



UNILAB

**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL
DA LUSOFONIA AFRO-BRASILEIRA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
LICENCIATURA EM QUÍMICA**

ANNY KELLY HONÓRIO NASCIMENTO

**CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE RESÍDUO DA BANANEIRA PARA ADSORÇÃO
DE AZUL DE METILENO**

REDENÇÃO

2025

ANNY KELLY HONÓRIO NASCIMENTO

**CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE RESÍDUO DA BANANEIRA PARA ADSORÇÃO
DE AZUL DE METILENO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Licenciatura em Química, do Instituto de Ciências Exatas e da Natureza da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito parcial para a obtenção do Título de Licenciado em Química.

Orientador: Prof. Dr. Rômulo Batista Viera.

REDENÇÃO

2025

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Nascimento, Anny Kelly Honório.

N193c

Carvão ativado a partir de residuo da bananeira para adsorção de azul de metileno / Anny Kelly Honório Nascimento. - Redenção, 2025. 43f: il.

Monografia - Curso de Química, Instituto de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Rômulo Batista Vieira.

1. Contaminantes emergentes. 2. Cinética. 3. Adsorção. 4. Meio ambiente. I. Título

CE/UF/BSP

CDD 541.1

ANNY KELLY HONORIO NASCIMENTO

**CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE RESÍDUO DA BANANEIRA PARA ADSORÇÃO
DE AZUL DE METILENO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Licenciatura em Química, do Instituto de Ciências Exatas e da Natureza da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito parcial para a obtenção do Título de Licenciado em Química.

Aprovada em: 07/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rômulo Batista Vieira (Orientador)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

Prof. Dr. Francisco Wirley Paulino Ribeiro

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

Dra. Camila Peixoto do Valle

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

O presente trabalho é dedicado aos meus pais. Agradeço imensamente pelo amor, suporte incondicional e pelos muitos sacrifícios que fizeram ao longo da minha existência. Cada conquista nesta jornada foi possível graças à dedicação e presença de vocês. Agradeço por sempre acreditarem em mim e por estarem ao meu lado nos momentos mais desafiadores.

Dedico, de forma especial, ao meu pai. Embora tenha partido precocemente, em vida ele sempre buscou proporcionar a melhor educação para mim e para minha irmã. Seu maior sonho era nos ver formadas, e ele acreditava profundamente no poder transformador da educação. Assim, esta vitória é tanto de vocês quanto minha.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão, primeiramente a Deus, pela força e inspiração concedidas. A minha família, dedico um agradecimento especial pelo inestimável suporte e incentivo que me acompanharam ao longo de toda a jornada acadêmica. Aos amigos, que tornaram esta trajetória mais leve e significativa com seu companheirismo e presença, minha eterna gratidão.

Estendo meus agradecimentos a todos os professores e técnicos do Instituto de Ciências Exatas e da Natureza (ICEN) da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), cujo conhecimento e dedicação foram fundamentais para minha formação.

Um reconhecimento particular ao Professor Dr. Fred Denilson Barbosa da Silva e à equipe do grupo de pesquisa Produção Vegetal do Instituto de Desenvolvimento Rural (IDR). Sua colaboração foi crucial na coleta e transporte das amostras do pseudocaule da bananeira, um apoio que fez toda a diferença.

Por fim, e com a mais profunda estima, agradeço ao meu orientador, o Professor Dr. Rômulo Batista Vieira. Sua valiosa orientação, paciência e apoio foram pilares essenciais para a elaboração e êxito deste Trabalho de Conclusão de Curso. Sua contribuição foi indispensável para a concretização deste projeto.

“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.”

Antoine Lavoisier

RESUMO

O estudo propõe a utilização do pseudocaule da bananeira, resíduo agrícola abundante na região do Maciço de Baturité, para a produção de carvões ativados na tentativa de desenvolver um material adsorvente ecologicamente correto e economicamente viável para a remediação de águas e solos contaminados. A metodologia envolveu a carbonização do pseudocaule da bananeira em diferentes temperaturas (500-800 °C). Os carvões produzidos foram caracterizados físico-quimicamente e testados quanto à sua capacidade de adsorção utilizando o corante azul de metileno como contaminante modelo. Os resultados demonstraram que o pseudocaule da bananeira é uma matéria-prima promissora para a produção de carvão ativado, sendo que a amostra carbonizada a 700 °C alcançou 100% de remoção na faixa de concentração de 5 a 200 mg·L⁻¹ após 60 min de adsorção. O modelo cinético de pseudo-segunda ordem descreveu melhor as isotermas de adsorção para todos os materiais estudados. Por fim, o carvão ativado derivado do pseudocaule da bananeira representa uma solução sustentável e eficaz para remoção de contaminantes, oferecendo benefícios ambientais através da gestão de resíduos e vantagens econômicas ao gerar um produto de valor agregado a partir de um subproduto agrícola.

Palavras-chave: contaminantes emergentes; cinética de adsorção; equilíbrio de adsorção; meio ambiente.

ABSTRACT

The study proposes using the banana pseudostem, an abundant agricultural residue in the Maciço de Baturité region, for the production of activated carbons in an attempt to develop an environmentally friendly and economically viable adsorbent material for the remediation of contaminated water and soils. The methodology involved carbonizing the banana pseudostem at different temperatures (500-800 °C). The produced chars were physicochemically characterized and tested for their adsorption capacity using methylene blue dye as a model contaminant. The results demonstrated that the banana pseudostem is a promising raw material for producing activated carbon, with the sample carbonized at 700 °C achieving 100% removal in the concentration range from 5 to 200 mg L⁻¹ after 60 min of adsorption. The pseudo-second-order kinetic model best described the adsorption isotherms for all the materials studied. Finally, activated carbon derived from banana pseudostem represents a sustainable and effective solution for contaminant removal, offering environmental benefits through waste management and economic advantages by generating a value-added product from an agricultural byproduct.

Keywords: emerging contaminants; adsorption kinetic; equilibrium adsorption; environment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Distribuição da estrutura morfológica da bananeira.	18
Figura 2	- Estrutura do carvão ativado com poros que adsorvem moléculas pequenas e grandes.	19
Figura 3	- Modelo e estrutura da molécula do corante azul de metileno (AM).	23
Figura 4	- Resíduo do pseudocaule bananeira peneirado (80 mesh) após os processos de lavagem, secagem e processamento.	25
Figura 5	- Soluções de AM após a cinética de adsorção. (A) RB e (B) CB700	34
Figura 6	- Soluções de AM após a adsorção no equilíbrio. (A) RB e (B) CB700	37

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	- Espectroscopia de absorção no infravermelho (FTIR) para (a) RB, (b) CB500, (c) CB600, (d) CB700 e (e) CB800	31
Gráfico 2	- Difração de raios X para: (a) RB, (b) CB500, (c) CB600, (d) CB700 e (e) CB800	32
Gráfico 3	- Cinética de adsorção para RB e os carvões C500, C600 e C700	33
Gráfico 4	- Equilíbrio de adsorção para RB e os carvões CB500, CB600 e CB700	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Teor de umidade (U) e de cinzas (TC) para o resíduo da bananeira (RB)	29
Tabela 2	- Rendimento dos carvões ativados a partir do resíduo da bananeira (RB)	30
Tabela 3	- Parâmetros cinéticos dos modelos de PPO, PSO e Avrami	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	Azul de Metileno
CB	Carvão da Bananeira
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DRX	Difração de Raio X
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FTIR	Espectroscopia de Absorção no Infravermelho
PPO	Pseudo-Primeira Ordem
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PSO	Pseudo-Segunda Ordem
RB	Resíduo da Bananeira

Sumário

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVOS GERAIS	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 JUSTIFICATIVA	16
4 REVISÃO DE LITERATURA	17
4.1 PSEUDOCAULE DA BANANEIRA	17
4.2. CARVÃO ATIVADO	18
4.3 ADSORÇÃO	20
4.4 CORANTES E PIGMENTOS	22
4.5 CORANTE AZUL DE METILENO	23
5 PARTE EXPERIMENTAL	25
5.1 COLETA E PREPARAÇÃO DOS RESÍDUOS DE BANANEIRA	25
5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO RESÍDUO DE BANANEIRA	25
5.2.1 Teor de umidade e teor de cinzas	25
5.2.2 Difração de raios X (DRX)	26
5.2.3 Espectroscopia de absorção no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	26
5.3 SÍNTESE DOS CARVÕES ATIVADOS	27
5.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS CARVÕES ATIVADOS	27
5.5 ESCOLHA DOS CONTAMINANTES	27
5.6 CINÉTICA DE ADSORÇÃO	27
5.7 ADSORÇÃO NO EQUILÍBRIO	28
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
6.1 TEOR DE UMIDADE E TEOR DE CINZAS	29
6.2 RENDIMENTO DOS CARVÕES	29
6.3 ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO DO INFRAVERMELHO (FTIR)	31
6.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)	32
6.5 CINÉTICA DE ADSORÇÃO	33
6.6 EQUILÍBRIO DE ADSORÇÃO	36
7 CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

O setor agrícola é crucial para o desenvolvimento econômico e social, mas, ao mesmo tempo, é uma das atividades que mais geram resíduos. Os resíduos gerados no sistema de produção agrícola causam impactos imensuráveis ao meio ambiente (Cordeiro et al., 2020). Nesse contexto, o aproveitamento de resíduos agrícolas surge como uma tática promissora, que busca diminuir a quantidade de resíduos gerados, mas também se mostra uma técnica eficaz para remediar os contaminantes presentes no solo e na água.

O uso de resíduos agrícolas na remediação de contaminantes é uma abordagem inovadora que contribui para a recuperação de ecossistemas degradados (Noor; Khan, 2023). Esse conceito é baseado na utilização de resíduos provenientes da agricultura, como restos de culturas, cascas, talos, bagaços e pseudocaules, como o da bananeira, que auxiliam na neutralização ou redução da concentração de poluentes no solo e na água. O uso de resíduos agrícolas não só aprimora a qualidade do solo e da água, como também proporciona opções econômicas para os pequenos agricultores.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) orienta o gerenciamento dos resíduos sólidos, classificando e, logo após, encaminhando para o seu destino. Segundo Cordeiro, Cardoso e Mata (2020), a gestão dos resíduos torna o processo, tratamento e a disposição final dos resíduos agrícolas mais eficientes, reduzindo os impactos ambientais causados pelos descartes adequados.

