



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS PAULISTANA
CURSO LICENCIATURA EM QUÍMICA

MATEUS DE SOUSA RODRIGUES

ADSORÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO UTILIZANDO CACTO
MANDACARU (*CEREUS JAMACARU*): UMA PROPOSTA PARA AULAS
PRÁTICAS DE QUÍMICA AMBIENTAL

PAULISTANA

2022

MATEUS DE SOUSA RODRIGUES

ADSORÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO UTILIZANDO CACTO
MANDACARU (*CEREUS JAMACARU*): UMA PROPOSTA PARA AULAS PRÁTICAS
DE QUÍMICA AMBIENTAL

Trabalho de Conclusão de Curso (artigo científico)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Licenciatura em Química
do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Piauí, Campus Paulistana.

Orientador: Prof. Me. Francisco Fernando Silveira.
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Karine Oliveira Moura.

PAULISTANA

2022

ADSORÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO UTILIZANDO CACTO MANDACARU (*CEREUS JAMACARU*): UMA PROPOSTA DE AULAS PRÁTICAS DE QUÍMICA AMBIENTAL

Mateus de Sousa Rodrigues¹

Francisco Fernando Silveira²

Karine Oliveira Moura³

RESUMO

Com a contínua expansão da economia, indústria e agricultura no decorrer dos tempos, o meio ambiente vem sendo cada vez mais destruído. Dessa forma, a educação ambiental se torna muito importante, uma vez que, permite a formação de indivíduos que passem a respeitar e conservar a natureza. Então, é necessária uma formação de excelência, em especial para a educação ambiental de professores de ensino fundamental e médio. Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo averiguar se cacto mandacaru (*Cereus Jamacaru*) pode ser usado como adsorvente no processo de adsorção do corante azul de metileno, levando em consideração os parâmetros concentração inicial, tempo de contato e massa do adsorvente. Analisando os parâmetros de custo-benefício, relação entre experimento e a ementa da disciplina e geração de resíduos, objetivou-se ainda avaliar a potencialidade deste experimento para auxiliar no ensino da disciplina de Química Ambiental para os graduandos em Licenciatura em Química. Os resultados obtidos mostraram que a adsorção do corante selecionado é rápida, apresenta uma capacidade de adsorção de 36,18 mg g⁻¹ com o índice de remoção superior a 90%, tendo o modelo de Pseudo-Segunda Ordem o mais adequado aos resultados experimentais, sugerindo que o processo é químico. A avaliação dos parâmetros investigados (custo-benefício, relação entre experimento e a ementa da disciplina e geração de resíduos) mostrou que o experimento é promissor em relação ao potencial deste, para ser utilizado para auxiliar no ensino da disciplina de Química Ambiental.

Palavras-chave: Química Ambiental; Ensino de Química; Adsorção.

ABSTRACT

With the continuous expansion of the economy, industry and agriculture over time, the environment has been increasingly destroyed. In this way, environmental education becomes very important, since it allows the formation of individuals who start to respect and conserve nature. Therefore, excellent training is needed, especially for environmental education for primary and secondary school teachers. In this sense, this work aimed to determine whether cactus mandacaru (*Cereus Jamacaru*) can be used as an adsorbent in the process of adsorption of the methylene blue dye, taking into account the parameters initial concentration, contact time and mass of the adsorbent. Evaluating the cost-benefit parameters, the relationship between the experiment and the course's syllabus and waste generation, the objective was to evaluate the potential of this experiment to assist in the teaching of the Environmental Chemistry course for undergraduate students in Chemistry. The results obtained showed that the adsorption of the selected dye is fast, it has an adsorption capacity of 36.18 mg g⁻¹ with a

¹ Discente do curso de licenciatura em Química do IFPI Campus Paulistana. capau.20181quimi0038@aluno.ifpi.edu.br.

² Docente do IFPI Campus Paulistana. fernando.silveira@ifpi.edu.br.

³ Docente do IFS Campus Glória. karine.moura@ifs.edu.br.

removal index greater than 90%, with the Pseudo-Second Order model being the most suitable for the results. experimental data, suggesting that the process is chemical. The evaluation of the investigated parameters (cost-benefit, relation between experiment and the discipline's syllabus and waste generation) showed that the experiment is promising in relation to its potential to be used to assist in the teaching of the Environmental Chemistry discipline.

Keywords: Environmental Chemistry; Chemistry teaching; Adsorption.

