

**EVALUATION OF ADSORPTION ISOTHERMS OF BANANA PRATA PEEL (MUSA
PARADISIACA) IN THE REMOVAL OF METYLENE BLUE TEXTILE DYE: A
SUSTENTAINABLE APPROACH****AVALIAÇÃO DAS ISOTERMAS DE ADSORÇÃO DA CASCA DA BANANA PRATA (MUSA
PARADISIACA) NA REMOÇÃO DE CORANTE TEXTIL AZUL DE METILENO: UMA
ABORDAGEM SUSTENTÁVEL****JANIELLY PAIXÃO BARROSO NOBRE**<https://orcid.org/0009-0008-8603-563X/> janiellypaixaeng@gmail.com
Centro Universitário UniFanor Wyden - Fortaleza – Ceará**DARLANE WELLEN FREITAS SOARES**<https://orcid.org/0009-0009-3369-132/> darlannefreitas@gmail.com
Ministério da Defesa - Exército Brasileiro - Fortaleza – Ceará**ROBERTO LIMA DE ALBUQUERQUE**<https://orcid.org/0009-0001-3598-8528/> robert.albuquerque@uece.br
Universidade Estadual do Ceará - Fortaleza – Ceará**JOSÉ MILTON FERREIRA JUNIOR**<https://orcid.org/0000-0002-3449-4040/> darlannefreitas@gmail.com
Universidade Estadual do Ceará -Fortaleza – Ceará

Recebido em: 05/06/2024

Aprovado em: 23/07/2024

Publicado em: 23/07/2024

**RESUMO**

Na indústria têxtil, o beneficiamento de fibras e a aplicação de corantes demandam um alto consumo de água, produzindo elevadas taxas de rejeitos industriais. Os corantes, por sua vez, possuem grande estabilidade, o que pode resultar em efluentes altamente contaminados. Caso sejam descartados incorretamente, esses resíduos podem causar sérios problemas ao meio ambiente e à saúde humana. Nesse sentido, é essencial a descontaminação desses efluentes antes de lançá-los nos corpos hídricos. Para isso, o processo de adsorção tem se mostrado bastante eficaz na remoção de corantes das águas residuárias do setor têxtil. Visando a otimização e viabilidade econômica desse processo, a presente investigação traz como foco a utilização de um resíduo agroindustrial, a casca de banana prata (*Musa paradisiaca*), como alternativa de bioissorvente. A partir de uma metodologia experimental e aplicada, testes para a determinação de pH foram aplicados, a fim de se determinar o mais adequado para o procedimento. Variações de concentrações de adsorvente também

foram avaliadas para se obter o melhor aproveitamento do material na remoção do corante azul de metileno. Os resultados obtidos nos testes de biossorção indicaram 99,5% de remoção, demonstrando alta eficiência no processo. Desta forma, a casca de banana prata (*Musa paradisiaca*) apresentou-se como um eficiente biossorvente na adsorção do corante azul de metileno, tornando-se uma alternativa sustentável e de baixo custo.

Palavras-chave: biossorção; isothermas de adsorção; sustentabilidade; *Musa paradisiaca*.

ABSTRACT

In the textile industry, the processing of fibers and the application of dyes require high water consumption, producing high rates of industrial waste. Dyes, in turn, have great stability, which can result in highly contaminated effluents. If disposed of incorrectly, this waste can cause serious problems to the environment and human health. In this sense, it is essential to decontaminate these effluents before releasing them into water bodies. To this end, the adsorption process has proven to be very effective in removing dyes from wastewater in the textile sector. Aiming at the optimization and economic viability of this process, this investigation focuses on the use of an agro-industrial residue, the silver banana peel (*Musa paradisiaca*), as an alternative biosorbent. Based on an experimental and applied methodology, tests to determine pH were applied in order to determine the most suitable pH for the procedure. Variations in adsorbent concentrations were also evaluated to obtain the best use of the material in removing the methylene blue dye. The results obtained in the biosorption tests indicated 99.5% removal, demonstrating high efficiency in the process. In this way, the silver banana peel (*Musa paradisiaca*) presented itself as an efficient biosorbent in the adsorption of methylene blue dye, becoming a sustainable and low-cost alternative.

Keywords: biosorption; adsorption isotherms; sustainability; *Musa paradisiaca*.

1 INTRODUÇÃO

Em virtude do crescimento da população mundial, da intensificação da agricultura, da vertiginosa industrialização e do uso indiscriminado dos recursos naturais, nas últimas décadas tem ocorrido um aumento substancial dos níveis de poluição ambiental. Isso tem acarretado graves problemas para o meio ambiente, especialmente devido à geração de águas residuárias (cembranel, 2019).

Diversas situações põem em perigo a biodiversidade do planeta. Nesse sentido, atitudes sem preocupação ambiental são as principais causas de degradação e poluição das fontes naturais, incluindo práticas de descarte irregular de resíduos, casos de desmatamento, emissões gasosas e outras ações prejudiciais ao meio ambiente.

Segundo Uddin e Jeong, (2021), a poluição dos corpos hídricos é marcada pela presença ou lançamento de materiais das mais diversas naturezas na água, em concentrações capazes de causar um desequilíbrio ambiental, impactando na saúde e no bem-estar da natureza e do homem.

Nesse contexto, destacam-se as indústrias têxteis como responsáveis de relevância na poluição das águas, especificamente devido ao lançamento de efluentes têxteis.

O setor têxtil tem a água como substância primordial nos processos de tingimento dos tecidos, fornecendo vasta quantidade de corantes, dos quais, em sua maioria, são lançados no ambiente aquático, ocasionando sérios problemas ambientais. Dessa forma, torna-se indispensável o desenvolvimento de tecnologias eficazes para o tratamento desses rejeitos (Schuster, 2021).

