



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

CLAUDIANE FELIS CARNEIRO DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DO USO DA VAGEM DA ALGAROBA (*Prosopis Juliflora*), COMO
ADSORVENTE PARA A REMOÇÃO DE CORANTES TÊXTEIS, PRESENTES EM
ÁGUAS RESIDUÁRIAS**

CAMPINA GRANDE - PB

2023

CLAUDIANE FELIS CARNEIRO DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DO USO DA VAGEM DA ALGAROBA (*Prosopis Juliflora*), COMO ADSORVENTE PARA A REMOÇÃO DE CORANTES TÊXTEIS, PRESENTES EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) apresentado a Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira.

CAMPINA GRANDE – PB

2023

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

O48a Oliveira, Claudiane Felis Carneiro de.

Avaliação do uso da vagem da algaroba (*Prosopis Juliflora*), como adsorvente para a remoção de corantes têxteis, presentes em águas residuárias [manuscrito] / Claudiane Felis Carneiro de Oliveira. - 2023.

22 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2023.

"Orientação : Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira, Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT. "

1. Algaroba. 2. Adsorção. 3. Planejamento fatorial. 4. Corante. I. Título

21. ed. CDD 628.162

CLAUDIANE FELIS CARNEIRO DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DO USO DA VAGEM DA ALGAROBA (*Prosopis Juliflora*), COMO ADSORVENTE PARA A REMOÇÃO DE CORANTES TÊXTEIS, PRESENTES EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) apresentado a Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Área de concentração: Tratamento de águas residuárias.

Aprovada em: 24/11/2023.

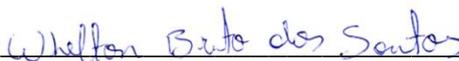
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Marcello Maia de Almeida
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Whelton Brito dos Santos
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

CAMPINA GRANDE – PB

2023

À minha família, pelo amor, apoio,
incentivo e paciência, DEDICO.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Curvas de cinética de secagem do adsorvente em estufa de recirculação de ar	12
Figura 2 - Modelos de Page, Midilli, Logarítmico e Newton ajustados aos dados de secagem da vagem da algaroba na temperatura de 60°C	13
Figura 3 – Modelos de Page, Midilli, Logarítmico e Newton ajustados aos dados de secagem da vagem da algaroba na temperatura de 70°C	13
Figura 4 – Modelos de Page, Midilli, Logarítmico e Newton ajustados aos dados de secagem da vagem da algaroba na temperatura de 80°C	14
Figura 5 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para QT com $\alpha = 0,05$	17
Figura 6 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para %RED com $\alpha = 0,05$..	17
Figura 7 – Gráfico de contorno para variável dependente QT analisando as interações entre: (a) massa e concentração; (b) massa e tempo.....	19
Figura 8 – Gráfico de contorno para variável dependente %RED analisando as interações entre: (a) massa e concentração; (b) massa e tempo.....	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Intervalo de tempo utilizado para pesagem do material durante a secagem.....	10
Tabela 2 – Valores codificados e reais das variáveis operacionais dos experimentos de adsorção.....	11
Tabela 3 – Comparação dos parâmetros dos modelos de secagem da vagem da algaroba com os dados obtidos nos experimentos realizados a 60, 70 e 80°C.....	14
Tabela 4 – ANOVA e coeficiente de determinação dos modelos de Page, Midilli, Logarítmico e Newton para a secagem da vagem da algaroba a 60°C.....	15
Tabela 5 – ANOVA e coeficiente de determinação dos modelos de Page, Midilli, Logarítmico e Newton para a secagem da vagem da algaroba a 70°C.....	15
Tabela 6 – ANOVA e coeficiente de determinação dos modelos de Page, Midilli, Logarítmico e Newton para a secagem da vagem da algaroba a 80°C.....	15
Tabela 7 – Planejamento experimental para as respostas QT e %RED.....	16
Tabela 8 – Efeitos estimados e coeficientes de QT.....	18
Tabela 9 – Efeitos estimados e coeficientes de %RED.....	18
Tabela 10 – ANOVA e coeficiente de determinação do planejamento fatorial para as variáveis dependentes QT e %RED.....	20

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. METODOLOGIA	9
2.1. Preparo do material adsorvente.....	9
2.2. Estudo da secagem da vagem de algaroba	9
2.3. Preparação do adsorvato	10
2.4. Ensaio de adsorção.....	10
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	11
3.1. Cinética de secagem da vagem da algaroba.....	11
3.2. Avaliação dos modelos de secagem	12
3.3. Matriz do planejamento experimental.....	16
3.4. Estudo da adsorção	17
4. CONCLUSÃO	20
REFERÊNCIAS.....	21

AVALIAÇÃO DO USO DA VAGEM DA ALGAROBA (*Prosopis Juliflora*), COMO ADSORVENTE PARA A REMOÇÃO DE CORANTES TÊXTEIS, PRESENTES EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS

EVALUATION OF ALGAROBA POD (*Prosopis Juliflora*) AS AN ADSORBENT FOR REMOVING TEXTILE DYES FROM WASTEWATER

Claudiane Felis Carneiro de Oliveira¹
Fernando Fernandes Vieira²

RESUMO

A indústria têxtil é um dos setores mais proeminentes no Brasil em termos de geração de empregos, possuindo um significativo impacto socioeconômico. A presença de corantes nos efluentes industriais têxteis pode representar sérios problemas ambientais, pois esses corantes podem ser tóxicos e persistentes no meio ambiente, prejudicando a qualidade da água e afetando a vida aquática. O processo de adsorção se destaca como uma técnica eficaz para remover corantes dos efluentes têxteis. A adsorção envolve a adesão de partículas ou substâncias dissolvidas à superfície de um material adsorvente, que pode ser de origem mineral ou um bioadsorvente de baixo custo. Nesta pesquisa avaliou-se a secagem da vagem da algaroba nas temperaturas 60, 70 e 80°C, bem como seu potencial como adsorvente natural do corante têxtil sintético. Dentre os modelos utilizados para descrever a cinética de secagem do material, o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais. Por meio de planejamento fatorial do tipo 2³ analisou-se a influência da concentração do corante, da massa do adsorvente e do tempo de contato nas variáveis respostas: quantidade de corante adsorvida (QT) e redução da concentração do corante azul de metileno (%RED) onde o modelo para a adsorção de corante foi estatisticamente significativo e preditivo ao nível de confiança de 95% obtendo-se um valor máximo para a quantidade de corante adsorvido de 4,31mg.g⁻¹ e uma porcentagem de redução de corante de até 86,21%. Conclui-se que a vagem da algaroba é um adsorvente promissor na adsorção de corantes têxteis.