Data de aprovação: 07/12/2022 (data de apresentação do TCC)

1 INTRODUÇÃO

Segundo Arrigo, Alexandre e Assai (2018), a relação entre o meio ambiente e a humanidade está sofrendo grandes atritos com a aceleração do desenvolvimento da indústria e da economia, provocando, assim, um desequilíbrio ambiental. Nessa perspectiva, a educação ambiental é observada como uma das soluções desse problema, uma vez que, por meio dela, pode-se melhorar a relação dos indivíduos com o meio ambiente, formar cidadãos que tenham consciência sobre a preservação ambiental, etc. Dessa forma, a educação ambiental deve ser discutida em todos os níveis de ensino, principalmente nas áreas do conhecimento que já debatem esse tema.

Nesse contexto, a Química é uma disciplina ideal para se falar da educação ambiental, já que esse campo permite diferentes percepções sobre a realidade, possibilitando a ampliação das concepções dos indivíduos sobre o mundo e a natureza. Além disso, a educação ambiental não pode ser realizada apenas através da transmissão de informações aos alunos, mas possibilitar que eles desenvolvam habilidades para que possam ser capazes de preservar e intervir no meio em que vivem (MORAIS; AVELINO; FERNANDES, 2018). De acordo com Santos, Moita Neto e Sousa (2014), as instituições de ensino superior devem, dentro da realidade local, dar ênfase à formação de professores que apresentem aspectos ambientais inseridos na sua grade de ensino no curso de licenciatura. Assim, serão formados docentes que sejam modernos e sensíveis às temáticas ambientais.

Segundo Morais (2018), a utilização de atividades experimentais pode despertar o interesse dos discentes para com o conteúdo abordado. Tal abordagem constitui uma excelente estratégia para promover o processo de ensino-aprendizagem, e pode ser realizada de diversas formas: experimentos de laboratório, uso de simulações virtuais, utilização de vídeos, dentre outras. Portanto, para que futuros professores possam ministrar uma aula de educação ambiental no ensino fundamental e médio, que seja o máximo possível proveitosa, é necessário que se tenham uma boa formação nos cursos de licenciatura. Nesse sentido, a utilização de experimentos de adsorção na disciplina Química Ambiental pode auxiliar muito no conhecimento dos graduandos.

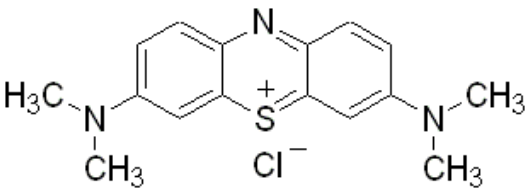
A adsorção é uma propriedade físico-química da matéria, ou ainda uma operação de transferência de massa. Nesse processo, normalmente um composto sólido, o adsorvente ou adsorbente, retém uma substância, o adsorvato ou adsorbato, de fluidos líquidos ou gasosos em sua superfície. Segundo Nascimento *et al.* (2014) e Gisi *et al.* (2016), a adsorção pode ser classificada em dois tipos: fisissorção, quando a interação é de natureza física e ocorre por meio das forças intermoleculares de Van der Waals, e quimissorção, quando a interação é de natureza química, pois envolve uma troca ou partilha de elétrons entre adsorvente e adsorbato. Fatores, como área superficial, propriedades do adsorvente e do adsorvato, concentração das espécies, temperatura e pH do meio, dentre outros, podem também influenciar o processo de adsorção.

Com a contaminação da água por poluentes orgânicos e inorgânicos, como metais tóxicos, fármacos, corantes, pesticidas, dentre outros, criou-se a necessidade de desenvolver novas tecnologias e métodos que possam remover tais poluentes do meio aquoso (NASCIMENTO *et al.*, 2014), uma vez que estes oferecem resistência à remoção efetiva por outros métodos. Nessa perspectiva, a adsorção é um método que ganhou muita popularidade ao longo das últimas décadas, pois é relativamente simples, fácil e barato de se trabalhar. Essa popularidade fica evidente na quantidade de artigos de revisão sobre o tema adsorção que existem (GISI *et al.*, 2016; DE COSGROVE; JEFFERSON; JARVIS, 2019; DE PENHA; MOURA; PAZ, 2021).

Os corantes são compostos orgânicos da classe dos aromáticos que apresentam estrutura complexa e são muito solúveis em água. São produzidas mais de 700 mil toneladas de corantes por ano e são mais de 100 mil tipos utilizados comercialmente. Dessa produção, a indústria têxtil é responsável pelo uso de mais de 10 mil toneladas de corantes por ano, mundialmente (KATHERESAN; KANSEDO; LAU, 2018). Os dejetos industriais têm uma grande quantidade de corantes que são perigosos e, sendo descartado nos recursos hídricos ambientais, causam grandes prejuízos à vida aquática, pois uma pequena quantidade de corante é o suficiente para produzir cor, impedindo, assim, que a luz solar adentre a água, atrapalhando o processo de fotossíntese das plantas aquáticas. Além disso, alguns desses contaminantes são muito tóxicos, o que pode causar a morte da vida marinha, como também prejudicar os seres vivos terrestres que consomem essa água (SHELKE; JOPALE; KATEGAONKAR, 2022).