No tingimento têxtil são empregados diversos tipos de corantes, de acordo com a natureza da fibra têxtil, propriedades relacionadas à fixação corante - fibra, classificação do corante, custo econômico, dentre outras características. Com isso, cada tipo de efluente têxtil necessitará de uma técnica específica para a eliminação dos corantes incorporados (Marques e Conceição, 2022).

A presença de corantes nos efluentes é facilmente perceptível, impactando a transparência da água e a solubilidade de gases nos corpos receptores. Isso também limita a capacidade de regeneração dos corpos hídricos, uma vez que a redução na penetração de luz solar altera os processos de fotossíntese (Estiningtyasa *et al.*, 2023).

Os efluentes têxteis apresentam características como alta acidez, concentrações elevadas de sólidos em suspensão e valores significativos de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). Além disso, a baixa relação DBO/DQO é observada devido à baixa biodegradabilidade dos corantes utilizados (Ramos *et. al.*, 2020).

Diante da geração de poluentes, a legislação brasileira, estabelecida pelo CONAMA nº 357 de 2005, determina que a coloração residual dos efluentes deve ser visualmente ausente. Além disso, as concentrações dos componentes presentes nos corantes, como sulfetos, cloretos, benzeno, dentre outros, devem atender aos limites estabelecidos para o lançamento desses efluentes nos corpos receptores (Brasil, 2005).

Desse modo, os procedimentos mais aplicados para a remoção de corante de efluentes têxteis englobam adsorção, filtração, precipitação, eletroquímica, dentre outros. Sendo que o processo de adsorção é o mais utilizado para tratamento (Gupta *et al*, 2013).

De acordo com Souza e Machado (2020), a adsorção apresenta grande aplicabilidade no tratamento desse tipo de efluente industrial devido à sua simplicidade, alta eficiência e baixo custo inicial. Além disso, é um método livre de lodos, pois o corante é removido da fase líquida e transferido para um material adsorvente, ou seja, uma fase sólida.

Ao se investigar os processos adsorptivos, é comum se deparar com estudos que destacam a utilização de carvão ativado. Muitos destes empregam esse material como adsorvente para remover corantes de efluentes industriais devido às suas vantajosas propriedades de adsorção. No entanto, devido ao alto custo desse material e a grande quantidade de efluente produzido no setor têxtil, Souza e Machado (2020) destacam que pesquisas recentes estão sendo direcionadas para novas abordagens, buscando alternativas de materiais adsorventes.

Nesse contexto, é notável o vasto potencial agrícola do Brasil, o qual, infelizmente, resulta em uma considerável geração de resíduos muitas vezes descartados de forma inadequada, ocasionando desequilíbrios ambientais. Diante desse cenário, surge a oportunidade de se reduzir os custos relacionados aos adsorventes comerciais, ao se utilizar resíduos de origem vegetal como biossorventes para a remoção de corantes de efluentes industriais. Tal abordagem não apenas representa uma vantagem econômica, mas também traz benefícios significativos para o meio ambiente.

Com base no exposto, a partir de uma pesquisa do tipo experimental e aplicada, propõe-se neste estudo o desenvolvimento de um material adsorvente utilizando a casca da banana prata (*Musa paradisiaca*), um resíduo agroindustrial, e examinar suas propriedades de adsorção em relação às suas isotermas de adsorção. Além disso, busca-se investigar como essas propriedades podem influenciar na eficiência do processo de remoção do corante azul de metileno em efluentes da indústria têxtil.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As questões ambientais têm se tornado protagonistas nas discussões contemporâneas em diversas esferas, incluindo política, economia, saúde e organização urbana. O desenvolvimento industrial e econômico proporcionou inúmeros avanços tecnológicos, mas também resultou em uma grande quantidade de resíduos devido à produção em larga escala.

Embora a agroindústria não seja amplamente reconhecida pela sociedade como um setor significativo de poluição ambiental, ela envolve um complexo de atividades que transformam matérias-primas da agricultura, pecuária e aquicultura em diversos produtos. Este setor abrange toda a indústria de alimentos, assim como aquelas que processam matérias-primas agropecuárias

em produtos para fins alimentares e não alimentares, como as indústrias de óleos vegetais não comestíveis (Araújo *et al.*, 2018).

Os resíduos gerados pela agroindústria representam recursos potencialmente valiosos e prontamente aproveitáveis. No entanto, muitas vezes são tratados simplesmente como resíduos, o que evidencia um explícito desperdício. Esses resíduos são provenientes de uma variedade de atividades agroindustriais, incluindo o processamento de fibras, madeira, alimentos, couro, produção de açúcar e álcool, dentre outros. Sua geração está frequentemente associada à sazonalidade, determinada pelo período de cultivo ou pela disponibilidade da matéria-prima (Vaz-Júnior, 2020).

Uma das vantagens da utilização de resíduos agroindustriais é sua ampla disponibilidade e baixo custo. Além disso, esses resíduos frequentemente contêm substâncias que podem ser transformadas em produtos de grande interesse comercial. Simultaneamente, o aproveitamento desses resíduos em novos processos diminui a necessidade de exploração de recursos naturais, promovendo práticas ambientalmente sustentáveis (Saraiva *et al.*, 2022).

2.1. Corantes

A aplicação de corantes é comum em diferentes setores industriais, incluindo os segmentos têxtil, alimentício, cosmético, galvanoplastia e farmacêutico. Geralmente, a classificação dos corantes é feita com base em sua natureza química ou conforme o método de aplicação na fibra.

Corantes que pertencem a classes de compostos orgânicos com grupos aromáticos complexos são moléculas estáveis e, portanto, apresentam difícil biodegradação. Eles são classificados de acordo com a estrutura química e a solubilidade, sendo os corantes solúveis em água particularmente difíceis de eliminar (Kent, 2017).