Palavras-Chave: algaroba; adsorção; planejamento fatorial; corante.

ABSTRACT

The textile industry is one of the most prominent sectors in Brazil in terms of job creation, having a significant socio-economic impact. The presence of dyes in textile industrial effluents can pose serious environmental problems, as these dyes can be toxic and persistent in the environment, affecting water quality and aquatic life. The adsorption process stands out as an effective technique for removing dyes from textile effluents. Adsorption involves the adherence of particles or dissolved substances to the surface of an adsorbent material, which can be of mineral origin or a low-cost bioadsorbent. In this research, the drying of algaroba pods at temperatures of 60, 70, and 80°C was evaluated, as well as their potential as a natural adsorbent for synthetic textile dye. Among the models used to describe the drying kinetics of the material,

¹ Estudante de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Estadual da Paraíba; Campina Grande, PB; claudianefelis@gmail.com;

² Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Estadual da Paraíba; Campina Grande, PB; fernando.desa@servidor.uepb.edu.br.

Midilli's model was the one that best fit the experimental data. Using factorial planning, the influence of dye concentration, adsorbent mass, and contact time on the response variables, quantity of adsorbed dye (QT) and dye concentration reduction (%RED) was analyzed. The model for dye adsorption was statistically significant and predictive at a 95% confidence interval, with a maximum value for the amount of adsorbed dye of 4.31 mg.g^{-1} and a dye reduction percentage of up to 86.21%. In conclusion, algaroba pods are a promising adsorbent for the adsorption of textile dyes.

Keywords: algaroba; adsorption; factorial planning; dye.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico acelerado e o aumento das atividades industriais são dois fatores que contribuem no agravamento do problema da contaminação da água (Silva *et al.*, 2022). O setor têxtil se destaca como grande responsável por parte desse impacto, uma vez que gera grandes volumes de efluentes com altas cargas de compostos químicos, destacando-se os corantes têxteis como os principais responsáveis pela poluição ambiental dessa atividade (Guaratini; Zanoni, 2000).

A indústria têxtil possui uma importância significativa nos setores econômicos brasileiro e mundial. As atividades têxteis possuem etapas como tingimento e acabamento que demandam elevado consumo de água como recurso fundamental para finalização desses processos (Xavier *et al.*, 2019).

A poluição hídrica provocada pelos corantes têxteis resulta em alterações nos ciclos biológicos e ao desenvolvimento da flora e fauna aquática em razão da diminuição da capacidade de fotossíntese devido à dificuldade de penetração dos raios solares na água (Kunz *et al.*, 2002).

Os corantes são substâncias que apresentam uma estrutura molecular complexa e oferecem resistência à luz, temperatura e oxidantes, o que torna essas substâncias de difícil degradação (Banerjee; Chattopadhyaya, 2017). O azul de metileno é um corante muito empregado na indústria têxtil para o tingimento de tecidos, sua ingestão pode ocasionar prejuízos à saúde humana como náuseas, enxaqueca, aumento dos batimentos cardíacos e diarreia (Silva; Oliveira, 2012).

Um método que apresenta alta eficiência no tratamento de efluentes para a remoção de corantes têxteis é a adsorção, capaz de remover toda a molécula do contaminante, além de ser uma técnica que demanda pouca área, baixo tempo de tratamento do efluente e baixo custo de aplicação (Almeida; Dilarri; Corso, 2016).

A adsorção é um método de tratamento físico-químico, onde se verifica a capacidade de um sólido em concentrar em sua superfície substâncias presentes em fluidos no estado líquido ou gasoso, permitindo assim a separação dos componentes desses fluidos (Nascimento; Lima; Vidal, 2014). A remoção de moléculas ocorre por meio de interações físicas ou químicas específicas, a depender da interação entre o adsorvente e o adsorbato, podem ser ligações iônicas ou covalentes, caracterizando a adsorção como quimiossorção, ou por forças de van der Waals e ligações por pontes de hidrogênio e ponte dissulfeto, caracterizando o processo como fisissorção (Almeida; Dilarri; Corso, 2016).

A secagem é um processo complexo envolvendo transferência de calor e massa entre o ar e o produto a ser seco, a elevação da temperatura leva ao aumento da pressão parcial de vapor do produto que tem o seu teor de umidade reduzido (Goneli *et al.*, 2014).

Nas últimas décadas tem crescido o interesse no uso de adsorventes originados a partir de resíduos agrícolas uma vez que geralmente se trata de materiais

baratos, amplamente disponíveis pois são gerados em grandes quantidades, e que possuem boa efetividade na remoção de corantes dos efluentes (Kadhom *et al.*, 2020).

A algaroba (*Prosopis juliflora*) foi introduzida no Brasil na década de 40, na Região Nordeste, com sementes trazidas do Peru e do continente africano. (Alves; Santos; Silva, 2019). A algarobeira é uma árvore da família das leguminosas (*Leguminosae*, subfamília *Mimosoideae*), do gênero *Prosopis*, resistente a longas estiagens e períodos de seca apresentando dois períodos de floração e frutificação, sendo o mais intenso durante os meses de setembro a novembro quando se observa menor precipitação (Ribaski *et al.*, 2009).

Quando cultivada de maneira controlada, a algaroba pode oferecer diversas vantagens à sociedade, incluindo o uso das vagens na alimentação de bovinos, caprinos, suínos e aves, e na produção de café, melão, farinha e aguardente, além de fornecer madeira de boa qualidade para aproveitamento na construção e produção de carvão (Drumond, 1992). Diante da busca de alternativas para o tratamento de efluentes e de materiais adsorventes com boa eficiência e de baixo custo, a vagem da algaroba é um material de ampla disponibilidade e que se adequa as necessidades atuais (Gentil *et al.*, 2018).