O azul de metileno é um corante tóxico de caráter básico e catiônico muito utilizado. É muito persistente no meio ambiente, não é biodegradável e é estável à água, luz, calor e oxidação. Dessa forma, quando o azul de metileno é descartado em ambientes aquáticos, ele se torna um grande risco a todas as espécies que vivem nessas regiões, como também aos outros animais que estão acima na cadeia alimentar, como os seres humanos. (LI *et al.*, 2022; LIMA *et al.*, 2020). Outros dados que caracterizam o corante azul de metileno podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1: Características do azul de metileno.

Propriedades físicas e químicas do azul de metileno	
Fórmula molecular	C ₁₆ H ₁₈ ClN ₃ S
Peso molecular (g mol ⁻¹)	319,85
Ponto de fusão (°C)	100-110
Absorção no UV, λ _{max} (nm)	664
Estrutura molecular	

Fonte: Rani e Chaudhary (2022).

Há vários métodos para remoção do corante azul de metileno em águas residuais, sendo o processo de adsorção considerado o mais promissor (RANI; CHAUDHARY, 2022), tendo a possibilidade de utilizar os mais diversos adsorventes (GARCIA *et al.*, 2021).

O *Cereus jamacaru*, mais conhecido como mandacaru, é um cacto colunar muito comum na região do semiárido brasileiro. É uma planta que tem capacidade de armazenar cerca de 15% de sua massa em quantidade de água. A quantidade de proteína bruta desse cacto é de aproximadamente 10% e os resíduos minerais, cerca de 10,66%, são constituídos de aproximadamente 5,61% de CaO e 0,22% de P₂O₅ (DAVET *et al.*, 2009). O mandacaru tem uma produção de 13,3 toneladas de matéria seca por hectare e, no Brasil, essa planta é muito utilizada como ração animal. Além disso, também pode ser utilizado como adsorvente para o processo de adsorção, como, por exemplo, a remoção do corante fucsina básica (GEORGIN *et al.*, 2020). No entanto, nenhum trabalho na literatura destaca o uso do *Cereus jamacaru* em processos de adsorção do corante azul de metileno de águas residuais.

Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo averiguar se cacto mandacaru pode ser usado como adsorvente no processo de adsorção do corante azul de metileno em águas residuais. Analisando os parâmetros de custo-benefício, relação entre experimento e a ementa da disciplina e geração de resíduos, objetivou-se ainda avaliar a potencialidade deste experimento para auxiliar no ensino da disciplina de Química Ambiental para os graduandos em Licenciatura em Química.

2 METODOLOGIA

2.1 MATERIAL

2.1.1 Adsorbato

Foi preparada uma solução estoque de azul de metileno (Dinâmica Química Contemporânea LTDA) com concentração de 1000 mg L⁻¹. Todas as soluções utilizadas nos experimentos foram obtidas por diluição desta solução estoque.

2.1.2 Adsorvente

O cacto mandacaru (*Cereus Jamacaru*) foi recolhido no interior da cidade de Acauã-PI, lavado, moído em um liquidificador convencional e separado com filtro de papel. Logo após isto, o filtrado foi lavado repetidamente com água destilada para remover partículas de sujeira. Posteriormente, a amostra foi mantida em contato com uma solução de 50% de etanol por 3h, sendo este processo realizado com o intuito de separar os extrativos presentes na amostra (GEORGIN *et al.*, 2020). Por fim, o sólido foi seco em uma estufa a 100 °C, por 2 horas, e guardado até posterior uso.

2.2 EXPERIMENTAL

2.2.1 Efeito da concentração inicial

Para a avaliação do efeito da concentração inicial do adsorbato, foi usado uma quantidade fixa de 100 mg de mandacaru, que foi colocada em frascos de Erlenmeyer de 250 mL contendo 20 mL de uma solução de azul de metileno com concentrações iniciais variadas (1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150 e 200 mg L⁻¹), em temperatura ambiente. Após um tempo de 24 h, para garantir equilíbrio do sistema, as soluções foram analisadas no espectrofotômetro digital UV/VIS ESPEC-UV-5100, da marca Tecnal, no comprimento de onda de 664 nm (LIMA *et al.*, 2020). Os experimentos foram realizados em triplicada. A quantidade adsorvida no equilíbrio, q_e (mg g⁻¹), foi calculada usando a equação 1:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) V}{W} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde C_0 e C_e são as concentrações, em mg L^{-1} , inicial e de equilíbrio da solução de azul de metileno, respectivamente; V é o volume, em L, da solução e W é a massa, em g, do adsorvente (NJOKU *et al.* 2015; NASCIMENTO *et al.*, 2014).