Os corantes possuem características naturais que permitem sua detecção a olho nu, facilitando a identificação de alterações no ambiente em que estão presentes. Em efluentes aquáticos, mesmo em concentrações baixas, a presença desses compostos já é capaz de causar consideráveis mudanças em sua coloração (Lellis *et al.*, 2019).

De acordo com Guaratini e Zanoni (2000), se os efluentes das indústrias de corantes não forem tratados corretamente, há um alto risco de contaminação de reservatórios e estações de tratamento de água, o que pode levar a consequências ambientais significativas. Essa

contaminação pode alterar as características organolépticas e visuais dos corpos d'água, tornando-os inadequados para uso geral e consumo humano.

O corante azul de metileno, objeto dessa investigação, embora não seja tão tóxico quanto os metais pesados, pode causar uma série de efeitos adversos à saúde humana. A inalação desse composto pode resultar em problemas respiratórios, enquanto a sua ingestão oral pode causar sensação de queimação, seguida de náuseas, vômitos, diarreia e gastrite. Além disso, pode provocar queimaduras nos olhos, levando a lesões irreversíveis. Em doses elevadas, pode causar dores abdominais e torácicas, dores de cabeça intensas, sudorese excessiva, aumento dos batimentos cardíacos, confusão mental, dentre outros efeitos adversos (Lellis *et al.*, 2019).

2.2. Adsorção

A adsorção é um processo onde moléculas de uma substância (adsorvato) são retidas na superfície de um sólido ou líquido (adsorvente). Em pesquisas sobre adsorção, a aplicação de modelos de isotermas torna-se crucial, visto que essas isotermas descrevem como o adsorvato se distribui entre a fase líquida e a fase sólida no equilíbrio, fornecendo informações valiosas sobre a capacidade de adsorção e a eficiência do adsorvente. (Foo e Hameed, 2010).

Em termos de estabilidade, o controle da temperatura durante a determinação das isotermas é essencial, visto que a adsorção é um processo dependente desta variável. Assim, a variação térmica pode alterar a capacidade de adsorção e a energia de interação entre o adsorvato e o adsorvente. Portanto, isotermas obtidas a temperaturas constantes fornecem uma melhor compreensão do comportamento do sistema de adsorção em condições específicas (Voudrias, Fytianos e Bozani, 2002).

2.2.1. Cinética de adsorção

O estudo cinético de adsorção é de grande relevância para o tratamento de efluentes aquosos, pois fornece dados importantes sobre o mecanismo do processo de adsorção e o progresso das reações.

Segundo Nascimento (2014), a cinética de adsorção descreve a taxa de remoção do adsorvato na fase fluida ao longo do tempo, incluindo a transferência de massa de um ou mais

elementos da solução para o interior do adsorvente, através dos macroporos até as regiões mais internas da partícula. Dessa forma, o equilíbrio é alcançado quando a quantidade de adsorvato retida sobre o adsorvente está em equilíbrio com o restante livre na solução, ou seja, quando não há mais transferência de massa.

Diversos modelos sobre cinética de adsorção estão disponíveis na literatura para explicar os mecanismos e etapas limitantes, dentre estes ressaltam-se os modelos cinéticos de pseudoprimeira ordem e pseudosegunda ordem (Sulthana *et al.*, 2022).

A cinética de pseudoprimeira ordem é caracterizada por uma taxa de adsorção que é proporcional à diferença entre a quantidade de adsorvato no sistema e a quantidade de adsorvato no equilíbrio. Este modelo é expresso pela equação de Lagergren (equação 1) e é amplamente utilizado para descrever a adsorção em sistemas onde a superfície de adsorção está predominantemente coberta por uma camada mono molecular (Lagergren, 1898).

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 \cdot t \quad (1)$$

Já a cinética de pseudosegunda ordem descreve um processo de adsorção que é caracterizado por uma taxa de adsorção proporcional ao quadrado da quantidade de adsorvato remanescente no sistema (equação 2). Esse modelo é frequentemente observado em sistemas em que ocorrem reações químicas entre o adsorvato e os sítios ativos na superfície do adsorvente (Ho e Mckay, 1999).

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

2.2.2. Isotermas de adsorção

As isotermas são representações matemáticas que descrevem os níveis de adsorção em temperaturas constantes. Uma análise detalhada do potencial de adsorção no equilíbrio é essencial para avaliar a confiabilidade dos parâmetros de adsorção e realizar comparações quantitativas do comportamento desse processo em diferentes sistemas de adsorção ou sob diferentes condições dentro do mesmo sistema (Thommes *et al.*, 2015).

Conforme destacado por Dotto *et al.* (2011), as isotermas fornecem uma medida da eficácia da adsorção, possibilitando uma estimativa do soluto que o adsorvente pode adsorver, além de se verificar se essa adsorção é economicamente viável.

Os dados obtidos por meio das isotermas são fundamentais para se compreender como os diferentes tipos de poluentes interagem com os materiais adsorventes. Os modelos mais utilizados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Modelos de Isotermas de Adsorção.

Modelos	Equação
Langmuir	$q_e = \frac{q_{max} b_l C_e}{1 + b_l C_e}$
Freundlich Sips	$q_e = k_f C_e^n$ $q_e = \frac{q_{max} (k_s C_e)^{n_s}}{1 + (k_s C_e)^{n_s}}$
Temkin Tóth	$q_e = \beta \ln(k_{Te} C_e)$ $q_e = \frac{q_{max} C_e}{\left(\frac{1}{k_T} + C_e^{n_r}\right)^{\frac{1}{n_r}}}$
Radke e Praunsnitz	$q_e = \frac{q_{max} b_{rad} C_e}{(1 + b_{rad} C_e)^{n_{rad}}}$
Redlich e Peterson	$q_e = \frac{k_{RP} C_e}{1 + \alpha_{RP} C_e^g}$

Fonte: Adaptado de Colombo (2013)

Os modelos de isotermas de adsorção são ferramentas essenciais para a análise e compreensão dos processos adsorptivos em diferentes sistemas. Entre os modelos mais amplamente utilizados destacam-se os modelos de Langmuir e Freundlich. O modelo de Langmuir assume uma adsorção em uma monocamada sobre uma superfície homogênea com sítios de adsorção equivalentes, sendo útil para descrever sistemas onde ocorrem saturação da superfície. Já o modelo de Freundlich é empírico e descreve a adsorção em superfícies heterogêneas, sendo apropriado para uma ampla gama de concentrações, sem prever um limite de saturação (Ehiomogue, Ahuchaogu e Ahaneku, 2021).