O aproveitamento de resíduos agrícolas como matéria-prima para a fabricação de carvão ativado representa uma estratégia inovadora para a remoção de contaminantes em águas (Lima et al., 2020). Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, o carvão ativado tem se destacado na purificação da água devido à sua alta capacidade de adsorção e estrutura porosa.

Refletindo sobre esses pontos de vista, este estudo será conduzido para a síntese de um carvão ativado, obtido a partir do pseudocaule da bananeira, e que será aplicado no tratamento de águas contaminadas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Produzir um carvão ativado a partir do pseudocaule da bananeira para remediar contaminantes ambientais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar o processo de produção do carvão ativado a partir do pseudocaule da bananeira, incluindo as condições ideais de carbonização e ativação para melhorar as suas propriedades adsorventes;

Avaliar as propriedades físico-químicas do carvão ativado na tentativa de determinar se ele é eficiente na remoção de corantes;

Realizar testes para avaliar a eficiência do carvão ativado derivado do pseudocaule da bananeira na adsorção de diferentes tipos de contaminantes em soluções aquosas, medindo parâmetros como tempo de contato, concentração inicial e pH.

3 JUSTIFICATIVA

A crescente preocupação com os impactos ambientais causados pela atividade agrícola, essencial para o progresso econômico e social, enfatiza a urgência de soluções inovadoras para a gestão de resíduos. De acordo com Cordeiro et al. (2020), os resíduos agrícolas podem causar danos significativos ao meio ambiente se não forem tratados adequadamente.

Dessa forma, o trabalho de conclusão de curso proposto visa reaproveitar a um resíduo da bananeira, que se origina do pseudocaule da bananeira, com foco na produção de carvão ativado após o tratamento dessa biomassa, como uma estratégia eficaz para minimizar esses efeitos.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 PSEUDOCAULE DA BANANEIRA

A banana (*Musa spp.*) é um dos frutos mais populares e amplamente consumidos no Brasil, ocupando um lugar de destaque na alimentação diária da população. Segundo dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2021), o país é o quarto maior consumidor mundial de banana, evidenciando a relevância desse alimento na dieta dos brasileiros.

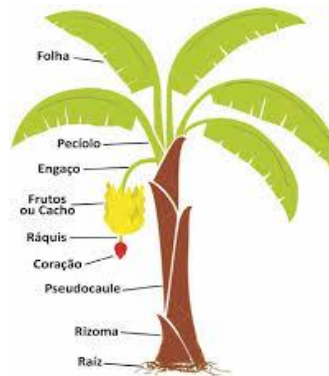
No âmbito internacional, o Brasil consolida-se como o segundo maior exportador de banana, posição que reflete não somente a excelência do produto nacional, mas também o esforço e a dedicação dos agricultores que atuam nesse setor. Conforme destacado por Souza et al. (2021), a qualidade e a segurança dos produtos agropecuários brasileiros são pilares fundamentais para a competitividade no comércio internacional, sendo resultado direto do comprometimento dos profissionais do setor

No cenário nacional, o estado do Ceará destaca-se como uma das principais regiões produtoras, com a bananicultura desempenhando um papel fundamental na economia local. Essa cultura representa uma fonte essencial de sustento para inúmeras famílias de agricultores, especialmente no Maciço de Baturité, onde municípios como Baturité, Pacoti, Palmácia e Mulungu se consolidaram como polos de produção (Move Ceará, 2022).

Do ponto de vista botânico, a bananeira apresenta notável capacidade de adaptação a diferentes condições climáticas, explicando sua ampla distribuição em regiões tropicais, subtropicais e serranas. Sua estrutura morfológica é composta por sistema radicular, rizoma, pseudocaule, folhas, frutos e caule, conforme ilustrado na Figura 1.

Este trabalho busca destacar o potencial do pseudocaule da bananeira, estrutura que, para muitos produtores locais, tem sido subutilizada, servindo como cobertura morta do solo. No entanto, suas aplicações vão muito além: podendo ser transformado em fibras, tecidos, substrato para plantas e diversos outros produtos, agregando valor e sustentabilidade à produção agrícola.

Figura 1 - Distribuição da estrutura morfológica da bananeira.



Fonte: NOMURA, 2020.

O pseudocaule da bananeira (*Musa spp.*) é formado por folhas sobrepostas que se unem na base, criando um cilindro oco. Essa estrutura garante o suporte necessário para o crescimento da planta, mas também atua como reserva de nutrientes essenciais para o seu desenvolvimento (COSTA, 2020). Além disso, como destacam Lima e Santos (2021), o aproveitamento adequado do pseudocaule contribui para a redução de resíduos e abre caminho para iniciativas sustentáveis, fortalecendo a economia das comunidades locais. Badanayak, Jose e Bose (2023) trazem uma revisão detalhada sobre as diferentes possibilidades de extração das fibras do pseudocaule da bananeira, suas caracterizações e modificações na superfície, uma vez que são atualmente utilizados para obter celulose nano e microcristalina, carvão ativado, compósitos verdes e insumos para indústria têxtil.

4.2. CARVÃO ATIVADO

O carvão ativado é um material carbonáceo poroso, amplamente reconhecido por sua estrutura rica em carbono, obtido por meio de processos controlados de carbonização e ativação de matérias-primas orgânicas. Historicamente, sua relevância é notável, com aplicações que remontam a civilizações antigas, mas o desenvolvimento moderno consolidou-o como um adsorvente essencial e versátil (Pereira; Costa, 2018).

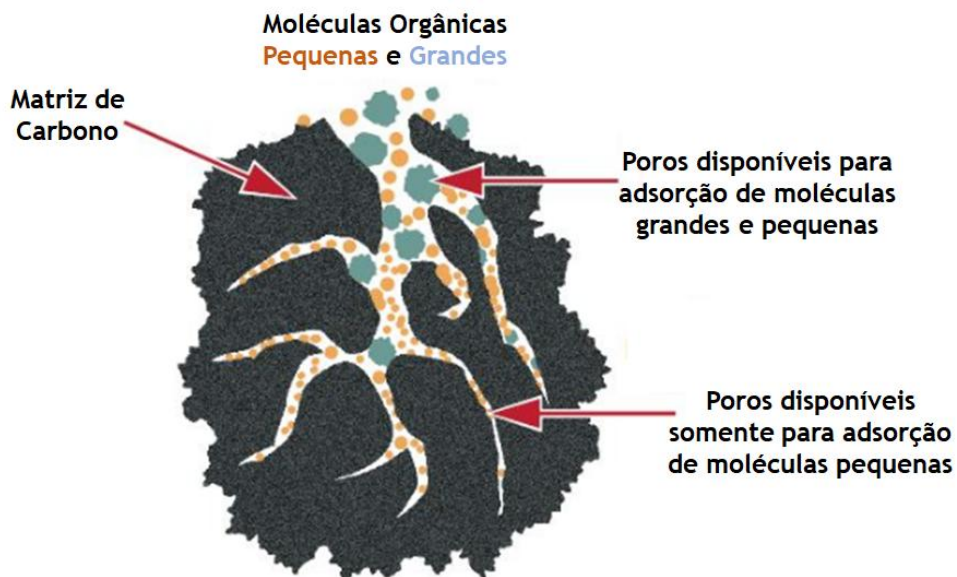
A produção do carvão ativado tradicionalmente utiliza materiais como madeira, cascas de coco e turfa. Contudo, pesquisas recentes direcionam o foco para o aproveitamento de resíduos agrícolas como matéria-prima. Conforme salientam Silva e Oliveira (2020), essa abordagem agrega valor a subprodutos da agricultura, mas também apresenta vantagens ambientais e econômicas significativas. Graças à sua

eficácia na remoção de contaminantes, o carvão ativado é indispensável em processos de purificação de água e ar (Martins et al., 2021), contribuindo para a saúde pública e a qualidade ambiental.

A principal função do carvão ativado reside em sua notável capacidade de adsorção, um fenômeno em que ele captura e retém moléculas, íons ou átomos em sua vasta superfície interna. Essa característica o estabelece como uma solução valiosa e multifuncional para enfrentar complexos desafios ambientais e tecnológicos.

Entre as características mais distintivas do carvão ativado, destaca-se sua elevada porosidade, que proporciona uma extensa área superficial interna. Essa propriedade é fundamental para a retenção eficiente de uma diversidade de substâncias, incluindo moléculas orgânicas, metais pesados e gases. A eficácia de sua capacidade de adsorção é impulsionada por interações tanto físicas (forças de van der Waals) quanto químicas (ligações covalentes), o que lhe confere um papel crucial na remoção abrangente de contaminantes. Como bem observa Nunes e Guerreiro (2011), a versatilidade do carvão ativado reside precisamente na sua capacidade de interagir seletivamente com diferentes poluentes, tornando-o uma ferramenta indispensável no tratamento de efluentes e na purificação de gases. A Figura 2 apresenta a estrutura de um carvão ativado.

Figura 2 - Estrutura do carvão ativado com poros que adsorvem moléculas pequenas e grandes.



Fonte: Adaptado de Hyox (2025).

Al-Sareji e os colaboradores obtiveram carvões ativados a partir das cascas da

banana. Os autores realizaram um estudo da temperatura de pirólise (350, 450 e 550 °C), e realizaram a adsorção dos medicamentos amoxicilina e carbamazepina, obtendo uma remoção de 91,63 e 90,29%, respectivamente em água Milli-Q, e 82,34 e 81,51%, respectivamente, em águas residuais. Em outro estudo, Rahman et al. 2022, obtiveram bioadsorventes a partir do pseudocaule da bananeira e realizaram a adsorção do azul de metileno (AM). O bioadsorvente teve uma capacidade de adsorção de 42,28 mg·g⁻¹, e uma remoção que variou entre 33,75-50,00%, a partir da dosagem de adsorvente entre 0,25-4,00 g.