A remoção percentual do corante foi determinada utilizando a equação 2 (RANI; CHAUDHARY, 2022):

$$\text{Remoção Percentual} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

2.2.2 Efeito da massa inicial do adsorvente

Para averiguar a influência da massa de adsorvente, 20 mL de uma solução de concentração 5 mg L^{-1} de azul de metileno foi adicionada em frascos de Erlenmeyer de 250 mL. Em seguida, massas variadas (50, 100 e 200 mg) do adsorvente foram adicionadas em cada frasco. O processo foi realizado em triplicada e à temperatura ambiente. Após um tempo de 24 h, para garantir equilíbrio do sistema, as soluções foram analisadas no espectrofotômetro, mencionado no tópico 2.2.1. A quantidade adsorvida no equilíbrio, q_e (mg g^{-1}), foi calculada usando a equação 1 e o percentual de remoção, pela equação 2.

2.2.3 Efeito do tempo de contato

Para avaliar o tempo de contato, uma quantidade fixa de 100 mg de mandacaru foi colocada em frascos de Erlenmeyer de 250 mL contendo 20 mL de solução de azul de metileno, com concentração inicial de 5 mg L^{-1} , em temperatura ambiente. Após tempos pré-determinados, uma alíquota dessa solução foi retirada e, conforme o tópico 2.2.1, foi analisada. Os experimentos foram realizados em triplicada e a quantidade adsorvida no tempo t , q_t (mg g^{-1}), foi calculada usando a equação 3.

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) V}{W} \quad (\text{Eq. 3})$$

2.2.4 Estudo cinético

Com relação aos estudos cinéticos, foram analisados os resultados obtidos a partir da influência do tempo de contato (tópico 2.2.3), utilizando os modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

Segundo Njoku *et al.* (2015) e Nascimento *et al.* (2014), a equação de Lagergren é uma análise cinética simples de adsorção de pseudo-primeira ordem, equação 4, baseada na capacidade de adsorção dos sólidos.

$$q_t = q_e(1 - \exp^{-k_1 t}) \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde k_1 é a constante da taxa de adsorção de pseudo-primeira ordem, em h^{-1} ; q_e é a quantidade adsorvida por grama de adsorvente no equilíbrio, em mg g^{-1} ; e q_t é a quantidade adsorvida por grama de adsorvente no tempo t , em mg g^{-1} . Nesse modelo cinético, é assumido que a quantidade de adsorbato removida é diretamente proporcional à concentração inicial do

mesmo e a quantidade de adsorvente, sendo um processo inteiramente de fisissorção (HO; MCKAY, 1999).

Ainda segundo Njoku *et al.* (2015) e Nascimento *et al.* (2014), o modelo de pseudo-segunda ordem pode ser representado pela equação 5 a seguir:

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

Onde k_2 é a constante de adsorção de pseudo-segunda ordem, e sua unidade é $\text{g mg}^{-1} \text{h}^{-1}$.¹ Nesse modelo cinético, é assumido que a etapa limitante da taxa do modelo é a quimissorção, ou seja, ocorre a troca de elétrons entre o adsorvente e o adsorvato (HO; MCKAY, 1999).

2.3 EXPERIMENTO APLICADO AO ENSINO

Após finalizar os experimentos, o seu potencial foi avaliado para ser utilizado como auxiliar no ensino da disciplina Química Ambiental para os graduandos em Licenciatura em Química. Para isso, foi levado em consideração 3 (três) tópicos: Relação custo-benefício; Relação entre experimento e a ementa da disciplina; e Geração de resíduos.

2.3.1 Relação custo-benefício

Para avaliar o fator custo-benefício desse experimento para as aulas da disciplina Química Ambiental, foi observada a relação “gastos com a realização do procedimento *versus* importância do mesmo para o ensino”.

2.3.2 Relação entre experimento e a ementa da disciplina

A fim de investigar o quão abrangente o experimento abordado poderia ser para a disciplina Química Ambiental, a correlação entre o experimento executado e a ementa da disciplina foi averiguada.

2.3.3 Geração de resíduos

Foi analisada a formação de resíduos logo após a realização do experimento, para verificar se o uso deste para as aulas práticas da disciplina Química Ambiental é sustentável.