A aplicação correta desses modelos permite não só a determinação da capacidade de adsorção, mas também proporciona perspectivas sobre os mecanismos e a natureza da interação entre adsorvente e adsorbato.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Obtenção do material bioissorvente

O material usado para criar o bioissorvente foi derivado do resíduo da produção de suco clarificado de banana prata (*Musa paradisiaca*), descartado por uma empresa situada em Pacajus, no Estado do Ceará.

Para a elaboração do bioissorvente, as cascas foram inicialmente trituradas e lavadas em água destilada para a remoção das impurezas presentes na fibra. Em seguida, foram secas em estufa a 70°C por 48 horas. Após a secagem, a biomassa foi peneirada utilizando-se malhas de <20 e >80 mesh e, em seguida, armazenada em recipientes plásticos.

3.2 Tratamento químico do material bioissorvente

Para remover as impurezas e possíveis liberações de cor, a fibra foi colocada em contato com ácido cítrico ($C_6H_8O_7$) a 0,1 M por 24 horas, conforme demonstra a Figura 1. Em seguida, a biomassa foi lavada com água destilada para extrair o excesso da solução ácida da fibra e, por fim, colocada em estufa para secagem durante 48 horas a 70°C.

Figura 1 – Fibra da casca de banana (*Musa paradisiaca*) em banho de ácido cítrico.



3.3 Preparação do efluente sintético à base de corante

Para a preparação da solução de corante azul de metileno ($C_{16}H_{18}N_2SCl$), foi elaborada uma solução com concentração de 1000 mg.L^{-1} , da qual foi conservada em um frasco âmbar. As demais soluções, com concentrações variando entre 10 a 100 mg.L^{-1} , foram preparadas a partir dessa solução - mãe. Em seguida, foi determinada a curva de calibração com as concentrações supracitadas, utilizando-se um espectrofotômetro UV-Visível ajustado em para um comprimento de onda de 580 nm.

3.4 Determinação do ponto de carga zero (pcz)

Para a definição do pH a ser utilizado nos testes de biossorção, foi realizado o ensaio de Potencial de Carga Zero (PCZ) do adsorvente. Para tanto, foram adicionados 0,5 g do biossorvente a 50 mL de solução de NaCl 0,1 M, sob condições de pH variando de 2 a 9. O pH foi ajustado utilizando-se uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 M para valores básicos e ácido clorídrico (HCl) 0,1 M para valores ácidos.

Após 24 horas de agitação a 150 RPM, as amostras foram filtradas, e o pH final foi medido. Os valores obtidos foram apresentados em um gráfico de $\Delta\text{pH} \times \text{pH}$ inicial, em que o PCZ corresponde ao valor que intercepta o eixo x, ou seja, $\Delta\text{pH} = 0$. Todos os ensaios foram realizados em triplicata. (Stumm; Morgan, 2012).

3.5 Cinética de adsorção

Na análise da cinética de adsorção, uma solução de corante com concentração de 100 mg.L^{-1} foi utilizada. Para os ensaios, 0,5 g do biossorvente foram adicionados a 25 mL da solução e agitados a 150 RPM em temperatura ambiente. Amostras foram retiradas em intervalos de tempo específicos (1, 5, 15, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos) para leitura das concentrações finais.

O tempo ideal para o equilíbrio entre a solução de corante e o biossorvente foi determinado através da análise da curva cinética, a qual foi construída com as concentrações medidas em diferentes tempos de contato entre adsorvato e adsorvente.

Para a construção da curva cinética, as soluções foram filtradas e suas concentrações foram medidas a partir de um espectrofotômetro. Dessa forma, foi possível determinar o tempo necessário para alcançar o equilíbrio entre o corante e o bioissorvente.

3.6 Obtenção da Isotermas de Adsorção

Para a determinação das isotermas de adsorção, os experimentos foram obtidos a partir de 0,5 g de biomassa adicionados a 25 mL de solução de corante com diferentes concentrações iniciais. Esses experimentos foram realizados sob as condições ideais de pH obtidas na etapa anterior.

Em sequência, as amostras foram agitadas continuamente a 150 RPM e mantidas a 28°C por um período fixo de 2 horas. Posteriormente, as soluções foram centrifugadas e as concentrações finais foram medidas a partir de um espectrofotômetro UV-Visível. Os dados de equilíbrio obtidos foram ajustados aos modelos matemáticos das isotermas de Langmuir e Freundlich, utilizando-se o método de ajuste não linear pelo programa Origin 8.0.