Nesse sentido, o carvão ativado é mais do que um simples material; é uma ferramenta sofisticada e indispensável cujas propriedades únicas o posicionam como um recurso relevante para a sustentabilidade ambiental e o avanço tecnológico em diversas indústrias.

4.3 ADSORÇÃO

A adsorção é um processo físico-químico no qual moléculas de um fluido, denominadas adsorvato, aderem à superfície de um sólido, conhecido como adsorvente. Esse fenômeno é amplamente utilizado em tecnologias de tratamento de efluentes industriais, especialmente quando o adsorvente é carvão ativado, devido à sua elevada capacidade de concentrar poluentes na sua superfície (Doğan et al., 2007). Trata-se de um processo de transferência de massa, em que sólidos porosos, como o carvão ativado, retém seletivamente substâncias presentes em soluções aquosas ou gasosas (Roubíčková et al., 2020).

A natureza das interações envolvidas no processo adsorvativo permite classificá-lo em duas categorias principais distintas por sua intensidade e pelo tipo de interação que se estabelece: a adsorção física e a adsorção química. Na adsorção física ou fisissorção, a interação entre o adsorvato e o adsorvente ocorre por meio de forças fracas, como as forças de van der Waals, sem a formação de novas ligações químicas (Langmuir, 1918). Essas interações têm caráter reversível e são de curta duração, assemelhando-se ao “acomodamento” delicado das moléculas na superfície adsorvida. A fisissorção é comum em processos de purificação de gases e líquidos, onde a remoção do contaminante pode ser facilmente revertida por meio de alterações de pressão ou temperatura (Brunauer et al., 1938). Diferentemente, a adsorção química ou quimissorção, envolve transferência ou compartilhamento de elétrons entre o adsorvato e o adsorvente, resultando em uma nova ligação química

(Eischenbroich, 2006). Esse processo é mais intenso e frequentemente irreversível em condições ambientais, conferindo maior estabilidade ao complexo adsorvido. A quimissorção é essencial em processos catalíticos e na remoção de contaminantes persistentes, como metais pesados e compostos orgânicos recalcitrantes (Weber; Morris, 1963).

A separação por adsorção opera por intermédio de três mecanismos: estérico, de equilíbrio e cinético. Cada método utiliza propriedades exclusivas para conseguir a separação seletiva de moléculas. O princípio que embasa o mecanismo estérico assemelha-se ao de uma peneira molecular. Os materiais adsorventes apresentam poros com dimensões exatas, que atuam como portais exclusivos, permitindo a entrada de moléculas de uma dimensão específica, enquanto restringem fisicamente as de maior dimensão. Isso viabiliza uma discriminação altamente criteriosa, fundamentada exclusivamente nas dimensões e na conformação molecular. Como afirma Rouquerol et al. (1999): “adsorção em peneiras moleculares é um fenômeno onde a seletividade é ditada pelas dimensões relativas das moléculas e dos poros do adsorvente”.

Os mecanismos de equilíbrio aproveitam a afinidade inerente entre os materiais adsorventes e as espécies de adsorvato específicas. A separação é promovida pelas distintas capacidades de diversos sólidos em acomodar preferencialmente certos compostos em detrimento de outros.

Isso implica que, se existirem diversas substâncias na mistura, o adsorvente se vincula somente àquela que possui uma atração química ou física mais intensa, resultando na sua separação da mesma. Ruthven (1984) destaca que “separação por adsorção em equilíbrio depende das diferenças nas isotermas de adsorção dos componentes da mistura, ou seja, na sua afinidade diferencial pelo adsorvente”.

O mecanismo cinético, por outro lado, distingue as moléculas com base em suas diferentes taxas de difusão nos poros do adsorvente. Embora as moléculas apresentem dimensões semelhantes ou afinidades equivalentes em relação ao adsorvente, elas conseguem adentrar ou se mover pela estrutura dos poros a velocidades distintas.

Essa divergência na difusividade torna mais simples a separação, uma vez que as moléculas que se difundem com maior rapidez conseguem ser adsorvidas ou dessorvidas mais rapidamente do que aquelas que apresentam taxas de difusão mais lentas. De acordo com Do (1998), seletividade cinética surge quando as taxas de

difusão dos componentes na fase adsorvida diferem significativamente, mesmo que suas afinidades de equilíbrio sejam semelhantes.

Os três processos podem operar de maneira independente ou em conjunto, definindo as bases fundamentais para o desenvolvimento e melhoria de tecnologias de separação baseada em adsorção, permitindo um controle preciso sobre o isolamento molecular em várias áreas.

4.4 CORANTES E PIGMENTOS

A adição de corantes e pigmentos é de suma importância para conferir cor e aprimorar o apelo estético de produtos em diversas cadeias produtivas. No setor têxtil, por exemplo, esses elementos são indispensáveis para a fabricação de fibras e tecidos com as características visuais desejadas. No entanto, é essencial reconhecer que, mesmo sendo relevante, o uso desses corantes e pigmentos constitui um significativo desafio ambiental, demandando nossa atenção e responsabilidade. O uso excessivo desses compostos leva a uma produção considerável de poluentes, causando efeitos prejudiciais ao meio ambiente.

Essas substâncias, que podem ser solúveis em água ou em solventes orgânicos, possuem a capacidade de penetrar nas fibras, conferindo flexibilidade no processo de coloração. Contudo, o descarte inadequado desses efluentes em corpos d'água tem gerado poluição aquática e contribuído para o aumento da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). Conforme pontuam Nigam et al. (2001), os efluentes de indústrias têxteis são considerados um dos mais poluentes devido à sua alta carga orgânica, cor e toxicidade. Essa realidade sublinha a urgência de abordagens mais eficazes para o tratamento desses resíduos.

Os resíduos têxteis, especialmente, costumam apresentar uma elevada carga orgânica. A decomposição dessa matéria por microrganismos consome o oxigênio dissolvido na água, resultando em uma baixa concentração de oxigênio fatal para a vida aquática. Além disso, muitos corantes podem conter substâncias tóxicas ou metais pesados, agravando os danos ambientais. Crini (2006) reforça que “a presença de corantes em corpos d'água, mesmo em concentrações muito baixas, é altamente visível e afeta a transparência da água, a atividade fotossintética e pode ser tóxica para a biota aquática”. Isso demonstra o impacto multifacetado e a seriedade da poluição por corantes.

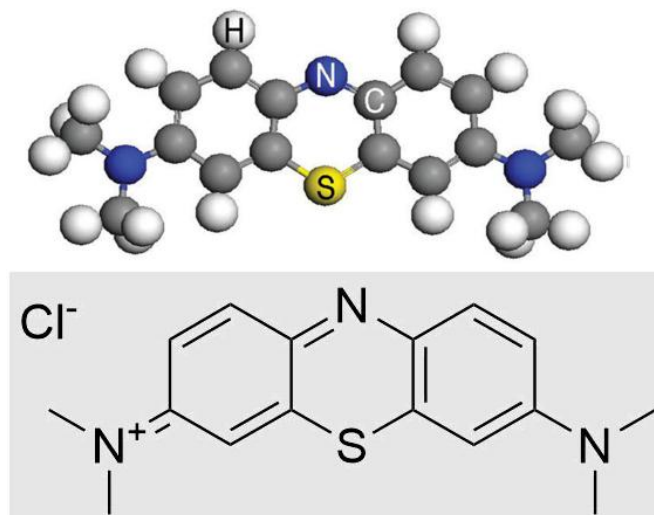
A indústria têxtil é uma das maiores consumidoras de corantes e pigmentos e

enfrenta dificuldades significativas no tratamento de seus efluentes. Uma das características intrínsecas de corantes e pigmentos é a sua baixa biodegradabilidade. Conseqüentemente, tratamentos convencionais como a sedimentação e a coagulação não se mostram totalmente eficientes na remoção dessas substâncias. Robinson et al. (2001) destacam que a remoção de corantes de efluentes têxteis continua sendo um desafio significativo devido à complexidade de suas estruturas químicas e sua resistência à degradação biológica. Torna-se, assim, imperativo o desenvolvimento e a implementação de tecnologias inovadoras capazes de atender aos rigorosos pré requisitos ambientais e promover uma indústria mais sustentável.

4.5 CORANTE AZUL DE METILENO

O azul de metileno (AM), $C_{16}H_{18}ClN_3S$, MM: 319, 85 $g \cdot mol^{-1}$, é um pó sólido, inodoro, verde escuro à temperatura ambiente e produz uma solução azul quando dissolvida em água. Além disso, tem comprimento da molecular de 13,82 Å ou 14,47 Å, e largura de aproximadamente 9,5 Å. Possui um pK_a de 3,8, sendo solúvel em metanol, 2-propanol, água, etanol, acetona e acetato de etila. Sua solubilidade é de 43,6 $g \cdot L^{-1}$ a 25 °C, com um ponto de fusão na faixa de 100-110 °C. A Figura 3 apresenta a estrutura do AM.

Figura 3 - Modelo e estrutura da molécula do corante azul de metileno (AM).



Fonte: Adaptado de Khan et al. (2022).

Sua estrutura aromática complexa, é amplamente utilizado no tingimento de materiais como algodão, madeira e seda. Sua relevância deve-se não somente à sua

cor azul intensa, mas também à sua elevada capacidade de adesão a fibras têxteis (GUPTA et al., 2006). Além disso, o AM é frequentemente empregado como substância modelo em estudos de adsorção com carvão ativado, dada sua estrutura carregada e complexa, que representa um desafio significativo para processos de remoção de poluentes (Crini, 2006).

Além disso, é amplamente utilizado como corante de referência em estudos de adsorção e manipulação devido às suas propriedades bem estabelecidas e à alta solubilidade em água. Sendo um corante têxtil catiônico, atua como composto modelo em investigações envolvendo processos de adsorção/desorção líquido/sólido e degradação fotocatalítica, permitindo estabelecer condições ótimas de remoção e compreender melhor os mecanismos de adsorção. (Bollinger et al., 2025).