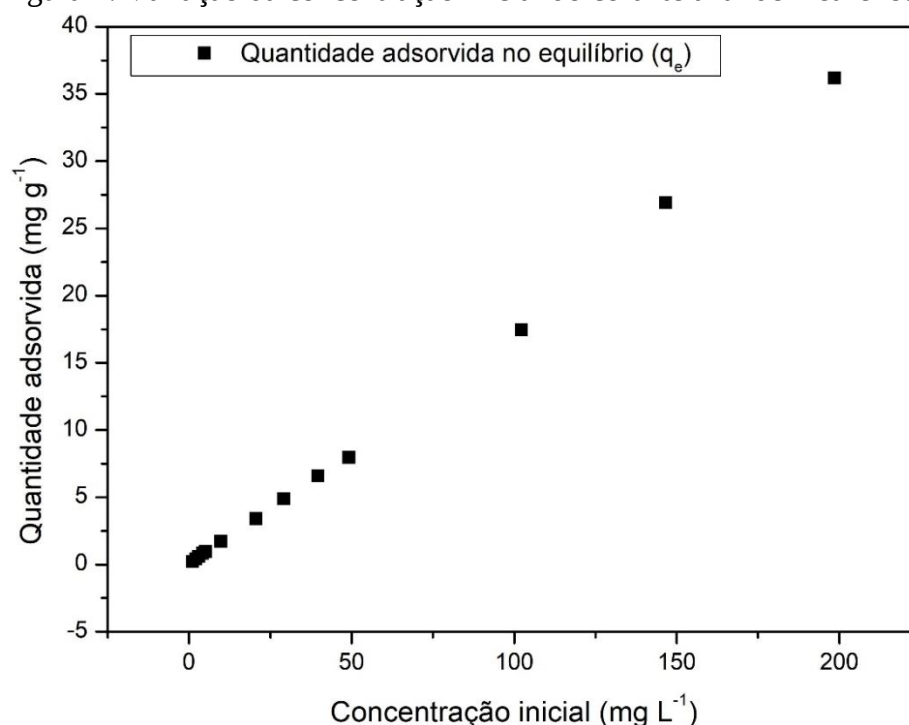
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 EFEITO DA CONCENTRAÇÃO INICIAL

O processo de remoção do corante azul de metileno com a variação da concentração, em massa de adsorvente constante, está expresso na Figura 1. Percebe-se que o cacto mandacaru tem um grande potencial de ser utilizado com adsorvente, pois, mesmo usando concentrações muito altas do contaminante, a quantidade adsorvida continua crescendo. Isso se explica pelo fato de que, quando a concentração de corante aumenta, terá mais espécies adsorvato para serem removidas, fazendo com que o q_e seja maior. Contudo, chegará a certa concentração que o q_e ficará constante, pois todos os sítios de adsorção do adsorvente estarão ocupados (DE PENHA; MOURA; PAZ, 2021). Na Tabela 2 estão resumidos os dados da remoção percentual por concentração inicial.

Comparando o resultado deste trabalho com o de Alfredo *et al.* (2015), em que foi determinada a capacidade de adsorção do azul de metileno na casca de batata, nota-se que, mesmo não tendo atingindo a capacidade máxima de adsorção para o azul de metileno no cacto mandacaru, os resultados foram próximos: a capacidade máxima de adsorção na casca de batata foi de 49 mg g^{-1} (0,2 g de adsorvente, 200 mg/L de corante) enquanto neste trabalho o maior valor obtido foi de $36,18 \text{ mg g}^{-1}$. Por outro lado, os resultados deste trabalho foram superiores ao de Ronix *et al.* (2017), que avaliou a adsorção usando hidrocarvão de casca de café, sem ativação, e obteve uma capacidade máxima de adsorção de $34,9 \text{ mg g}^{-1}$. Esse resultado sugere que o uso do cacto mandacaru como adsorvente para a remoção de azul de metileno de águas residuais é promissor.

Figura 1: Variação da concentração inicial do corante azul de metileno.



Fonte: autor.

Tabela 2: Remoção percentual por concentração inicial.

Concentração inicial (mg L ⁻¹)	Quantidade adsorvida no equilíbrio (mg g ⁻¹)	Remoção Percentual (%)
1	0,23	100
2	0,41	98,31
3	0,60	98,73
4	0,81	98,43
5	0,96	93,97
10	1,70	86,68
20	3,40	82,38
30	4,90	83,88
40	6,60	83,24
50	7,96	80,85
100	17,46	85,36
150	26,93	91,80
200	36,18	91,12