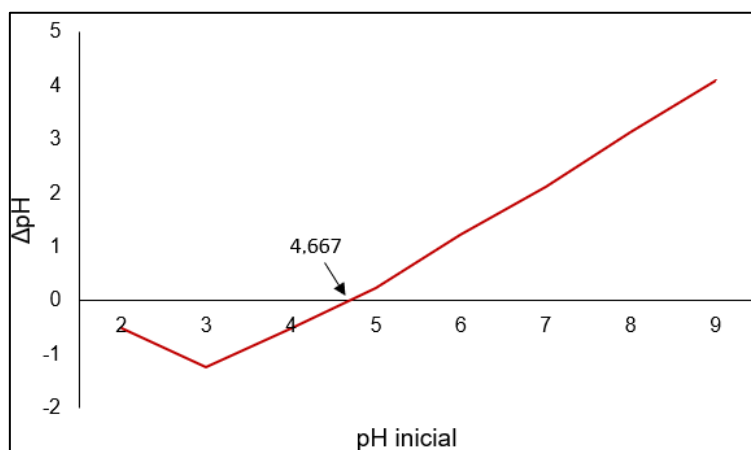
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Potencial de carga zero (PCZ)

Segundo Sparks (2022), um índice útil para se determinar a tendência de uma superfície se tornar positiva ou negativamente carregada em função do pH é o ponto de carga zero (PCZ), que define o valor de pH no qual a carga líquida do adsorvente é nula.

Nesse contexto, o PCZ do bioissorvente pré - tratado apresentou valor de pH 4,667. Este valor foi utilizado nos ensaios de bioissorção para a otimização da eficiência do material. A Figura 2 apresenta os resultados do ensaio de determinação do PCZ.

Figura 2 – Valor de pH_{PCZ} para o bioissorvente.



Fonte: Autor (2024)

4.1.1 Relação entre o pH e a eficiência de remoção

Os resultados dos ensaios experimentais que demonstram a correlação entre o pH e a eficiência de remoção, realizados em triplicata, estão apresentados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Relação pH x eficiência de remoção do corante azul de metileno.

EXP.	pH Inicial	Conc. Inicial (mg.L ⁻¹)	Conc. Final (mg.L ⁻¹)	% Remoção
1	9	100	0,618 ± 0,074	99,381 ± 0,074
2	9	10	0,037 ± 0,014	99,624 ± 0,149
3	5	100	5,058 ± 0,015	94,942 ± 0,028
4	5	10	1,040 ± 0,021	89,669 ± 0,074
5	3	100	23,909 ± 1,181	76,090 ± 1,181
6	3	10	0,891 ± 0,095	91,197 ± 0,951

Fonte: Autor (2024)

Conforme Relatado por Foo e Hameed (2010), o pH influencia diretamente na carga superficial do adsorvente, afetando sua interação com os íons adsorbatos. Quando o pH é superior ao ponto de carga zero (PCZ), a superfície do biossorvente adquire carga negativa, o que aumenta sua afinidade por cátions.

Na faixa de pH com melhor eficiência (9,0), observou-se uma eficiência média de remoção das amostras de 99,5%, o que destaca a alta eficácia do biossorvente mesmo em baixas concentrações. Conforme apontado por Ribas e Silva (2022), esses resultados estão alinhados com

estudos prévios sobre adsorventes biológicos de baixo custo, os quais têm demonstrado uma significativa capacidade de adsorção de metais pesados e corantes.

Em termos comparativos, Ribas e Silva (2022) avaliaram duas espécies de algas marinhas na remoção de azul de metileno em solução. A espécie de alga *Ulva fasciata* alcançou melhores resultados, removendo 97% de 328 mg.L⁻¹ de azul de metileno, enquanto a espécie *Sargassum dentifolium* apresentou um desempenho de 85,6% para 26 mg.L⁻¹ do mesmo corante. Nesse estudo, o valor do pH não influenciou os resultados, sendo o pH 7,0 adequado para os testes.

4.3 Cinética de adsorção

A cinética de adsorção é essencial nos estudos de biossorção, pois permite obter informações cruciais como o tempo de equilíbrio e a velocidade de remoção de corantes do meio contaminado. Esses dados são influenciados pelas características químicas e físicas do adsorvato, do biossorvente e do sistema experimental (Silva *et al.*, 2020).

4.3.1 Avaliação do Tempo de Equilíbrio

O tempo de equilíbrio é um fator crucial no estudo da cinética de adsorção. No tratamento de efluentes, é fundamental conhecer o tempo necessário para o adsorvente atingir sua capacidade máxima de adsorção. A Tabela 3 apresenta um estudo cinético da biossorção do azul de metileno com utilização casca de banana em pH 9,0, variando-se o tempo de contato de 0 a 120 minutos.

Tabela 3 – Efeito do tempo na adsorção de azul de metileno na casca de banana.

Tempo (min)	Absorbância	C (mg.L ⁻¹)	% de Remoção
1	0,258	7,76	92,2
5	0,114	3,20	96,8
10	0,051	1,20	98,8
20	0,034	0,66	99,3
30	0,023	0,31	99,7
60	0,027	0,44	99,6
90	0,029	0,50	99,5
120	0,022	0,28	99,7

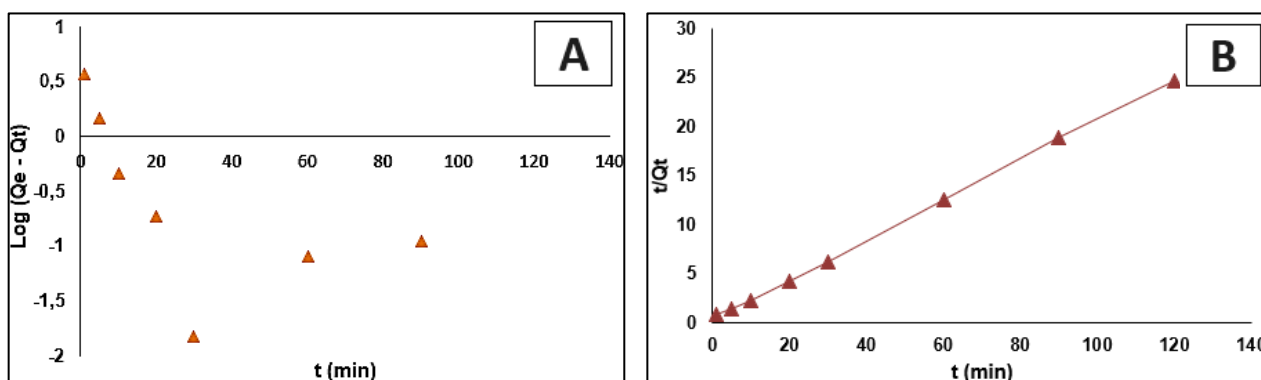
Fonte: Autor (2024)