Nesse contexto, destaca-se a proposta deste trabalho: a utilização de carvão ativado produzido a partir do pseudocaule da bananeira como adsorvente. Essa abordagem não somente valoriza resíduos da indústria agrícola, como também oferece uma alternativa sustentável e eficiente para o tratamento de águas contaminadas por corantes. Estudos recentes demonstram que biomassa lignocelulósica, como a do pseudocaule da bananeira, apresenta grande potencial para a produção de carvões ativados de baixo custo e alta eficiência (Yakout; El-Deen, 2016).

Ao investigar as propriedades adsorventes desse material, este trabalho busca fornecer informações valiosas para o desenvolvimento de tecnologias de tratamento de águas e efluentes industriais. Como destacado por Foo e Hameed (2010), a compreensão dos mecanismos de adsorção é essencial para a otimização de processos de remediação ambiental.

Além disso, essa pesquisa visa não somente solucionar problemas de poluição por corantes, mas também contribuir para a destinação adequada de resíduos agrícolas gerados no Maciço de Baturité. Transformando-os em uma fonte de renda para produtores locais e, simultaneamente, promovendo a preservação do meio ambiente, especialmente do solo e dos lençóis freáticos, sendo frequentemente impactados por descargas inadequadas de efluentes (Almeida et al., 2019).

5 PARTE EXPERIMENTAL

5.1 COLETA E PREPARAÇÃO DOS RESÍDUOS DE BANANEIRA

O resíduo do pseudocaule bananeira foi obtido da Fazenda Experimental Piroás, na cidade de Redenção/CE, pertencente à UNILAB. O material foi lavado três vezes com água destilada, descascado e cortado em pedaços de 2 cm X 2 cm, seguido de secagem em estufa de circulação de ar 65 °C por 24 h. A amostra seca foi processada utilizando um liquidificador doméstico (Mondial, L-550), seguido de peneiramento (Bertel) utilizando uma granulometria de 80 mesh/0,177 mm. O material final foi designado como RB, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Resíduo do pseudocaule bananeira peneirado (80 mesh) após os processos de lavagem, secagem e processamento.



Fonte: A autora (2025).

5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO RESÍDUO DE BANANEIRA

5.2.1 Teor de umidade e teor de cinzas

A determinação do teor de umidade do pseudocaule da bananeira foi realizada por secagem direta em estufa a 105 °C, seguindo o método proposto pelo Instituto Adolfo Lutz (2008). Inicialmente, para garantir a ausência de umidade, um cadinho de porcelana com tampa foi calcinado em mufla a 105 °C por 1 h. Após resfriamento em dessecador, o cadinho foi pesado em balança analítica. Posteriormente, uma amostra de aproximadamente 2,0 g de biomassa foi introduzida no cadinho e desidratada em estufa a 105 °C por 3 h. Completado o período de secagem, a amostra foi resfriada em dessecador, e ciclos de aquecimento e pesagem foram repetidos até a massa atingir um valor final constante, utilizado para o cálculo do teor de umidade (U), conforme a equação 1:

$$U(\%) = \frac{(MCAI - MCAF)}{(MCAI - MC)} \times 100 \quad (1)$$

em que: U (%): teor de umidade (%); MC: massa do cadinho em gramas (g); MCAI: massa do cadinho com a amostra inicial em gramas (g); MCAF: massa do cadinho com a amostra final, em gramas (g).

As amostras do pseudocaule da bananeira previamente secas a 105 °C foram transferidas para uma mufla pré-aquecida a 550 °C. Para a obtenção das cinzas, os cadinhos foram inseridos destampados, permitindo o processo de pirólise. As amostras foram mantidas nessa temperatura por 3 h, seguindo o procedimento descrito pelo Instituto Adolfo Lutz (2008). Após esse período, as amostras foram resfriadas e pesadas para determinar a quantidade de resíduo remanescente da mesma forma que o teor de umidade. Com base nas massas obtidas, o teor de cinzas foi calculado conforme a equação 2:

$$\text{Teor de Cinzas (TC) (\%)} = \frac{RM}{RI} \times 100 \quad (2)$$

em que: teor de cinzas (%): teor de cinzas da amostra, em porcentagem (%); RM: massa residual da calcinação, em gramas (g); RI: massa inicial da biomassa, em gramas (g).

5.2.2 Difração de raios X (DRX)

A difração de raios X (DRX) foi realizada em difratômetro Rigaku Miniflex, com fonte de radiação CuK α de $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ (40 kV, 15 mA). Utilizou-se uma varredura de 10 a 80° 2 θ , com passo de 0,02°, velocidade de varredura de 20°/min e temperatura ambiente.

5.2.3 Espectroscopia de absorção no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia de absorção no infravermelho (FTIR) foi realizada macerando os bioadsorventes juntamente com KBr submetidos a uma pressão de 80 kN numa prensa hidráulica. Os espectros de transmitância foram obtidos no equipamento Shimadzu modelo IR Tracer-100, na faixa de 400 a 4000 cm⁻¹, 64 varreduras e resolução de 4,0 cm⁻¹.

5.3 SÍNTESE DOS CARVÕES ATIVADOS

Para a síntese dos carvões ativados, aproximadamente 5,0 g foram colocados em um cadinho de porcelana com tampa, para minimizar a exposição ao oxigênio e levado para um forno mufla (Zezimaq) para o processo de pirólise, nas temperaturas de 500 °C, 600 °C, 700 °C e 800 °C, com taxa e aquecimento de 10 °C·min⁻¹ durante 1 h. Após cada ciclo de pirólise, o carvão resultante foi lavado com uma solução de HCl 0,5 mol·L⁻¹ para remoção de bio-óleo e com água destilada quente (60 °C) até pH neutro, seguido de secagem em estufa (105 °C por 24 h). O material final foi designado de CB500, CB600, CB700 e CB800, para as temperaturas de pirólise, 500 °C, 600 °C, 700 °C e 800 °C respectivamente, sendo armazenados em potes de vidro devidamente identificados.

5.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS CARVÕES ATIVADOS

Os carvões ativados foram caracterizados mediante a difração de raios X (DRX) e espectroscopia de absorção no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), conforme descrição já mencionada no item 5.2.2 e 5.2.3.

5.5 ESCOLHA DOS CONTAMINANTES

A partir da revisão de literatura, o corante azul de metileno (AM) foi escolhido para os ensaios de adsorção, devido às suas propriedades adsorptivas que auxiliam nos testes realizados com o auxílio da técnica de espectroscopia de absorção no ultravioleta e visível (UV-VIS). Além disso, Nunes e Guerreiro, (2011), desenvolveram um método denominado Número de Azul de Metileno, considerando dados de diversas amostras de carvão ativado preparadas a partir de diferentes precursores e dados extraído da literatura. Nesse sentido, o AM atua como uma molécula sonda para avaliar a eficiência do carvão ativado sintetizado.

5.6 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

Os ensaios cinéticos de adsorção foram realizados a fim de avaliar o tempo em que os adsorventes atingem o equilíbrio de adsorção. Aproximadamente 50 mg dos carvões foram dispersos em 50 mL da solução de azul de metileno, AM (50 mg·L⁻¹), sob agitação a 250 rpm e temperatura ambiente. As soluções foram coletadas durante os intervalos de 0, 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120, 150 e 180 min, filtradas e medidas em espectrofotômetro UV-VIS, NOVA Instruments 1600UV, com $\lambda = 665$ nm, utilizando

uma curva de calibração ($R^2 = 0,9984$) do azul de metileno ($1-10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). A concentração de azul de metileno adsorvida por grama de adsorvente foram obtidas a partir da equação 3 a seguir:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (3)$$

em que: q_e : capacidade de adsorção do carvão ativado, massa do adsorvente por massa de contaminante ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$); C_0 e C_e : concentrações inicial e final dos contaminantes em equilíbrio na fase aquosa ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); V : volume da solução do contaminante (L); m : massa do adsorvente (carvão) utilizado (g).

As isotermas obtidas foram ajustadas conforme os modelos de pseudo-primeira (PFO), pseudo-segunda ordem (PSO) e Avrami (Oliveira; Silva; Viana, 2013), como mostrado nas equações 4, 5 e 6, respectivamente:

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (4)$$

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2}{1 + k_2 q_e t} \quad (5)$$

$$q_t = q_e(1 - e^{-(k_{AV} t)^{n_{AV}}}) \quad (6)$$

em que: q_t representa a quantidade de substância adsorvida por unidade de massa do adsorvente em um determinado tempo; q_e representa a quantidade adsorvida na condição de equilíbrio, ou seja, quando a adsorção atinge seu máximo; k_1 , k_2 e k_{AV} são as constantes cinéticas de PFO, PSO e Avrami; n_{AV} é o coeficiente de Avrami; t é tempo.

5.7 ADSORÇÃO NO EQUILÍBRIO

O estudo da concentração no equilíbrio será realizado pela adição de 50 mg do adsorvente em 50 mL de solução do contaminante, com concentrações iniciais de 5, 10, 25, 50, 100 e 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, agitação a 250 rpm e temperatura ambiente durante o tempo equilíbrio obtido no item 5.6. Após decorrido o tempo, as soluções foram filtradas e medidas em espectrofotômetro UV-VIS, NOVA Instruments 1600UV, com $\lambda = 665 \text{ nm}$, utilizando uma curva de calibração ($R^2 = 0,9984$) do azul de metileno ($1-10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). A concentração de azul de metileno adsorvida por grama de adsorvente após o equilíbrio foi obtida a partir da equação 3.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 TEOR DE UMIDADE E TEOR DE CINZAS

Com base na análise realizada, o teor de umidade da amostra RB foi de aproximadamente 10,60%. Valer destacar que esse valor é da umidade residual após as etapas de secagem prévia realizar na coleta e preparação do resíduo. Esse valor corresponde à massa de matéria volátil perdida durante o processo de desidratação, o que está conforme as características naturais do pseudocaule da bananeira, conhecido por sua elevada capacidade de retenção de água. Nesse contexto, o resultado obtido demonstra-se favorável ao processo de carbonização, uma vez que teores excessivos de umidade podem comprometer a qualidade do produto final. Como o material foi previamente seco e processado, esse teor é o resíduo de água que permanece na biomassa, uma vez que esse valor pode chegar até 96,3% (Ramdhonee; Jeetah, 2017).