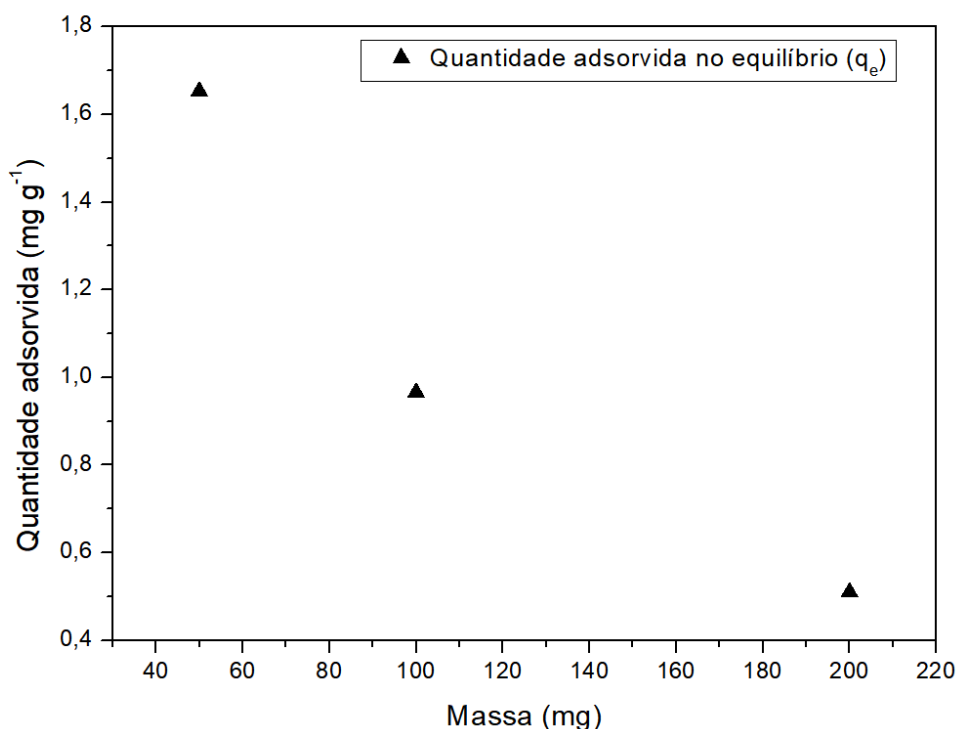
Fonte: autor.

Com relação ao percentual de remoção, observa-se uma variação na faixa 80,85 e 100%. As concentrações 1, 2, 3, 4 e 5 mg L⁻¹ tiveram, respectivamente, 100, 98,31, 98,73, 98,43 e 93,97% do contaminante removido. A alta descontaminação nessa faixa de concentração pode ter ocorrido por causa das concentrações iniciais utilizadas, que foram muito baixas. Já as demais concentrações apresentaram percentual de remoção na faixa de 80,85 a 91,80 do contaminante removido. Esses índices de remoção apresentaram variações não lineares (a remoção percentual entre as concentrações 50 e 100 mg L⁻¹ não diminui como o esperado, mas sim, aumenta), que podem ser explicadas pelo fato da área superficial do adsorvente, por ser natural, ser heterogênea (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

3.2 EFEITO DA MASSA INICIAL DO ADSORVENTE

O processo de remoção do corante azul de metileno com a variação da massa inicial do adsorvente em concentração constante de adsorvato está expresso na Figura 2. Foi constatado que, quanto maior a massa utilizada do adsorvente, menor a quantidade adsorvida no equilíbrio (q_e). Isso se explica pelo fato de que, quando a massa do mandacaru aumenta, o número de sítios disponíveis no adsorvente também aumenta, fazendo com que o q_e seja menor, pois a proporção de sítios ativos de adsorção é muito maior do que a quantidade de adsorbato presente em solução. Assim, espera-se que ocorra uma competição do adsorvato entre os sítios disponíveis para o processo de adsorção (ANTUNES *et al.*, 2018; GEORGIN *et al.*, 2020). Por outro lado, os dados de percentual de remoção apresentados, na Tabela 3, crescem com o aumento da quantidade de adsorvente utilizada para a adsorção do corante azul de metileno.

Figura 2: Variação da massa de adsorvente inicial.



Fonte: autor.

Tabela 3: Remoção percentual por massa inicial do adsorvente.