Com base na tabela acima, os primeiros 20 minutos evidenciam uma remoção considerável do corante. Após esse período, o biossorvente alcança sua eficiência máxima de adsorção, estabilizando em percentuais acima de 99%. Em um estudo conduzido por Rodrigues *et al.* (2019), a adsorção de azul de metileno foi avaliada em resíduos de Butiá, observando-se a eficiência de adsorção em 15 minutos. Nesse período, aproximadamente 93% da concentração inicial do corante, que era de 50 mg.L^{-1} , foi removida. Em outra pesquisa com bagaço de cana-de-açúcar, realizada por Jorge, Tavares e Santos (2015), foi constatada uma eficiência de remoção de 97 % para o mesmo corante, a uma concentração de 50 mg.L^{-1} . Esses resultados destacam a eficácia da adsorção obtida com a casca de banana prata.

4.3.2 Ordem de Reação

Para a análise dos resultados da cinética de biossorção do corante azul de metileno, foram utilizados os modelos de pseudoprimeira ordem e pseudosegunda ordem, que indicam os níveis de concentração do corante em função do tempo. Os resultados do estudo cinético para a biossorção do corante sintético azul de metileno, utilizando casca de banana, são apresentados na Figura 3 a seguir.

Figura 3 - Curva Cinética do Modelo de Pseudoprimeira ordem (A); Curva Cinética do Modelo de Pseudosegunda ordem (B)



Fonte: Autor (2024)

Para se determinar um modelo cinético satisfatório, é essencial que o coeficiente de correlação (R^2) esteja próximo de 1. Com base nesse critério, o modelo de pseudosegunda ordem é considerado o mais adequado para esta análise.

Nesse contexto, diversos estudos apoiam a eficácia do modelo de pseudosegunda ordem. Por exemplo, Ho e McKay (1999) destacam que esse modelo fornece um ajuste melhor aos dados experimentais de adsorção em comparação com o modelo de pseudoprimeira ordem, especialmente quando o processo de adsorção envolve quimissorção. Eles observaram que o modelo de pseudosegunda ordem é mais preciso na previsão da cinética de adsorção, refletindo um coeficiente de correlação mais alto e, portanto, uma melhor correspondência com os dados experimentais.

Voudrias, Fytianos e Bozani (2002) destacam que o modelo de pseudosegunda ordem geralmente supera o modelo de pseudoprimeira ordem no processo da biossorção de corantes. Em seu estudo, verificou-se que o ajuste cinético para a remoção de corantes usando diferentes materiais adsorventes era mais bem representado pelo modelo de pseudosegunda ordem, evidenciando um coeficiente de correlação mais elevado e uma maior capacidade de predição.

Por outro lado, o modelo de pseudoprimeira ordem, conhecido como equação de Lagergren (1898), tem sido amplamente utilizado, porém, muitas vezes não se ajusta tão bem quanto o modelo de pseudosegunda ordem para sistemas em que a adsorção química é predominante. Esse modelo, apesar de sua simplicidade e facilidade de aplicação, frequentemente apresenta limitações na descrição precisa de processos de adsorção que envolvem quimissorção, como observado na presente investigação.

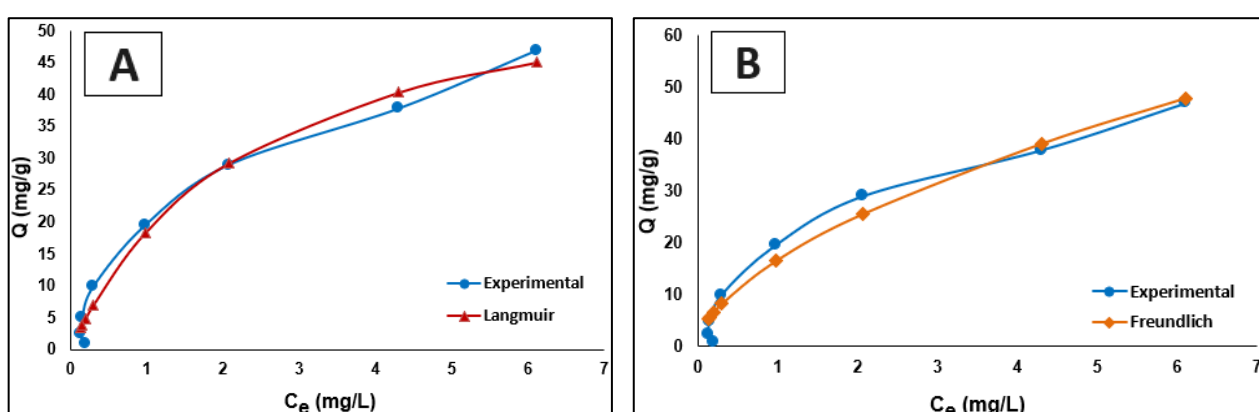
4.4 Isotermas de adsorção

Uma isoterma de adsorção ilustra a relação de equilíbrio entre a quantidade de adsorvato no adsorvente e na solução. As isotermas de adsorção indicam a eficácia do adsorvente na remoção de impurezas e ajudam a determinar se a purificação desejada pode ser alcançada. Além disso, fornecem uma estimativa da capacidade máxima de adsorção. (Ehiomogue, Ahuchaogu e Ahaneku, 2021).