O teor de cinzas da biomassa foi de 2,65%, na qual pode conter compostos inorgânicos como SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , dentre outros. À medida que a rede de carvão é formada pela etapa de pirólise, a presença dessas cinzas pode afetar a interação entre a superfície de carbono e as moléculas do adsorvente, exercendo uma influência considerável nos processos de adsorção. Ramdhonee e Jeetah (2017) obtiveram um teor de cinzas para o pseudocaule da bananeira de 9,5%. Um teor de cinzas reduzido indica que o resíduo tem um potencial promissor como precursor na produção de carvão ativado. A Tabela 1 apresenta os valores para o teor de umidade e teor de cinzas.

Tabela 1 - Teor de umidade (U) e de cinzas (TC) para o resíduo da bananeira (RB).

Amostra	m_1^a / g	m_2^b / g	m_3^c / g	^dU / %	^eTC / %
RB	2,0017g	1,7887g	0,0267g	10,60%	2,65%

^a massa inicial; ^b massa final (105 °C); ^c massa final (550 °C); ^d Teor de Umidade; ^e Teor de Cinzas.

6.2 RENDIMENTO DOS CARVÕES

Os carvões ativados foram preparados através da carbonização em forno mufla nas temperaturas de 500, 600, 700 e 800 °C. Os dados evidenciam que a temperatura de carbonização exerce uma influência preponderante sobre o rendimento final do carvão. A amostra CB500 apresentou um rendimento de 16,91%, sugerindo que para

o resíduo da bananeira em questão, a temperatura de 500°C é a mais eficiente para otimizar a conversão de biomassa em produto sólido, minimizando a perda de massa por volatilização. No entanto, nada se pode afirmar sobre o seu desempenho durante o processo de adsorção.

Com o aumento da temperatura para 600 °C (CB600), verificou-se uma conversão mais baixa de 10,57%. Tal redução é consistente com o princípio de que temperaturas mais elevadas promovem uma maior degradação da matéria orgânica, resultando na formação de uma maior quantidade de bio-óleo, é uma mistura complexa de compostos orgânicos que pode entupir os poros/canais do carvão formado. Isso resultará em uma menor proporção de resíduo sólido. Para o carvão CB700, o rendimento foi de 12,97%, valor acima do CB600. No entanto, a massa inicial colocada no forno foi bem maior. Essa situação pode ter afetado essa inversão de valores. Por fim, a amostra CB800, apresentou o menor rendimento entre todas as temperaturas avaliadas, alcançando 9,60%.

Este dado reforça a premissa de que temperaturas muito elevadas levam à máxima volatilização dos constituintes da biomassa, culminando em uma menor produção de carvão sólido, interferindo até nas análises de cinética de adsorção e no equilíbrio de adsorção. A elevação da temperatura, de forma geral, resulta em uma diminuição do rendimento de carvão, embora um comportamento peculiar tenha sido observado a 700 °C, demandando investigações adicionais para elucidação completa dos mecanismos envolvidos. Estes resultados são fundamentais para a otimização de processos de pirólise e carbonização voltados à valorização energética ou material do resíduo da bananeira. A Tabela 2 apresenta o rendimento dos carvões ativados obtidos a partir do resíduo da bananeira (RB).

Tabela 2 - Rendimento dos carvões ativados a partir do resíduo da bananeira (RB).

Amostra	m₁^a / g	m₂ / g	Rendimento / %
CB500	13,524	2,287	16,91
CB600	17,166	1,814	10,57
CB700	30,275	3,928	12,97
CB800	30,318	2,192	9,60

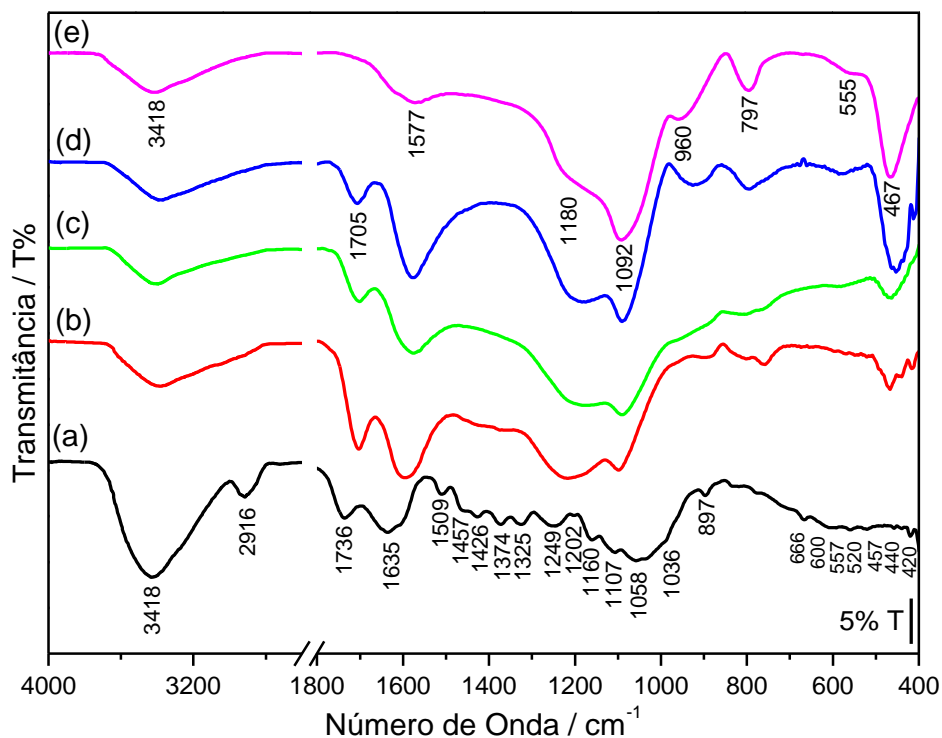
^a Massa total contida em mais de um cadinho.

Os carvões ativados são preparativos a partir tanto de tratamento químico, quanto físico. No nosso estudo, não houve tratamento química com os carvões ativados. Alguns trabalhos na literatura, utilizando agentes químicos com hidróxido de o ácido fosfórico – H_3PO_4 , obtiveram rendimentos maiores, variando entre 30-80%, dependendo a biomassa de partida. (Neme; Gonfa; Masi, 2022).

6.3 ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO DO INFRAVERMELHO (FTIR)

A espectroscopia de absorção no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi utilizada para identificar como os grupos funcionais presentes na biomassa mudariam a medida em que ocorria a síntese dos carvões ativados em diferentes temperaturas. A Gráfico 1 apresenta os resultados de FTIR.

Gráfico 1 - Espectroscopia de absorção no infravermelho (FTIR) para (a) RB, (b) CB500, (c) CB600, (d) CB700 e (e) CB800.



O resíduo do pseudocaule da bananeira (RB), representado pelo símbolo (a), apresentou várias uma série de bandas de absorção, características dos vários grupos funcionais orgânicos presentes na estrutura complexa da biomassa lignocelulósica. Foram observadas as bandas largas de estiramento O-H ($\sim 3400\text{ cm}^{-1}$), estiramentos de C-H alifáticos ($\sim 2900\text{ cm}^{-1}$) e estiramentos de C=O ($\sim 1700\text{ cm}^{-1}$).

Em comparação com a biomassa RB, as amostras de carvões ativos mostram uma notável redução da presença e intensidade de diversas bandas. Houve uma drástica diminuição ou eliminação dos picos atribuídos a estiramentos de C=O ($\sim 1700\text{ cm}^{-1}$) e C-H alifáticos ($\sim 2900\text{ cm}^{-1}$), evidenciando a remoção ou modificação dessas funcionalidades durante o processo de ativação. A banda de estiramento O-H ($\sim 3400\text{ cm}^{-1}$) persistiu em todos os carvões, indicando a manutenção de grupos hidroxila ou água adsorvida em menor quantidade quando comparado com RB. Além disso, para o CB800, que apresentou mudanças mais notáveis, temos a presença das bandas em 3418 cm^{-1} (estiramento O-H), 1577 cm^{-1} (deformação CH_2), 1180 cm^{-1} (estiramento C-O), 1092 cm^{-1} (estiramento C-O-C), 960 cm^{-1} (deformação CH_2 em aromáticos), 797 cm^{-1} (deformação CH_2 em aromáticos na superfície de carvões ativados). Em, há a presença da banda em 555 cm^{-1} (deformação Si-O) e 467 cm^{-1} (deformação Si-O-Si), que não apareciam em RB. À medida que o carvão ativado é formado, as vibrações características da parte inorgânica (cinzas) ficam mais visíveis, como pode ser visto em CB800. Esses resultados indicam que a efetividade na transformação da biomassa em materiais carbonosos, em especial para a amostra CB800.