Nesse contexto, o presente trabalho objetivou fazer a secagem da vagem da algaroba e avaliar o seu potencial como adsorvente, para a remoção de corante têxteis presente em águas residuárias.

2. METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA), pertencente ao Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB).

2.1. Preparo do material adsorvente

Para a produção do material adsorvente foi utilizada como matéria prima a vagem da algaroba, obtida nas algarobeiras do Campus I da Universidade Estadual da Paraíba e nas árvores dos entornos do Açude de Bodocongó na cidade de Campina Grande – Paraíba.

A vagem foi inicialmente triturada com o objetivo de facilitar o processo de lavagem e para obtenção de um material homogêneo durante a secagem, em seguida lavada com água de abastecimento para remoção das impurezas e com água destilada. Após a lavagem, o material foi colocado em bandejas de alumínio e exposto a temperatura ambiente durante aproximadamente 24 horas com o objetivo de diminuir a umidade inicial e encurtar o tempo de secagem na estufa.

2.2. Estudo da secagem da vagem de algaroba

Inicialmente foi feita a determinação da umidade inicial da vagem triturada com o uso de um determinador de umidade por infravermelho. A secagem foi realizada com amostras de 100g em uma estufa com recirculação de ar nas temperaturas de 60, 70 e 80°C, até que o material apresentasse uma massa constante e, por fim, o material seco foi armazenado em sacos plásticos fechados.

Durante o processo de secagem, o material foi retirado da estufa e pesado, em determinados intervalos de tempo, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Intervalo de tempo utilizado para pesagem do material durante a secagem

Tempo	Pesagem
Primeira hora	5 em 5 minutos
Segunda hora	10 em 10 minutos
Terceira hora	15 em 15 minutos
A partir da quarta hora	30 em 30 minutos

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Os dados experimentais foram ajustados aos modelos matemáticos de Page, Midilli, Logarítmico e Newton. A estimativa dos parâmetros dos modelos cinéticos foi obtida por regressão não linear com o auxílio do *software* Minitab disponibilizado pelo Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA/UEPB).

2.3. Preparação do Adsorvato

Inicialmente foi preparado um efluente têxtil sintético (ETS) através da dissolução de 500mg do corante azul de metileno em 1,0L de água destilada, esta solução foi acondicionada e utilizada para o preparo das amostras dos ensaios através de diluição em água destilada.

Para caracterização ETS, foi realizada a varredura deste visando a determinação do comprimento de onda máximo, sendo 610nm o comprimento de onda que apresentou maior absorção. Posteriormente, foi construída uma curva de calibração, utilizando soluções nas concentrações de 4, 8, 12, 16 e 20mg.L⁻¹. Para obtenção da absorbância durante a varredura e construção da curva de calibração, foi utilizado espectrofotômetro.

2.4. Ensaios de adsorção

Após a secagem da algaroba, o material adsorvente obtido na secagem a 70°C foi testado em diferentes condições operacionais de acordo com o planejamento experimental. Foi elaborado um planejamento fatorial do tipo 2³, com 3 repetições no ponto central, totalizando 11 experimentos, afim de verificar a influência das variáveis independentes: massa do adsorvente, concentração do corante e tempo, sobre duas variáveis dependentes: a quantidade de corante (azul de metileno) adsorvido por unidade de massa do adsorvente (QT) e a porcentagem da redução da concentração da solução de corante têxtil (%RED), a fim de determinar as melhores condições de trabalho.

Os experimentos de adsorção foram realizados sobre uma mesa agitadora orbital mantidos sob agitação de 120rpm, usando-se frascos de Erlenmeyers de 125mL contendo 25mL da solução de corante. As condições de cada Erlenmeyer foram definidas conforme a matriz do planejamento experimental e as variáveis independentes utilizadas para este estudo são apresentadas na Tabela 2 com valores codificados e reais.

Tabela 2 - Valores codificados e reais das variáveis operacionais dos experimentos de adsorção

Pontos	-1	+1
Massa do Adsorvente (g)	0,10	0,20
Concentração de corante (mg.L ⁻¹)	10	20
Tempo (min)	10	20

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Após o tempo de contato estabelecido, todas as amostras foram filtradas e levadas para centrifugação por um período de 30 minutos em rotação de 2500rpm, por fim, as concentrações de corante nas soluções foram determinadas por espectrofotometria. A porcentagem de redução do corante e a quantidade de corante adsorvida por unidade de massa do adsorvente foram calculadas pelas Equações 1 e 2, respectivamente.

$$\%RED = \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100\% \quad (1)$$

$$QT = \frac{V \times (C_o - C_t)}{m} \quad (2)$$

Onde, %RED é a porcentagem de redução da concentração do corante (%), QT a quantidade de corante adsorvido pela vagem da algaroba (mg.g⁻¹), C_o a concentração inicial do corante (mg.L⁻¹), C_t a concentração do corante em um instante de tempo t (mg.L⁻¹), m a massa do adsorvente em base seca (g), e V o volume da solução do corante (L).

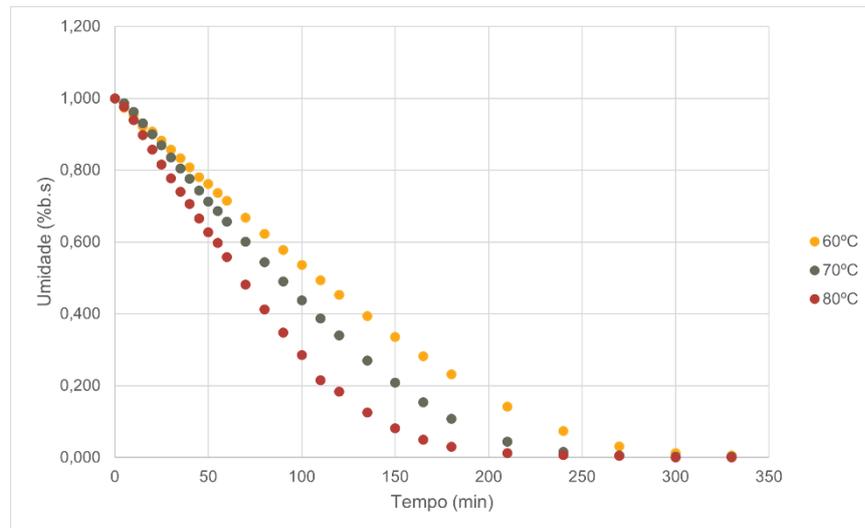
A influência das variáveis independentes foi analisada com o auxílio do *software* Minitab.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Cinética de secagem da vagem da algaroba

A Figura 1 ilustra a variação da umidade ao longo do tempo durante os experimentos de secagem da vagem de algaroba em uma estufa com recirculação de ar, realizados a temperaturas de 60, 70 e 80°C.