Com base nos resultados obtidos nos ensaios realizados à temperatura constante, os dados foram ajustados aos modelos das isotermas de Langmuir e Freundlich, como mostrado na Figura

4. Nessa representação, C_e ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) corresponde à concentração de equilíbrio do corante na solução, enquanto Q (mg/g) representa a capacidade de adsorção do adsorvente.

Figura 4 – Isoterma de Langmuir (A); Isoterma de Freudlich (B).



Fonte: Autor (2024)

Para analisar os resultados, é importante observar a concavidade da linha de tendência, pois ela indica a capacidade de adsorção mesmo em baixas concentrações de adsorvato na solução (Ghaedi *et al.*, 2015).

Diante disso, ao se comparar os gráficos mencionados acima, é possível observar que ambos apresentam resultados favoráveis para os modelos. No entanto, assim como na cinética de adsorção, para se obter um resultado mais preciso, é necessário se analisar uma comparação dos coeficientes de correlação (R^2), conforme demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de Isotermas

PARÂMETROS			
Isoterma de Langmuir		Isoterma de Freundlich	
$Q_{\text{máx}}$	62,42414	$1/n$	0,5785
KL	0,42436	KF	16,78305
R^2	0,98221	R^2	0,9687

Fonte: Autor (2024)

De acordo com os resultados apresentados na tabela acima, identifica-se que o modelo que melhor se aplica na biossorção é o de Langmuir, com $R^2 = 0,98221$. Devido ao seu valor próximo

de 1, espera-se que o processo de adsorção ocorra de maneira rápida e eficiente, com uma forte afinidade entre o corante e a superfície do bioissorvente.

O modelo de Langmuir é amplamente utilizado para descrever a adsorção em superfícies homogêneas, considerando a formação de uma monocamada sobre a superfície do adsorvente. Por outro lado, o modelo de Freundlich é frequentemente empregado para descrever a adsorção em superfícies heterogêneas, considerando a formação de múltiplas camadas sobre o adsorvente (Lopes, *et al.*, 2022).

A literatura científica oferece uma variedade de modelos matemáticos para a análise de dados de adsorção, permitindo a linearização das isotermas. No entanto, para este ensaio, optou-se por aplicar os modelos de Langmuir e Freundlich dada sua ampla utilização e confiabilidade em estudos de adsorção.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, a presente investigação demonstra que a utilização da casca da banana prata (*Musa paradisiaca*) apresentou um desempenho bastante positivo na remoção do corante azul de metileno. A cinética de adsorção, definida pelo modelo de pseudosegunda ordem, mostrou uma excelente capacidade de ajuste aos dados experimentais, com um coeficiente de correlação (R^2) muito próximo de 1,0 (0,9994). Isso indica que o processo de adsorção ocorre de maneira rápida e eficiente, com uma forte afinidade entre o corante e a superfície do bioissorvente.

Além disso, os resultados das isotermas de adsorção, particularmente o modelo de Langmuir, indicaram uma alta capacidade de adsorção, alcançando uma eficiência de remoção de 99,5%. A eficiente adequação do modelo de Langmuir aos dados experimentais sugere que a adsorção ocorre em uma única camada sobre a superfície do bioissorvente, com interações específicas entre as moléculas do corante e os sítios ativos da casca de banana.

É relevante ressaltar que o uso da casca de banana como bioissorvente oferece vantagens econômicas e ambientais significativas, pois trata-se de um resíduo agrícola de baixo custo e amplamente disponível. No entanto, são necessários estudos adicionais para aprofundar o conhecimento sobre as propriedades e o comportamento da casca de banana como bioissorvente, bem como para otimizar sua aplicabilidade em diferentes condições de adsorção.

Investigações futuras podem explorar diferentes métodos de preparação da casca de banana e avaliar seu desempenho em larga escala e em sistemas mais complexos de tratamento de efluentes. Esses esforços contribuirão para a ampliação do conhecimento científico e o desenvolvimento de soluções mais eficazes e sustentáveis para o tratamento de efluentes industriais contaminados com corantes sintéticos.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, W. F.; ROCHA, L. M.; ARAUJO, I. M. S.; PAULA, G. A.; SOUSA, L. S.; FOLHA, M. F.; FILHO, L. B. R.; ARAUJO, R. V. Sustentabilidade em agroindústrias: alternativas para evitar o desperdício de resíduos agroindustriais do pedúnculo de caju - uma revisão de literatura. **Brasilian Journal of Development**, Curitiba, v. 4, n. 7, 2018.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_a_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2024.

CEMBRANEL, A. S.; SILVA, S. T.; FRANCA, M. M.; POKRYWIECKI, T. S. Impactos de indústria metalomecânica e a qualidade da água subterrânea – estudo de caso. **Águas Subterrâneas - Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas**, v. 20, n.1, p.1-12, 2019.

COLOMBO, A. **Biossorção dos íons cádmio e chumbo pela casca de soja**. 2013. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2013.

DOTTO, G. L.; VIEIRA, M. L. G.; GONÇALVES, J. O.; PINTO, L. A. A. Remoção dos corantes Azul Brillhante, Amarelo Crepúsculo e Amarelo Tartrazina de soluções aquosas utilizando carvão ativado, terra ativada, terra diatomácea, quitina e quitosana: estudos de equilíbrio e termodinâmica. **Química Nova**, v. 34, n. 7, p. 1193-1199, 2011.

EHIOMOGUE, P.; AHUCHAOGU, I.; AHANEKU, I. Review of adsorption isotherms models. **Acta Technica Corviniensis - Bulletin of Engineering**, v. 14, n. 4, p. 87-96, 2021.