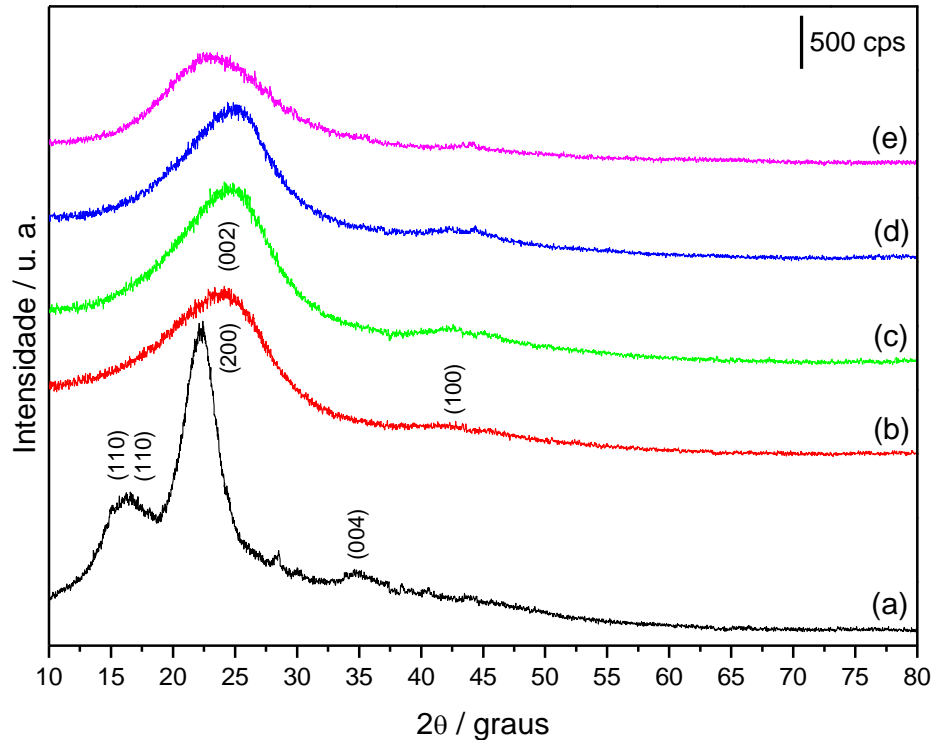
6.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

A difração de raios X é uma técnica poderosa para identificar a organização estrutural a longas distâncias. Materiais amorfos, ao contrário dos cristalinos, carecem de ordem a longo alcance em sua estrutura atômica. Conseqüentemente, seus difratogramas são caracterizados por picos largos e difusos, em vez dos picos nítidos observados em sólidos cristalinos, refletindo a ausência de planos de difração bem definidos. O Gráfico 2 (a-e) apresenta os resultados de difração de raios X (DRX) para diferentes os materiais RB, CB500, CB600, CB700, CB800.

O material RB apresenta uma estrutura cristalina mais definida em comparação com as outras amostras. Esse perfil é semelhante ao relatados para outras fibras lignocelulósicas exibindo principalmente a estrutura Celulose I, a estrutura comum observada em plantas, que apresentam a família de planos ($1\bar{1}0$), (110), (200), e (004). (GONG et al., 2017). À medida que a temperatura de carbonização das amostras (de $500\text{ }^\circ\text{C}$ até $800\text{ }^\circ\text{C}$) aumenta, sua estrutura original sofre degradação, progressivamente. A largura e a ausência de picos nítidos para os carvões (CB500 a CB800) indicam que esses materiais são principalmente amorfos ou nanocristalinos, O plano (002) e (001), presentes nos difratogramas de todos os carvões, são

característicos de estruturas carbonáceas. (SRENSCEK-NAZZAL et al., 2024).

Gráfico 2 - Difração de raios X para: (a) RB, (b) CB500, (c) CB600, (d) CB700 e (e) CB800.

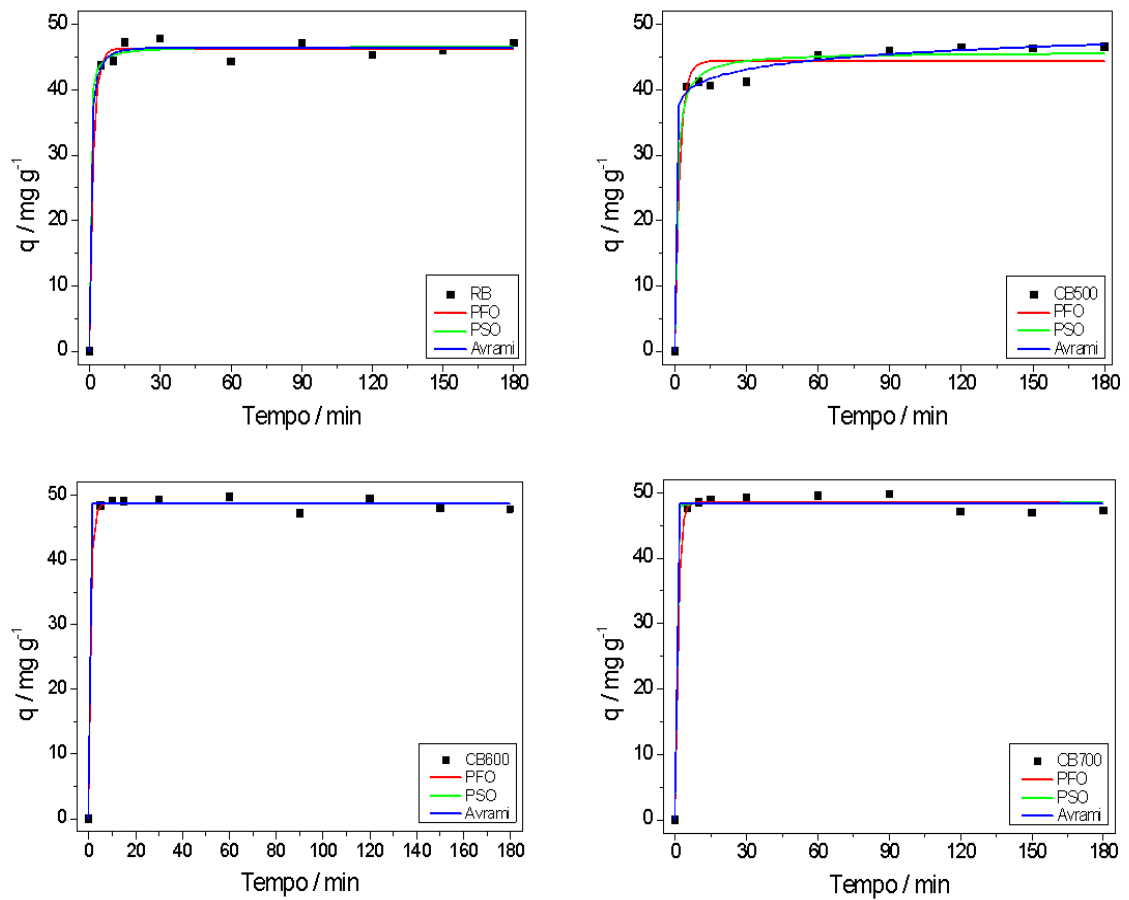


6.5 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

Após as caracterizações dos carvões ativados, realizou os ensaios de adsorção, a fim de entender o comportamento tanto do material de partida (RB) quando para os carvões (CB500, CB600 e CB700). Por conta do baixo rendimento, não foi possível realizar os ensaios com a amostra CB800. Inicialmente, realizou um estudo cinético de adsorção de 0 até 180 min para o azul de metileno (AM) na concentração de $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, e as isotermas são apresentadas no Gráfico 3.

Verifica-se que os adsorventes exibiram uma fase inicial rápida de adsorção já nos primeiros 5 min, até por volta de 30 min, seguida por uma desaceleração progressiva até a estabilização em um patamar de equilíbrio por volta de 60 min, que sugere uma taxa de adsorção inicial, fator crítico para aplicações que demandam remoção eficiente em curto intervalo de tempo. Os valores de capacidade de adsorção (q) após 60 min foi de 44,32, 45,31, 49,70 e 49,5 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, para RB, CB500, CB600 e CB700, respectivamente. Somente o CB700 conseguiu remover 100% dos $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ do AM em 180 min.

Gráfico 3 - Cinética de adsorção para RB e os carvões C500, C600 e C700.



A Figura 5 apresenta um comparativo entre a diminuição da intensidade da cor da solução do AM para RB (A) e CB700 (B), sendo um indicativo da remoção do corante. É possível notar que ao longo dos 180 min para CB700 que as soluções se encontram incolores.

Figura 5 - Soluções de AM após a cinética de adsorção. (A) RB e (B) CB700.



Fonte: A autora (2025).

A fim de compreender qual fenômeno está ocorrendo no processo de adsorção, as isotermas foram modeladas através dos modelos cinéticos de pseudo-primeira (PFO), pseudo-segunda ordem (PSO), e Avrami. O modelo de PFO considera que a taxa de adsorção é proporcional ao número de sítios vazios no adsorvente; PSO estabelece que a taxa de adsorção depende da interação entre o soluto e o adsorvente; Avrami considera uma transformação de fase em materiais sólidos, como cristalização, com base em nucleação e crescimento. Assumindo que adsorvente e adsorbato são uma fase previamente formada, é possível usar o modelo para o estudo da adsorção entre a superfície do carvão ativado e o azul de metileno. Os resultados dos modelos cinéticos são apresentados na Tabela 3.

A partir dos valores de coeficiente de determinação (R^2) variando entre 0,9946 e 0,9949, os modelos cinéticos PPO e PSO descrevem bem a cinética de adsorção entre os carvões e o azul de metileno, atingindo valores quase que iguais para CB600 e CB700, de q_e igual a 48,4 mg g⁻¹.

Tabela 3 - Parâmetros cinéticos dos modelos de PPO, PSO e Avrami.

