PIFFER, C.; SANTOS, D.SOUZA, F. H. B. **Carvão ativado como estratégia para remoção de interferentes endócrinos**. [s.l.: 2016]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/344072443>>.

PIZA, A. V. T. **Avaliação da capacidade adsorptiva de carvões ativados para a remoção de Diuron e Hexazinona**. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências Exatas Naturais e Tecnológicas da Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2008.

PORTUGAL, J. P.; SORIA, R.; RATHMANN, R.; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. Agricultural and agro-industrial residues to energy: Techno-economic and environmental assessment in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 81, p. 521-533, 2015.

RAMOS, P. H. et al. Production and characterization of activated carbon prepared from pva defect coffee. **Química Nova**, v. 32, n. 5, p. 1139–1143, 2019.

REIS, D. C. N. S. P. et al. Importância do estudo da área superficial específica e porosidade do estearato de magnésio para o setor farmacêutico. 2013.

RIVERA-UTRILLA, J.; et al. Bisphenol A removal from water by activated carbon. Effects of carbon characteristics and solution chemistry. **Environmental Science & Technology**, v. 39, p. 6246-6250, 2005.

ROCHA, Selma Augusta Martins. **POLUIÇÃO POR MERCÚRIO E SEUS EFEITOS SOBRE A SAÚDE HUMANA NA REGIÃO AMAZÔNICA**. **REVISTA FOCO**, v. 18, n. 6, p. e9040-e9040, 2025.

ROVANI, Suzimara. Preparo e caracterização de carvão e carvão ativado a partir de resíduos agroindustriais e aplicação na remoção de estrogênios. 2015.

ROWELL, R. M. et al. Cell wall chemistry. In: ROWELL, R.M. (Ed.). **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005. p.121-138.

SAMPAIO, Marcos Vinicius Maciel et al. Síntese e caracterização de grafeno através da carbonização e ativação da biomassa de coco babaçu em forno micro-ondas adaptado. 2024.

SANTANA JÚNIOR, J. A. Efeito catalítico de zeólita ZSM-5 e ácido nióbio HY-340 na pirólise e hidropirólise de ligninas Kraft industriais. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química, 2018.

SANTOS, Ana Rita Veigas. Pastas de carvão ativado: mito ou realidade? Revisão narrativa. **PQDT-Global**, 2022.

SANTOS, Grazielle R. et al. Avanços Analíticos Baseados em Modelos de Calibração de Primeira Ordem e Espectroscopia Uv-Vis para Avaliação da Qualidade da Água: Uma Revisão-Parte 1. **Química Nova**, v. 45, p. 314-323, 2022.

SANTOS, Marizângela Ribeiros dos, *et al.* **Avaliação da eficiência dos carvões ativados produzidos a partir da casca da banana nanica (*Musa paradisíaca*) na biossorção de íons chumbo em água**. 2020.

SCHULTZ, Ruana dos Santos. Produção de biomassa a partir da casca de banana pacovan (*Musa ssp.*) para tratamento de água de poço tubular. 2023. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química Industrial) — Universidade Federal do Amazonas, Itacoatiara, 2023. Disponível em: <https://riu.ufam.edu.br/handle/prefix/7047>. Acesso em: 30 nov 2025.

SENA, R. F.; NUNES, M. L. Utilização de resíduos agroindustriais no processamento de rações para carcinicultura. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, vol. 7, n. 2, p. 94-102, 2006.

SILVA, Francisco A. et al. ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO UTILIZANDO CARVÃO ATIVADO PREPARADO A PARTIR DA CASCA DO TAMBORIL (*Enterolobium contortisiliquum*). **Química Nova**, v. 47, n. 3, p. e-20230106, 2024.

SILVA, J. M., et al. (2023). Thermochemical Processing of Lignocellulosic Biomass: Impacts on Functional Groups and Adsorption Properties. **Journal of Renewable Materials** .

SILVA, Jefferson Cristiano Sousa da et al. Sistemas bentonita sódica/quitosana obtidos por micro-ondas aplicados como adsorventes para corante aniônico. 2018.

SILVA, Luciano Alves da et al. Extração e pré-concentração de cádmio utilizando argila expandida como uma nova fase sólida em sistema DPX com detecção espectrofotométrica e eletroquímica. 2023.

SILVA, N. C. R. **Utilização da casca de banana como biossorvente para a adsorção de chumbo (II) em solução aquosa**. Trabalho de conclusão de curso—[s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

SILVA, S.; LUCIA, M. et al. Preparação e caracterização de carvão ativado produzido a partir de resíduos do beneficiamento do café. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 4, p. 1048-1052, 2008.

SILVA, Suely Alves da et al. Estudo termogravimétrico e calorimétrico da algaroba. **Química Nova**, v. 24, p. 460-464, 2001.

SOARES, Larissa Azevedo. Estudo da síntese de carvões ativados a partir do bagaço de cana-de-açúcar e análises estatísticas e termodinâmicas no processo de adsorção de corantes. 2023.

SOUSA, Mônica Silva de et al. Produção e caracterização de carvões ativados de caroços de açaí e sua aplicação no tratamento de água de manancial superficial. 2019.

SOUZA, Andreny dos Santos de. Avaliação da eficiência de remoção de matéria orgânica de um manancial de abastecimento utilizando diferentes tipos de carvão ativado em pó. 2023.

SUBRAMANIAN, V., Luo, C., Stephan, A. M., Nahm, K. S., Thomas, S., & Wei, B. (2007). Supercapacitors from activated carbon derived from banana fibers. **The Journal of Physical Chemistry C**, 111(20), 7527–7531.

SUSANTI, R. F. et al. Synthesis of high surface area activated carbon derived from cocoa pods husk by hydrothermal carbonization and chemical activation using zinc chloride as activating agent. **Materials Today: Proceedings**, v. 63, p. S55–S60, 2022.

THITAME, P., SHUKLA, S. Adsorptive removal of reactive dyes from aqueous solution using activated carbon synthesized from waste biomass materials. **International journal of Environmental Science and Technology**, 561–570. (2016).

UTSUMI, Alex et al. Monitoramento do Crescimento do Biofilme Aderido ao Carvão Ativado Granular por Meio de Termogravimetria. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 7, n. 3, 2010.

VASSILEV, Stanislav V. et al. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v. 89, n. 5, p. 913–933, 1 maio 2010.

VIGDOROWITSCH, Michael et al. Isoterma de Freundlich: Uma estrutura completa para o modelo de adsorção. **Ciências Aplicadas**, v. 11, n. 17, p. 8078, 2021.

WEBLEY, P.A.; SUN, Y. Preparation of activated carbons from corncob with large specific surface area by a variety of chemical activators and their application in gas storage. **Chemical Engineering Journal**, v.162, p. 883-892, 2010.

XIE, Y., ZHANG, G., PAN, B., & XING, B. (2020). Adsorption of sulfonamide antibiotics by porous materials: Implications for water purification. **Water Research**, 181, 115887.

YAMAMURA, A.P.G. Aplicação de Nanotecnologia no Meio Ambiente: Biossorvente Magnético na Remoção de Urânio. 2009, 117f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear –Materiais), Instituto De Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2009.

YANG, Haiping et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12–13, p. 1781–1788, ago. 2007