ESTININGTYASA, I. W.; KUSUMAWATI, N.; SETIARSO, P.; MUSLIM, S.; RAHAYU, N. T.; SAFITRI, R. N.; ZAKIYAH, N.; FACHRIRAKSIE, F. F. Effect of natural dye combination and pH extraction on the performance of dye-sensitized photovoltaics solar cell. **International Journal of Renewable Energy Development**, v. 12, n. 6, p. 1054-1060, 2023.

FOO, K. Y.; HAMEED, B. H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. **Chemical Engineering Journal**, v. 156, n. 1, p. 2-10, 2010.

GHAEDI, M.; SHOJAEIFOUR, E.; GHAEDI, A. M.; SAHRAEI, R. Isotherm and kinetics study of malachite green adsorption onto copper nanowires loaded on activated carbon: Artificial neural network modeling and genetic algorithm optimization. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 142, n. 1, p. 135-149, 2015.

GUARATINI, M. T.; ZANONI, M. V. B. Corantes têxteis. **Química Nova**, v. 23, n. 1, p. 85-91, 2000.

GUPTA, V. K.; KUMAR, R.; NAYAK, A.; SALEH, T. A.; BARAKAT, M. A. Adsorptive removal of dyes from aqueous solution onto carbon nanotubes: a review. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 193, n. 1, p. 24-34, 2013.

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

JORGE, I. R.; TAVARES, F. P.; SANTOS, K. G. Remoção do corante azul de metileno no tratamento de efluentes por adsorção em bagaço de cana de açúcar. In: **Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**. São Paulo: Blücher, 2015. p. 491-500.

KENT, J. A.; BOMMARAJU, T. V.; BARNICKI, S. D. **Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology**. 13. ed. Springer, 2017. 2243 p.

LAGERGREN, S. About the theory of so-called adsorption of soluble substances. **Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar**, v. 24, n. 4, p. 1-39, 1898.

LELLIS, C. Z. F.; PAMPHILE, J. A.; POLONIO, J. C. Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms Bruno. **Biotechnology Research and Innovation**, v. 3, n. 2, p. 275-290, 2019.

LOPES, D. O.; SANTOS, L. O.; NASCIMENTO, E. D.; SOUZA, A. D. V.; CARVALHO, F. A. O. Adsorption of acid yellow dye 17 on activated carbon prepared from Euterpe oleracea: kinetic and thermodynamic studies. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, p. 1-16, 2022.

MARQUES, C. F.; CONCEIÇÃO, V. M. Alternativas Tecnológicas de Tratamento de Efluentes Têxteis: uma Revisão Bibliométrica. **Revista Internacional de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 03, p. 194-212, 2022.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: UFC, Imprensa Universitária, 2014.

RAMOS, M. D. N.; CLÁUDIO, C. C.; REZENDE, P. H. V.; SANTOS, L. A.; CABRAL, L. P.; MESQUITA, P. L.; AGUIAR, A. Análise crítica das características de efluentes industriais do setor têxtil no Brasil. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 4, 2020.

RIBAS, F. B. T.; SILVA, W. L. Biossorção: uma revisão sobre métodos alternativos promissores no tratamento de águas residuais. **Matéria**, v. 27, n. 2, p. 1-20, 2022.

RODRIGUES, L. M.; ROSSETO, V.; PIN, C. F.; PRESTES, E. B. C. **Adsorção do corante azul de metileno pelo bagaço de butiá para o tratamento de efluentes**. Impacto das tecnologias nas engenharias. Belo Horizonte: Editora Atena, 2019. p. 168-175.

SARAIVA, B. R.; VITAL, A. C. P.; ANJO, F. A.; CESARO, E.; MATUMOTO-PINTRO, P. T. Valorização de resíduos agroindustriais: fontes de nutrientes e compostos bioativos para a alimentação humana. **Pubsaúde**, v. 1, p. 1-10, 2018.

SCHUSTER, L. **Avaliação da adsorção do azul de metileno por engaçó de uva na forma in natura e na forma de carvão ativado**. Bento Gonçalves, 2021. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, 2021.

SILVA, A.; COIMBRA, R. N.; ESCAPA, C.; FIGUEIREDO, S. A.; FREITAS, O. M.; OTERO, M. Green microalgae *Scenedesmus obliquus* utilization for the adsorptive removal of nonsteroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) from water samples. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n.10, p. 1-24, 2020.

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, p. 17-36, 2020.

SPARKS, D. L. **Environmental Soil Chemistry**. 3. ed. Academic Press, 2022.

STUMM, W.; MORGAN, J. J. **Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters**. 3. ed. John Wiley & Sons, 2012.

SULTHANA, R.; TAQUI, S. N.; SYED, U. T.; KHAN, T. M. Y.; KHADAR, S. D. A.; MOKASHI, I.; SHAHAPURKAR, K.; KALAM, M. A.; MURTHY, H. C. A.; SYED, A. A. Adsorption of Crystal Violet Dye from Aqueous Solution using Industrial Pepper Seed Spent: Equilibrium, Thermodynamic, and Kinetic Studies. **Adsorption Science & Technology**, v. 22, n.1, p. 1-20, 2022.

THOMMES, M.; KANEKO, K.; NEIMARK, A. V.; OLIVIER, J. P.; RODRIGUEZ-REINOSO, F.; ROUQUEROL, J.; SING, K. S. W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v. 87, n. 9-10, p. 1051-1069, 2015.

UDDIN, M. J.; JEONG, Y. Urban River pollution in Bangladesh during last 40 years: potential public health and ecological risk, present policy, and future prospects toward smart water management. **Heliyon**, v. 7, n. 1, p. 1-23, 2021.

VAZ-JÚNIOR, S. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2020. 26 p.

VOUDRIAS, E.; FYTIANOS, K.; BOZANI, E. Sorption-desorption isotherms of dyes from aqueous solutions and wastewaters with different sorbent materials. **Global Nest: International Journal**, v. 4, n.1, p. 75-83, 2002.