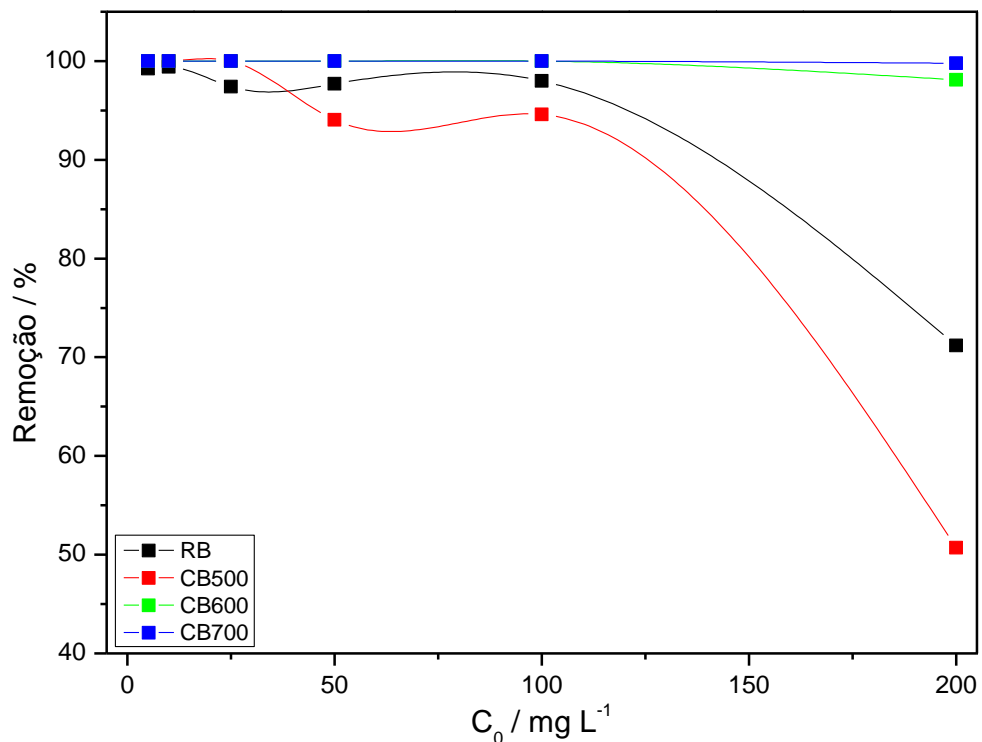
Modelo Cinético / Amostras	RB	CB500	CB600	CB700
<i>Pseudo-Primeira Ordem (PPO)</i>				
q_e	46,24	44,40	48,65	48,42
k_f	0,57	0,45	1,03	0,82
R²	0,99245	0,9698	0,9968	0,9949
<i>Pseudo-Segunda Ordem (PSO)</i>				
q_e	46,58	45,69	48,62	48,38
k_s	0,07	0,02	5,06·10 ¹⁴	0,92
R²	0,99245	0,9852	0,9968	0,9946
<i>Avrami</i>				
q_e	46,37	240,42	76,92	76,45
k_A	1,42	1,51·10 ⁻¹⁵	2,1·10 ²²	7,61·10 ³
n_A	0,53	0,05	2,76·10 ⁻¹⁷	2,07·10 ⁻¹⁶

R^2	0,99206	0,9951	0,9963	0,9938
-------	---------	--------	--------	--------

6.6 EQUILÍBRIO DE ADSORÇÃO

A partir do resultado da cinética de adsorção, em que o equilíbrio foi atingido durante 60 min para todos os adsorventes, os ensaios de adsorção no equilíbrio foram realizados variando a concentração de AM entre 5-200 mg·L⁻¹. Os resultados são apresentados no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Equilíbrio de adsorção para RB e os carvões CB500, CB600 e CB700.

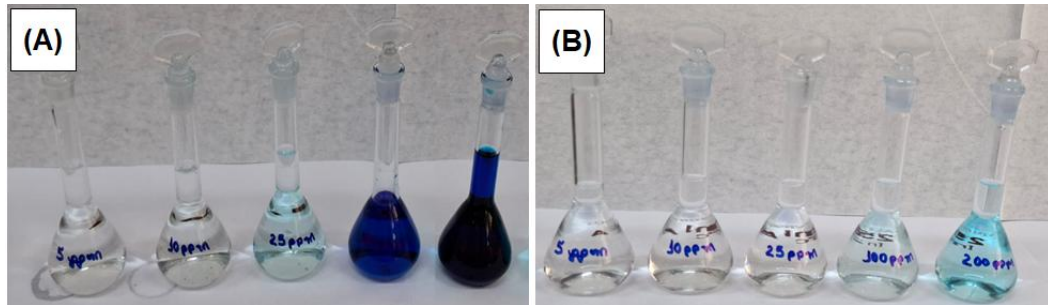


Observa-se um desempenho superior para os carvões CB600 e CB700. No caso do CB600, houve a remoção de 100% do AM até a concentração de 100 mg L⁻¹, em 98,09% para 200 mg L⁻¹. No caso do CB700, também houve remoção de 100% até a concentração de 100 mg L⁻¹ e 99,8% para 200 mg L⁻¹. O carvão CB500 também exibiu uma remoção acima de 90% até a concentração de 100 mg L⁻¹, indicando também elevada capacidade adsorptiva.

Considerando as questões de economia energética, CB600 é o melhor adsorvente quando comparado com CB700, uma vez que a temperatura de carbonização foi menor, gastando menos energia, e obtendo um carvão ativado com resultados praticamente semelhantes. Na Figura 6, são apresentadas as soluções de AM nas diferentes concentrações após 60 min de adsorção. É possível notar a

diferença significativa entre a remoção com RB (A) e com CB700 (B).

Figura 6 - Soluções de AM após a adsorção no equilíbrio. (A) RB e (B) CB700.



Fonte: A autora (2025).

7 CONCLUSÃO

O pseudocaule da bananeira representa uma matéria-prima promissora e sustentável para a produção de carvão ativado. Esse carvão demonstrou ser eficiente na remediação de um corante padrão, sugerindo ser um potencial removedor de poluente, em especial na adsorção do azul de metileno, utilizado como molécula sonda para ensaios de adsorção, não obstante o baixo rendimento de alguns dos carvões. Foi possível remover praticamente 100% de todas as concentrações trabalhadas nesse estudo, destacando o pseudocaule da bananeira como uma biomassa promissora para a síntese de carvões ativados.

Além dos benefícios ambientais, este trabalho também enfatiza a viabilidade econômica e social da utilização desses resíduos agrícolas para a geração de empregos. Ao converter um subproduto da agricultura em um material de elevado valor agregado para a mitigação ambiental, a pesquisa busca uma alternativa para a administração de resíduos, colaborando com a sustentabilidade e, dessa forma, criando novas oportunidades de renda para as comunidades rurais, especialmente para aquelas do Maciço de Baturité.

REFERÊNCIAS

- ADRIANO, J. et al. **Análise da cadeia produtiva da banana no estado do Ceará.** [s.l: s.n.]. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/5281/1/2001_eve_jalcust%c3%b3dio.PDF.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Proibição do uso do herbicida Paraquat.** Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br>. Acesso em: 06 nov. 2024.
- AGRICULTURE, I. **O meio Ambiente e a Gestão de Resíduos Sólidos** | Indigo. Disponível em: <https://www.indigoag.com.br/pt-br/blog/residuos-solidos-agricultura>.
- ALMEIDA, R. T. Eficácia do carvão ativado na remoção de pesticidas em águas residuais: um estudo de caso em comunidades rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 2, p. 50-65, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.035>. Acesso em: 11 jan. 2025.
- AL-SAREJI, O. et al. A sustainable banana peel activated carbon for removing pharmaceutical pollutants from different waters: production, characterization, and application. **Materials**, v. 17, p. 1032, 2024.
- Al, Binling et al. **Biodegradable Cellulose Film Prepared From Banana Pseudo-Stem Using an Ionic Liquid for Mango Preservation.** *Frontiers in Plant Science*, [s. l.], v. 12, art. 625878, fev. 2021. DOI: 10.3389/fpls.2021.625878. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2021.625878/full>. Acesso em: 2 fev. 2025.
- AMIN, N. K. Removal of reactive dye from aqueous solutions by adsorption onto activated carbons prepared from sugarcane bagasse pith. **Desalination**, v. 223, n. 1-3, p. 152-161, 2008. DOI: 10.1016/j.desal.2007.01.203.
- BADANAYAK, P.; JOSE, S.; BOSE, G. Banana pseudostem fiber: A critical review on fiber extraction, characterization, and surface modification. **Journal of Natural Fibers**, v. 20, n. 1, p. 2168821, 2023.
- BARBOSA, C. S. et al. Remoção de compostos fenólicos de soluções aquosas utilizando carvão ativado preparado a partir do aguapé (*Eichhornia crassipes*): estudo cinético e de equilíbrio termodinâmico. **Química Nova**, São Paulo, v. 37, n. 3, p. 447-453, fev. 2014. DOI: 10.5935/0100-4042.20140066.
- BOLLINGER, J.-C. et al. Molecular properties of methylene blue, a common probe in sorption and degradation studies: a review. **Environmental Chemistry Letters**, 2025.
- BRANCO, S. M. **Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.** Sobloco Informa: São Paulo, 1996, v. 1.
- CORDEIRO, N. K. et al. Gestão de resíduos agrícolas como forma de redução dos

impactos ambientais. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 14, n. 2, p. 23–34, 2020. Disponível em: <https://revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Rbca/article/view/5593>. Acesso em: 11 jan. 2025.

COSTA, F. R. **Morfofisiologia de Musáceas**: estruturas de reserva. 1. ed. São Paulo: Editora Agronômica, 2020. 150 p.

CRINI, G. Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, v. 97, n. 9, p. 1061-1085, jun. 2006. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.002452. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852405002452>. Acesso em: 3 jul. 2025.

FATIMAH, I. et al. One-pot synthesis of Fe₃O₄/NiFe₂O₄ nanocomposite from iron rust waste as reusable catalyst for methyl violet oxidation. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 8, p. 100378, 2023. DOI: 10.1016/j.crcon.2023.04.003.

FERREIRA, S. B. S. Biorremediação como alternativa de tratamento em ambientes contaminados. **Revista FIMCA**, v. 7, n. 3, p. 5-9, 2020.

FOO, K. Y.; HAMEED, B. H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, v. 156, n. 1, p. 2-10, jan. 2010. DOI: 10.1016/j.cej.2009.09.013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894709006147>. Acesso em: 3 jul. 2025.

GONG, J. et al. Research on cellulose nanocrystals produced from cellulose sources with various polymorphs. **RSC Advances**, v. 7, p. 33486-33493, 2017.

GUPTA, Indu. An Innovative and Sustainable Approach for Quantifying Cotton and Ramie Fibre Blend Ratios. *SN Applied Sciences*, [s. l.], v. 2, n. 1, art. 20, 2020. DOI: 10.1007/s42452-019-1790-8. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-019-1790-8>. Acesso em: 2 jul. 2025.

GUIMARÃES, J. L. et al. Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 30, n. 3, p. 407-415, 2009. DOI: 10.1016/j.indcrop.2009.07.013.

HYOX. **Activated carbon filters**, 2025. Disponível em: <http://https://hyox.in/activated-carbon-filters/>. Acesso em: 3 jul. 2025.