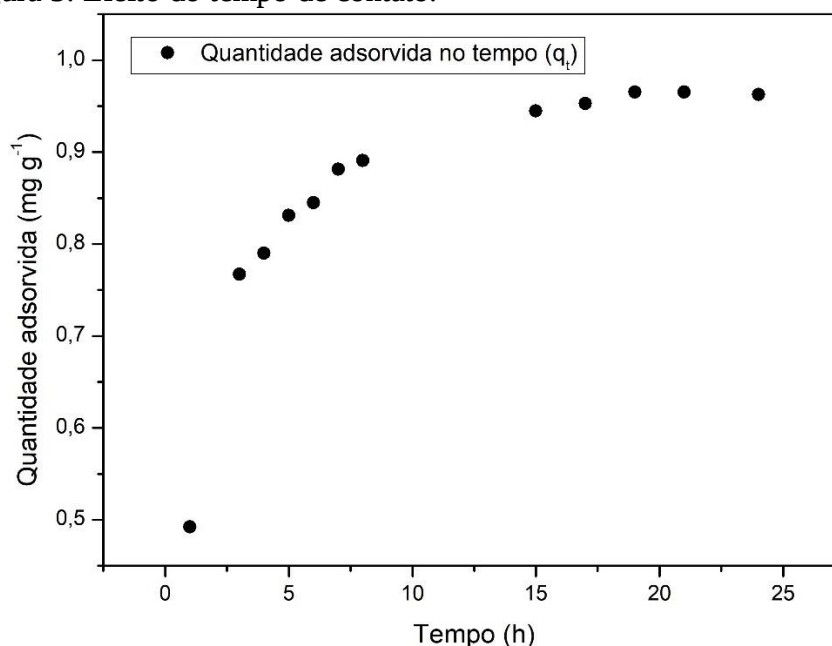
Massa inicial do adsorvente (mg)	Quantidade adsorvida no equilíbrio (mg g^{-1})	Remoção Percentual (%)
50	1,65322	81,01
100	0,96593	94,67
200	0,51019	100

Fonte: autor.

3.3 EFEITO DO TEMPO DE CONTATO

A adsorção do corante azul de metileno foi realizada e observada em uma faixa de tempo de 1 hora até 24 horas com uma massa constante de 100 mg de adsorvente. A quantidade adsorvida no tempo t (q_t) foi calculada e está na Figura 3. Foi constatado que a adsorção entrou em equilíbrio por volta de 19 horas de experimento, valor que se mostrou mais rápido quando comparado com o trabalho de Marrakchi *et al.* (2017), trabalho esse que foi realizado um estudo da adsorção do azul de metileno com carvão ativado preparado a partir de resíduos de pesca, necessitando de 25 horas para entrar em equilíbrio. Além disso, na Tabela 4 estão resumidos os dados da remoção percentual em razão do tempo de adsorção, que aumenta com o acréscimo do tempo de contato.

Figura 3: Efeito do tempo de contato.



Fonte: autor.

Tabela 4: Remoção percentual por tempo de adsorção.

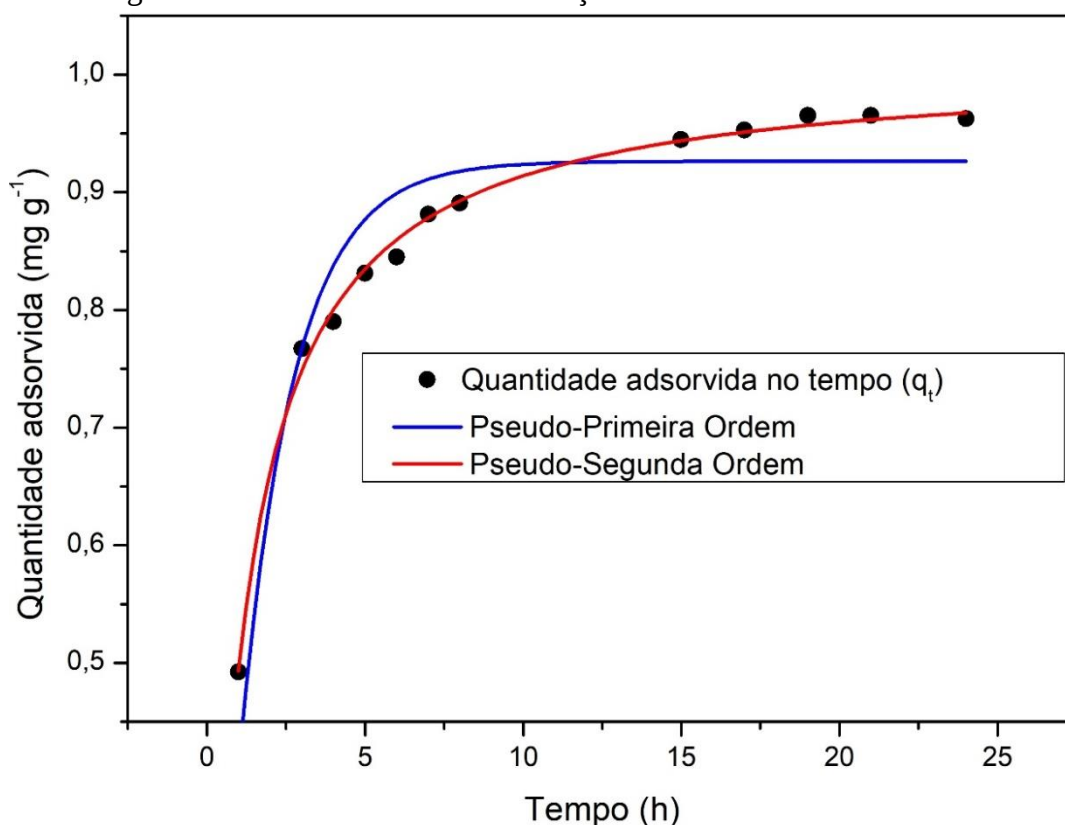
Tempo (h)	Quantidade adsorvida no tempo (mg g^{-1})	Remoção Percentual (%)
1	0,49249	47,90
3	0,76703	74,60
4	0,79000	76,83
5	0,83109	80,83
6	0,84491	82,17
7	0,88152	85,73
8	0,89086	86,64
15	0,94464	91,87
17	0,95286	92,67
19	0,96519	93,87
21	0,96537	93,89
24	0,96257	94,34