Figura 1 – Curvas de cinética de secagem do adsorvente em estufa de recirculação de ar



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Verifica-se que o aumento da temperatura durante a secagem da vagem de algaroba influencia na velocidade do processo, resultando na maior rapidez na secagem do material. Além disso, a temperatura de secagem também influencia a umidade de equilíbrio do material, com valores mais baixos observados em temperaturas mais elevadas.

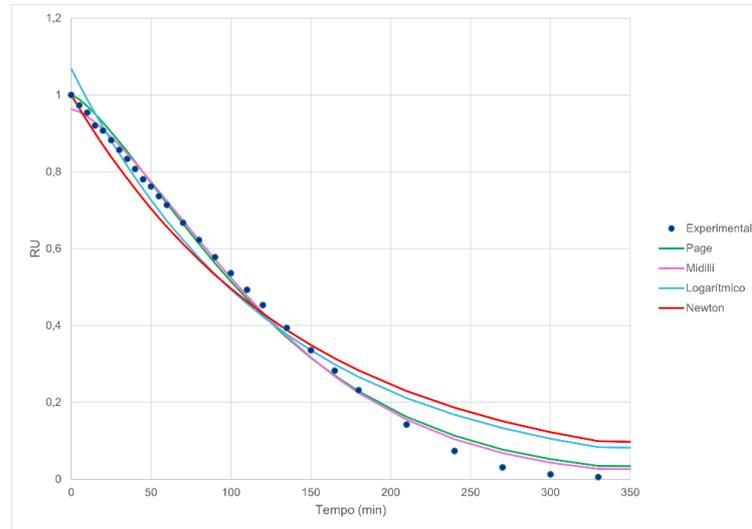
Nascimento *et al.* (2015) ao estudar a secagem da vagem da algaroba nas temperaturas 60, 70 e 80°C constatou que o aumento da temperatura promove uma diminuição no tempo de secagem.

A umidade inicial da vagem da algaroba foi medida em balança de infravermelho observou-se que a água contida na matéria-prima lavada representa cerca de 32,30% de sua massa total.

3.2. Avaliação dos modelos de secagem

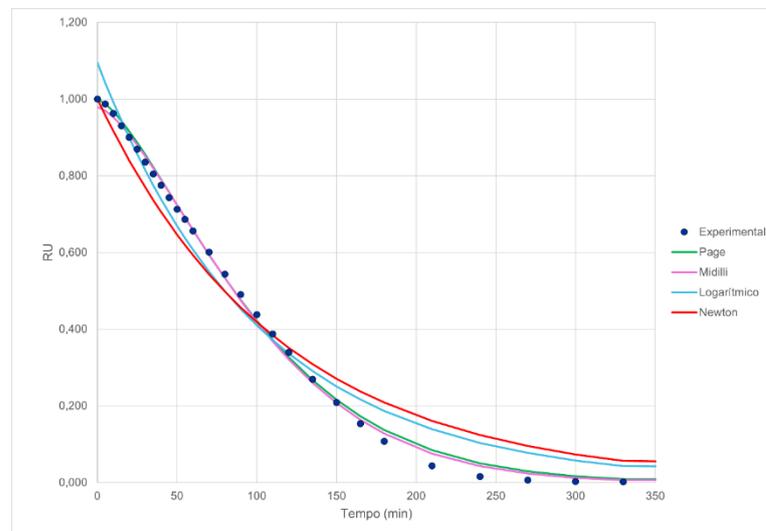
Nas Figuras 2, 3 e 4 são apresentados, respectivamente, os dados experimentais obtidos da cinética da secagem a 60, 70 e 80°C que foram ajustados aos modelos empíricos de Page, Midilli, Logarítmico e Newton.

Figura 2 - Modelos de Page, Midilli, Logarítmico e Newton ajustados aos dados de secagem da vagem da algaroba na temperatura de 60°C



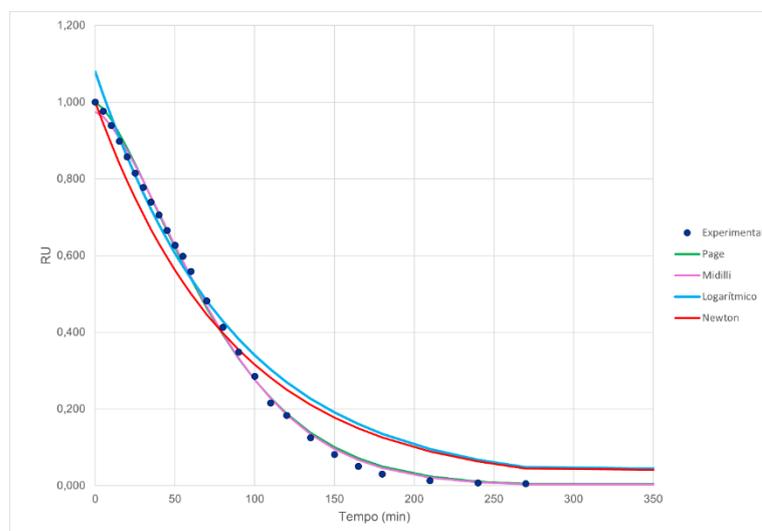
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 3 – Modelos de Page, Midilli, Logarítmico e Newton ajustados aos dados de secagem da vagem da algaroba na temperatura de 70°C



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 4 – Modelos de Page, Midilli, Logarítmico e Newton ajustados aos dados de secagem da vagem da algaroba na temperatura de 80°C



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Observou-se que para todas as temperaturas de secagem os modelos de Page e Midilli apresentaram o melhor ajuste aos dados.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros encontrados a partir dos resultados experimentais ajustados para cada um dos modelos aplicados.