HO, Y. S. Review of second-order models for adsorption systems. **Journal of Hazardous Materials**, v. 136, n. 3, p. 681-689, 2006. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.12.043. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16460877/>. Acesso em: 3 jul. 2025.

HUA, Mu-Yi et al. Characterization and quantification of N-(3-aminopropyl)-N-dodecyl-1,3-propanediamine biocide by NMR, HPLC/MS and titration techniques.

Chemosphere, v. 95, p. 379-386, mar. 2014. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.09.049. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653513015051>. Acesso em: 3 jul. 2025.

LIMA, A. P.; SANTOS, R. T. Economia circular aplicada a resíduos agroindustriais: estudo de caso do pseudocaule de bananeira. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 16, n. 3, p. 45-60, 2021.

LIMA, J. A.; SANTOS, R. P. O potencial do pseudocaule da bananeira na sustentabilidade ambiental. **Revista Brasileira de Agricultura Sustentável**, v. 13, n. 2, p. 123-134, 2021.

KEPPETIPOLA, N. M. et al. Graphite-type activated carbon from coconut shell: a natural source for eco-friendly non-volatile storage devices. **RSC Advances**, v. 11, n. 5, p. 2854-2865, 2021.

KHAN, I. et al. Review on methylene blue: its properties, uses, toxicity and photodegradation. **Water**, v. 14, p. 242, 2022.

MARTINS, A. C., SOUZA, R. L.; Almeida, G. P. (2021). *Avanços na Aplicação de Carvão Ativado em Sistemas de Tratamento de Água e Ar*. Editora Ambiental.

MARTINS, L. C. Propriedades do carvão ativado e suas aplicações na adsorção de contaminantes. **Química Verde em Foco**, v. 5, n. 4, p. 78-89, 2022.

MARTINS, J. R.; SILVA, A. C. O impacto econômico da valorização dos resíduos agrícolas em pequenas propriedades rurais. **Journal of Agricultural Sustainability**, v. 12, n. 1, p. 23-34, 2021.

MISRAN, E. et al. Banana stem based activated carbon as a low-cost adsorbent for methylene blue removal: Isotherm, kinetics, and reusability. **Alexandria Engineering Journal**, v. 61, n. 3, p. 1946-1955, 2022. DOI: 10.1016/j.aej.2021.07.022.

MOVE CEARÁ. **Agropecuária participa em 10% do PIB do Maciço de Baturité**. Fortaleza, 22 mar. 2022. Disponível em: <https://moveceara.com.br/2022/03/22/agropecuaria-participa-em-10-do-pib-do-macico-de-baturite/>. Acesso em: 1 jul. 2025.

NASCIMENTO, R. F. et al. **Adsorção**: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: UFC, 2014. 256 p. (Estudos da Pós - Graduação). Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/10267/1/2014_liv_rfdnascimento.pdf. Acesso em: 3 fev. 2025.

NEME, I.; GONFA, G.; MASI, C. Activated carbon from biomass precursors using phosphoric acid: A review. **Helyon**, v. 8, n. 12, e11940, 2022.

NOMURA, Edson Shigueaki et al. **Cultivo da Bananeira**. Campinas, SP: Coordenadoria de Desenvolvimento Rural Sustentável (CDRS), 2020. 178 p. (Manual Técnico, 82). Disponível em:

https://www.cati.sp.gov.br/portal/themes/unify/arquivos/produtos-e-servicos/acervo-tecnico/producao_vegetal/Manual_tecnico_82_Cultivo_da_Bananeira.pdf. Acesso em: 3 jul. 2025.

NUNES, C. A.; GUERREIRO, M. C. Estimation of surface area and pore volume of activated carbons by methylene blue and iodine numbers. **Química Nova**, v. 34, n. 3, p. 472-476, 2011.

PEREIRA, L. F.; COSTA, M. J. Carvão ativado: da história antiga às inovações modernas. **Revista de Engenharia Química**, v. 15, n. 2, p. 45-60, 2018.

RAMDHONNE, A.; JEETAH, P. Production of wrapping paper from banana fibres. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. v. 5, n. 5, p. 4298-4306, 2017.

RAASCH, L. B. Adsorção de chumbo (II) em solução aquosa usando carvão ativado do caroço da manga (*Mangifera indica L.*). **Matéria**, v. 29, n. 4, 2024.

RAPOSO, F.; DE LA RUBIA, M. A.; BORJA, R. Removal of metal ions at low concentration by micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF) using sodium dodecyl sulfate (SDS) and linear alkylbenzene sulfonate (LAS). **Journal of Hazardous Materials**, v. 165, n. 1-3, p. 291-299, 2009. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.09.106.

GUPTA, Indu. An Innovative and Sustainable Approach for Quantifying Cotton and Ramie Fibre Blend Ratios. *SN Applied Sciences*, [s. l.], v. 2, n. 1, art. 20, 2020. DOI: 10.1007/s42452-019-1790-8. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-019-1790-8>. Acesso em: 2 jul. 2025.

RAMBO, Magale K. D.; FERREIRA, Márcia M. C. Determination of Cellulose Crystallinity of Banana Residues Using Near Infrared Spectroscopy and Multivariate Analysis. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 26, n. 7, p. 1491-1499, jul. 2015. DOI: 10.5935/0103-5053.20150118. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbchs/a/McWWhyLQSCyQTnFWcxzMGsFk/abstract/?lang=en>. Acesso em: 2 jul. 2025.

RENGGA, W. D. P. et al. **Kinetic study of adsorption carboxylic acids of used cooking oil using mesoporous active carbon**. In: IOP CONFERENCE SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE, 2021, [Local do evento]. [Local de publicação]: IOP Publishing, 2021. v. 700, n. 1, art. 012035. DOI: 10.1088/1755-1315/700/1/012035. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/350332447_Kinetic_study_of_adsorption_carboxylic_acids_of_used_cooking_oil_using_mesoporous_active_carbon. Acesso em: 2 jul. 2025.

SANTOS, Ana Paula Soares et al. Caracterização físico-química de casca de banana (*Musa cavendishii L.*) e de carvão ativado produzido a partir desta biomassa. **Revista de Ciências Agrárias**, Marabá, v. 14, n. 2, p. 172-181, jun. 2021.

SEBRAE. **Brasil é o 4º produtor mundial de banana**. [Brasília, DF]: Sebrae, [20-?]. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/brasil-e-o-4-produtor-mundial-de-banana,1f00286bf0837810VgnVCM1000001b00320aRCRD>.

Acesso em: 27 jun. 2025.

SEPTANINGSIH, D. A. et al. Phytochemical profiling of *Gynura procumbens* (Lour.) Merr. leaves and stem extracts using UHPLC-Q-Orbitrap HRMS. **Indonesian Journal of Chemistry**, v. 23, n. 1, p. 73-89, 2023.

SILVA, E. L.; OLIVEIRA, R. G. Carvão ativado de resíduos agrícolas: sustentabilidade e eficiência. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, v. 22, n. 3, p. 180-195, 2020.

SILVA, J. R.; OLIVEIRA, M. A.; SOUZA, L. F. Gestão de resíduos agrícolas: alternativas sustentáveis para o meio ambiente. **Revista Brasileira de Agricultura Sustentável**, v. 10, n. 2, p. 123-134, 2021.

SILVA, W. L. L.; OLIVEIRA, S. P. Modificação das características de adsorção do bagaço de cana para remoção de azul de metileno de soluções aquosas. **Scientia Plena**, v. 8, n. 9, p. 097201-1, set. 2012. Disponível em: <https://www.scientiaplena.org.br/sp/article/view/831>. Acesso em: 2 jul. 2025.

SING, K. S. W. Adsorption by active carbons. In: ROUQUEROL, J.; ROUQUEROL, F.; SING, K. S. W. **Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications**. 2. ed, Amsterdam: Elsevier, 2013. cap. 10, p. 321-391. DOI: 10.1016/B978-0-08-097035-6.00010-3. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097035-6.00010-3>. Acesso em: 3 jul. 2025.

SOUZA, C. C.; MACHADO, A. R. T. Carvão ativado obtido de resíduos agrícolas: adsorvente para remoção de corantes orgânicos dos efluentes têxteis. **Revista Engenharia de Interesse Social**, v. 5, n. 5, 2020.

SOUZA, T. G. Remediação de solos e águas contaminadas: conceitos e métodos. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 8, n. 1, p. 22-34, 2019.

SOUZA, P. T., et al. O papel da qualidade e da certificação na inserção de produtos agrícolas brasileiros no mercado internacional. **Revista Ciências Agrárias Online**, v. 5, n. 2, p. 1-15, 2021. Disponível em: <https://revistas.if.uff.br/index.php/rca/article/view/1063>. Acesso em: 11 jan. 2025.

SRENSCEK-NAZZAL, J. et al. Chemical Activation of Banana Peel Waste-Derived Biochar Using KOH and Urea for CO₂ Capture. **Materials**, v. 17, p. 872, 2024.

WESTPHALEN, A. P. C.; CORÇÃO, G.; BENETTI, A. D. Utilização de carvão ativado biológico para o tratamento de água para consumo humano. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, p. 425-436, jul./set. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/3n8TGzfRxRTMcnqfhmgYV6C/>. Acesso em: 4 jul. 2025. DOI: 10.1590/S1413-41522016143108. YANG, R. T. **Adsorbents: Fundamentals and Applications**. Hoboken: Wiley-Interscience, 2003. 403 p.

YANG, R. T. **Adsorbents: Fundamentals and Applications**. Hoboken: Wiley-Interscience, 2003. 403 p. DOI: 10.1002/047144409X. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/047144409X>. Acesso em: 3 jul. 2025.

ZHAO, Yufeng et al. **Adsorptive removal of endocrine-disrupting compounds and a pharmaceutical using activated charcoal from aqueous solution: kinetics, equilibrium, and mechanism studies.** *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, n. 33, p. 33897-33905, 2019. DOI: 10.1007/s11356-018-2617-7. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/326068814_Adsorptive_removal_of_endocrindisrupting_compounds_and_a_pharmaceutical_using_activated_charcoal_from_aqueous_solution_kinetics_equilibrium_and_mechanism_studies. Acesso em: 2 jul. 2025.