Tabela 3 – Comparação dos parâmetros dos modelos de secagem da vagem da algaroba com os dados obtidos nos experimentos realizados a 60, 70 e 80°C

Temperatura	Modelo	a (adm)	k (min ⁻¹)	n (adm)	b (min ⁻¹)	c (adm)
60°C	Page	-	0,0013	1,3586	-	-
	Midilli	0,9631	0,0007	1,4819	0,00	-
	Logarítmico	1,0686	0,0077	-	-	0,00
	Newton	-	0,0070	-	-	-
70°C	Page	-	0,0012	1,4197	-	-
	Midilli	0,9792	0,0009	1,4925	0,00	-
	Logarítmico	1,0944	0,0098	-	-	0,00
	Newton	-	0,0087	-	-	-
80°C	Page	-	0,0017	1,4347	-	-
	Midilli	0,9751	0,0012	1,5094	0,00	-
	Logarítmico	1,0794	0,0115	-	-	0,00
	Newton	-	0,0115	-	-	-

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Nas Tabelas 4, 5 e 6 encontram-se a análise de variância dos modelos a partir do ajuste das equações matemáticas por regressão não linear aos dados de cinética de secagem da vagem da algaroba e o coeficiente de determinação (R^2) com nível de significância de 5%.

Tabela 4 – ANOVA e coeficiente de determinação dos modelos de Page, Midilli, Logarítmico e Newton para a secagem da vagem da algaroba a 60°C

	Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	Teste F	R ²
Page	Regressão	3,1302	1	3,1302	7029,82	0,9962
	Resíduo	0,0120	27	0,0004	-	
	Total	3,1423	28	-	-	
Midilli	Regressão	2,8793	1	2,8793	10984,78	0,9976
	Resíduo	0,0068	26	0,0003	-	
	Total	2,8861	27	-	-	
Logarítmico	Regressão	3,0890	1	3,0890	1419,64	0,9813
	Resíduo	0,0587	27	0,0022	-	
	Total	3,1477	28	-	-	
Newton	Regressão	2,3484	1	2,3484	1802,28	0,9852
	Residual	0,0352	27	0,0013	-	
	Total	2,3835	28	-	-	

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 5 – ANOVA e coeficiente de determinação dos modelos de Page, Midilli, Logarítmico e Newton para a secagem da vagem da algaroba a 70°C

	Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	Teste F	R ²
Page	Regressão	3,4705	1	3,4705	16152,78	0,9983
	Resíduo	0,0058	27	0,0002	-	
	Total	3,4763	28	-	-	
Midilli	Regressão	3,4442	1	3,4442	16932,52	0,9984
	Resíduo	0,0055	27	0,0002	-	
	Total	3,4497	28	-	-	
Logarítmico	Regressão	3,1109	1	3,1109	1552,68	0,9829
	Resíduo	0,0541	27	0,0020	-	
	Total	3,1650	28	-	-	
Newton	Regressão	2,5347	1	2,5347	2067,94	0,9871
	Resíduo	0,0331	27	0,0012	-	
	Total	2,5678	28	-	-	

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 6 – ANOVA e coeficiente de determinação dos modelos de Page, Midilli, Logarítmico e Newton para a secagem da vagem da algaroba a 80°C

	Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	Teste F	R ²
Page	Regressão	3,2257	1	3,2257	15066,43	0,9983
	Residual	0,0054	25	0,0002	-	
	Total	3,2311	26	-	-	
Midilli	Regressão	3,1729	1	3,1729	19727,66	0,9987
	Residual	0,0040	25	0,0002	-	
	Total	3,1769	26	-	-	
Logarítmico	Regressão	2,7154	1	2,7154	1736,95	0,9858
	Residual	0,0391	25	0,0016	-	
	Total	2,7545	26	-	-	
Newton	Regressão	2,3297	1	2,3297	1740,40	0,9856
	Residual	0,0335	25	0,0013	-	
	Total	2,3632	26	-	-	

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Todos os modelos investigados exibiram uma concordância satisfatória com os dados experimentais. Contudo, os modelos propostos por Page e Midilli destacaram-se ao apresentarem resultados superiores, conforme evidenciado pelos critérios estatísticos do coeficiente de determinação (R^2) em todas as temperaturas empregadas no processo de secagem. Vale ressaltar que, dado o caráter não linear desses modelos, a utilização exclusiva do R^2 como critério de análise pode ser insuficiente. Diante disso, a avaliação do teste F revelou que o modelo de Midilli demonstrou o ajuste mais eficaz aos dados de secagem da vagem de algaroba.

Conforme observado por Neto, Scarminio e Bruns (2001), a significância estatística de um modelo é estabelecida quando o valor calculado de F é superior ao valor tabelado. Além disso, a validade preditiva do modelo é confirmada quando a razão entre $F_{\text{calculado}}$ e F_{tabelado} é superior a 10. Observa-se que a razão entre $F_{\text{calculado}}$ e F_{tabelado} foi superior a 10 confirmando que para um nível de confiabilidade de 95% os modelos utilizados são estatisticamente significativos e preditivos para representar a secagem da vagem da algaroba em estufa de recirculação de ar e a porcentagem de variação explicada pelos modelos (R^2) é superior a 99,7% para todas as temperaturas.

3.3. Matriz do planejamento experimental

As variáveis utilizadas foram: massa do adsorvente, concentração do corante e tempo de mistura, conforme as matrizes codificadas do planejamento experimental, junto com os valores da quantidade de corante adsorvido por unidade de massa do adsorvente (QT) e a porcentagem da redução da concentração da solução de corante (%RED), que são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Planejamento experimental para as respostas QT e %RED

Experimento	Massa (g)	Concentração da solução (mg.L ⁻¹)	Tempo (min)	QT (mg.g ⁻¹)	%RED
1	0,1	10	10	1,9242	76,97
2	0,2	10	10	1,0095	80,76
3	0,1	20	10	3,5799	71,60
4	0,2	20	10	1,9512	78,05
5	0,1	10	20	2,0570	82,28
6	0,2	10	20	0,9953	79,62
7	0,1	20	20	4,3103	86,21
8	0,2	20	20	2,0840	83,36
9	0,15	15	15	2,0212	80,85
10	0,15	15	15	1,9580	78,32
11	0,15	15	15	2,0212	80,85

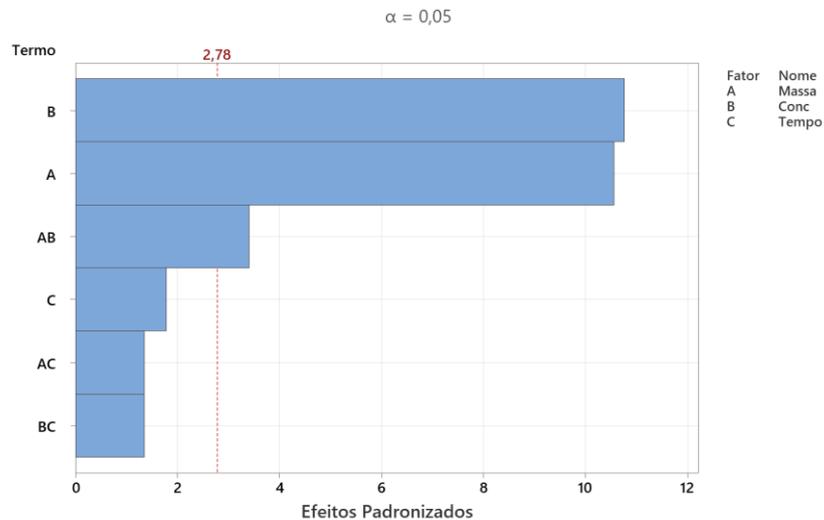
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A partir dos resultados observados, é possível verificar que o experimento 7, utilizando 0,1g do adsorvente, concentração da solução de corante 20mg.L⁻¹ e tempo de contato de 20 min, apresenta as melhores condições de adsorção para ambas as respostas.

3.4. Estudo da adsorção

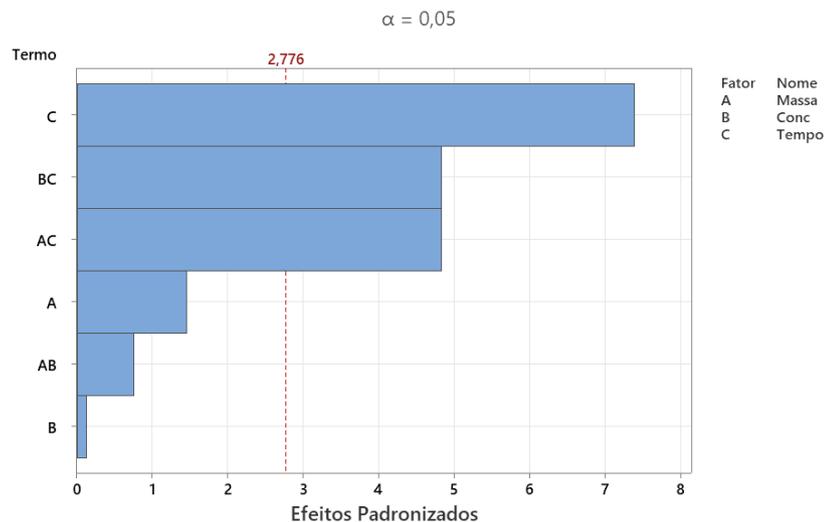
Nas Figuras 5 e 6, é possível observar visualmente a influência das variáveis independentes (massa, concentração e tempo) nas variáveis resposta (QT e %RED), apresentadas pelo gráfico de Pareto. Para a variável QT, na Figura 5, observa-se que as variáveis concentração, massa, tempo e a interação massa-concentração são estatisticamente significantes com nível de confiança de 95%. Na Figura 6, para a variável redução, foi verificado que apenas a variável independente tempo e as interações concentração-tempo e massa-tempo são estatisticamente significativas com nível de confiança de 95%.

Figura 5 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para QT com $\alpha = 0,05$



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 6 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para %RED com $\alpha = 0,05$



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

As Tabelas 8 e 9 apresentam os valores da estimativa dos efeitos principais dos fatores envolvidos em QT e %RED, respectivamente. Para a variável QT, concentração e tempo apresentaram efeito positivo, logo o aumento dessas variáveis será favorável para a remoção de corante, já a massa apresentou efeito negativo,

indicando que a diminuição desse parâmetro será conveniente para o processo. Na variável %RED, verificou-se que o tempo apresentou efeito positivo, indicando que o aumento dessa variável é favorável ao processo de redução.

Tabela 8 – Efeitos estimados e coeficientes de QT

Variáveis	Efeitos	Coeficientes	Desvio Coef.	T	P
Constante		2,2389	0,0342	65,49	0,00
(1) Massa	-1,4578	-0,7289	0,0342	-21,32	0,00
(2) Concentração	1,4849	0,7424	0,0342	21,72	0,00
(3) Tempo	0,2455	0,1227	0,0342	3,59	0,037
1*2	-0,4697	-0,2348	0,0342	-6,87	0,006
1*3	-0,1862	-0,0931	0,0342	-2,72	0,072
2*3	0,1862	0,0931	0,0342	2,72	0,072

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

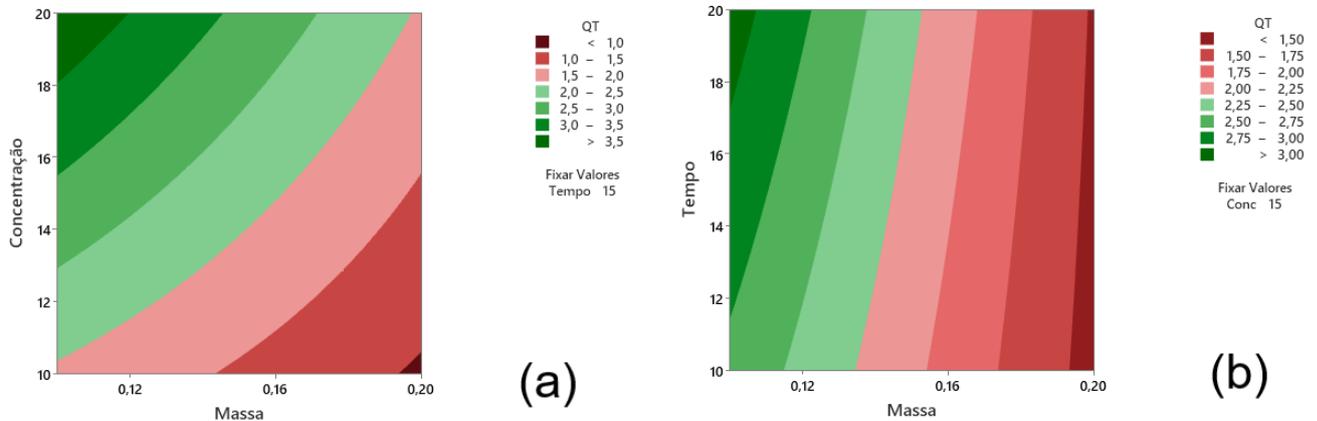
Tabela 9 – Efeitos estimados e coeficientes de %RED

Variáveis	Efeitos	Coeficientes	Desvio Coef.	T	P
Constante		79,855	0,469	170,27	0,00
(1) Massa	1,186	0,593	0,469	1,26	0,295
(2) Concentração	-0,104	-0,052	0,469	-0,11	0,919
(3) Tempo	6,024	3,012	0,469	6,42	0,008
1*2	0,617	0,308	0,469	0,66	0,558
1*3	-3,937	-1,968	0,469	-4,20	0,025
2*3	3,937	1,968	0,469	4,20	0,025

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Nos gráficos de contorno apresentados na Figura 7, verifica-se a influência das variáveis concentração-massa e tempo-massa na variável resposta QT. Na Figura 7(a), observa-se a relação entre concentração e massa, onde a medida em que se diminui a massa e eleva-se a concentração, a quantidade de corante adsorvido aumenta, já a Figura 7(b) relaciona tempo e massa e mostra que ao aumentar o tempo e diminuir a massa tem-se um maior valor para QT, confirmando assim os resultados apresentados na Tabela 8.

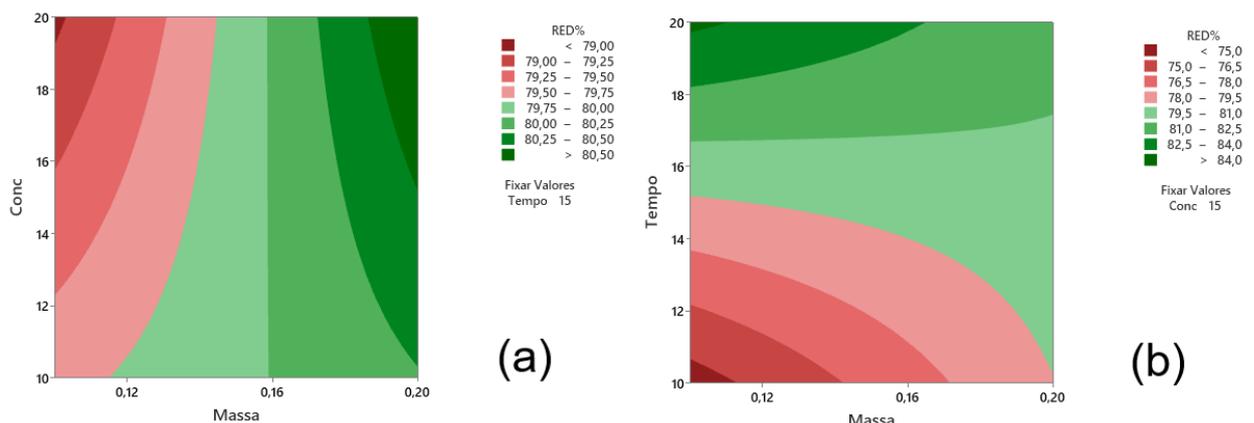
Figura 7 – Gráfico de contorno para variável dependente QT analisando as interações entre: (a) massa e concentração; (b) massa e tempo



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A Figura 8 apresenta os gráficos de contorno para a redução da concentração de corante, a Figura 8(a) apresenta a relação entre concentração e massa e mostra que para maiores valores desses parâmetros, tem-se maior redução da concentração de corante, já a Figura 8(b) relaciona tempo e massa e evidencia que para tempos maiores e massas menores, a redução apresenta valores mais altos.

Figura 8 – Gráfico de contorno para variável dependente %RED analisando as interações entre: (a) massa e concentração; (b) massa e tempo



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A Tabela 10 apresenta os parâmetros da análise de variância para os ajustes do modelo tendo como variáveis dependentes QT e %RED, fazendo a comparação dos valores $F_{\text{calculado}}$ e F_{tabelado} observa-se que o modelo para a resposta QT é estatisticamente significativo e preditivo, pois a razão $F_{\text{calculado}}$ por F_{tabelado} para a regressão foi maior que 10 ao nível de confiança de 95%, logo, o modelo proposto é válido para o processo de adsorção de corantes têxteis e significativo para realização de previsões.

Tabela 10 – ANOVA e coeficiente de determinação do planejamento fatorial para as variáveis dependentes QT e %RED

	Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma quadrática	Média quadrática	Fcal/Ftab	R ²	R ² _{ajust}
QT	Regressão	6	9,485	1,581			
	Resíduos	4	0,028	0,007	36,580	0,984	0,959
	Total	10	9,512				
%RED	Regressão	6	138,166	23,028			
	Resíduos	4	5,329	1,332	2,805	0,963	0,972
	Total	10	143,495				

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A partir da análise estatística, foi possível determinar nas Equações 3 e 4 modelos matemáticos que simulam a influência das variáveis independentes na quantidade de corante adsorvida e na redução de corante, respectivamente.

$$QT = 2,1738 - 0,7289x_1 + 0,7424x_2 + 0,1227x_3 - 0,2348x_1x_2 - 0,0931x_1x_3 + 0,0931x_2x_3 \quad (3)$$

$$\%RED = 79,896 + 0,593x_1 - 0,052x_2 + 3,012x_3 + 0,308x_1x_2 - 1,968x_1x_3 + 1,968x_2x_3 \quad (4)$$

Onde,

x₁: massa;

x₂: concentração;

x₃: tempo.

4. CONCLUSÃO

Os valores do R² e Teste F mostraram que o modelo de Midilli é o mais adequado para descrever os dados cinéticos obtidos no processo de secagem da vagem da algaroba para as temperaturas de 60, 70 e 80°C.

A aplicação do planejamento fatorial nos ensaios de adsorção revelou-se eficaz na avaliação da influência de três variáveis: a massa do adsorvente (vagem da algaroba), a concentração do corante (azul de metileno) e o tempo de contato entre o adsorvente e o adsorvato. Essas variáveis afetaram diretamente duas medidas de interesse: a quantidade de corante adsorvido (QT) e a redução da concentração de corante (%RED). No processo de adsorção do corante, as variáveis massa e concentração mostraram-se estatisticamente significativas, com um intervalo de confiança de 95%, enquanto para a redução da concentração de corante, a variável tempo foi estatisticamente significativa, também com um intervalo de confiança de 95%.

Observou-se que para resultados melhores de QT e %RED, o planejamento apontou que maiores concentrações do corante, tempo de contato mais prolongado e menores valores de massa tornam o processo de adsorção mais eficiente, obtendo-se um valor máximo para a quantidade de corante adsorvido de 4,31 mg.g⁻¹ e uma porcentagem de redução de corante de até 86,21%.

Diante dos resultados obtidos conclui-se que a vagem da algaroba, nas condições utilizadas nessa pesquisa, se mostrou um adsorvente promissor na adsorção de corantes têxteis em águas residuárias.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, E. J. R.; DILARRI, G.; CORSO, C. R. **A indústria têxtil no Brasil: Uma revisão dos seus impactos ambientais e possíveis tratamentos para os seus efluentes**. Projeto Qualidade da Água, Boletim das Águas - Ministério Público Federal, Brasília/DF, p.1. 2016.
- ALVES, A. C. de M.; SANTOS, J. C. M. dos; SILVA, J. N. (2019). **Estudo do Monitoramento das Aplicações Tecnológicas da Prosopis Juliflora (Algaroba)**. Cadernos De Prospecção, 12(2), 374. <https://doi.org/10.9771/cp.v12i2.27282>
- BANERJEE S; CHATTOPADHYAYA M. C. **Adsorption characteristics for the removal of a toxic dye, tartrazine from aqueous solutions by a low cost agricultural by-product**. Arabian Journal of Chemistry 10, S1629-S1638, 2017.
- DRUMOND, M. A.; **Algaroba - Uma alternativa para a região semi-árida**. Petrolina: Embrapa Florestas, Comunicado Técnico, n. 51. 1992. p. 1-2.
- GENTIL, Y. L.; COELHO, L. F. O; OLIVEIRA, A. G.; FIRMINO, L. Q.; OLIVEIRA, A. M. B. M. **Remediação do íon cobre por carvão vegetal ativado em águas residuais**. Anais III CONAPESC Campina Grande: Realize Editora, 2018.
- GONELI, A.L.D.; VIEIRA, M. C.; VILHASANTI, H. C.B.; GONÇALVES, A. A., **Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem**. Redalyc, v.44, n.1, p.56-64, fev. 2014.
- GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B.; **Corantes Têxteis**. Química nova. São Paulo, v.23, n.1, p. 71-78, 2000
- KADHOM, M.; ALBAYATI, N.; ALALWAN, H; AL-FURAIJI, M. (2020). **Removal of dyes by agricultural waste**. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 16, 100259. doi:10.1016/j.scp.2020.100259.
- KUNZ, A.; PERALTA-ZAMORA; P. MORAES, S. G.; DURÁN, N. (2002). **Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis**. Química nova, v.25, 78-82.
- NASCIMENTO, A. P. S.; LIMA, A. K. S.; CAVALCANTI, C. F.; GUSMÃO, R. P. Cinética de secagem de vagens de algaroba (*Prosopis juliflora* SW). **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, [S. l.], v. 10, n. 5, p. 115–119, 2015. DOI: 10.18378/rvads.v10i5.3338. Disponível em: <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/3338>. Acesso em: nov. 2023.
- NASCIMENTO, R.F.; LIMA, A.C.A.; VIDAL, C.B.; **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014.
- NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas: Unicamp, 2001, 401p.
- RIBASKI, J.; DRUMOND, M. A.; OLIVEIRA, V. R.; NASCIMENTO, C. E. S.; **Algaroba (Prosopis juliflora): árvore de uso múltiplo para a região semiárida brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, Comunicado Técnico, n. 240. 2009. 8 p.
- SILVA, J. R. R.; GAVAZZONI, L; FERREIRA, A. P.; BERSANETTE G. D., PERALTA R. M.; **Biorremediação e biodegradação de efluentes têxteis (corantes**

sintéticos). In: PERALTA, R. M. (org.). Biodegradação e Biorremediação: ênfase em bactérias e fungos. 2022. cap. 6, p. 93-113.

SILVA, W. L. L. da; OLIVEIRA, S. P. de. **Modificação das características de adsorção do bagaço de cana para remoção de azul de metileno de soluções aquosas**. Scientia Plena, [S. l.], v. 8, n. 9, 2012. Disponível em: <https://www.scientiaplena.org.br/sp/article/view/831>. Acesso em: 5 dez. 2023.

XAVIER, V. F.; FERRI, J. F. C.; CHIARI, E. C. S.; MAINTINGUER, S. I.; **O uso sustentável da água: a produção mais limpa em uma indústria têxtil do estado de São Paulo**. Revista Brasileira Multidisciplinar, v. 22, n. 3, p. 119-143, 2019.