Fonte: autor.

3.4 ESTUDO CINÉTICO DE ADSORÇÃO

Os dados da cinética de adsorção foram obtidos aplicando as equações de Pseudo-Primeira Ordem (equação 4) e Pseudo-Segunda Ordem (equação 5) aos valores observados na Figura 3, com a finalidade de investigar os mecanismos de adsorção. Os resultados são mostrados na Figura 4 e na Tabela 5. O valor de R^2 encontrado utilizando o modelo cinético de Pseudo-Segunda Ordem foi superior ao valor obtido pelo modelo cinético de Pseudo-Primeira Ordem. Esse resultado sugere que o modelo de Pseudo-Segunda Ordem é o mais indicado para o estudo de adsorção do corante azul de metileno ao utilizar o cacto mandacaru como material adsorvente. Portanto, a quimissorção caracteriza a adsorção do corante azul de metileno pelo cacto mandacaru, ou seja, envolve reações químicas (MARRAKCHI *et al.*, 2017). Esse resultado está de acordo com a literatura, que apresenta alguns trabalhos que demonstram que a adsorção do azul de metileno tende a obedecer ao modelo cinético de Pseudo-Segunda Ordem (LI *et al.*, 2017; POPA; VISA, 2017; LI *et al.*, 2022).

Figura 4: Estudo da cinética de adsorção.



Fonte: autor.

Além disso, a cinética de adsorção exibiu uma rápida remoção do corante azul de metileno em solução no início e, logo em seguida, foi sucedida por um processo mais lento. Isso se explica pela ocupação progressiva dos sítios disponíveis na superfície do adsorvente (GEORGIN *et al.*, 2020). Tal comportamento está de acordo com a literatura (WITEK-KROWIAK; SZAFRAN; MODELSKI, 2011).

Tabela 3: Parâmetros cinéticos da adsorção do azul de metileno.

Pseudo-Primeira Ordem			Pseudo-Segunda Ordem		
q_e (mg g ⁻¹)	k_1 (h ⁻¹)	R^2	q_e (mg g ⁻¹)	k_2 (g mg ⁻¹ h ⁻¹)	R^2
0,92634	0,58697	0,88464	1,00963	0,9461	0,99556

Fonte: autor.

3.5 EXPERIMENTO APLICADO AO ENSINO

3.5.1 Relação custo-benefício

Com relação ao custo-benefício desse experimento aplicado ao ensino, tal procedimento é bem acessível, pois o equipamento (UV-VIS), vidrarias e adsorbato (azul de metileno) utilizados são comuns a muitos laboratórios de ensino de Química, tornando a aplicação do experimento viável. Além disso, o cacto mandacaru é uma planta fácil de ser encontrada no nordeste brasileiro, fazendo com que seu uso seja muito pouco custoso.

3.5.2 Relação entre experimento e a ementa da disciplina

A relação entre experimento e a ementa da disciplina também se mostrou compatível, já que na disciplina Química Ambiental contém o tópico “Poluição Aquática”. Assim, um experimento de adsorção demonstrando formas relativamente simples de descontaminação dos meios aquáticos poluídos por corantes é um ponto muito interessante para ser utilizado como metodologia de ensino para a disciplina Química Ambiental.

3.5.3 Geração de resíduos

Com relação à geração de resíduos na realização desse experimento de adsorção, pode-se dizer que houve pouca geração dos mesmos. Os resíduos formados são de fácil descarte adequado. Assim, levando em consideração a contaminação produzida, esse experimento de adsorção mostra-se ambientalmente viável.

4 CONCLUSÃO

O cacto mandacaru (*Cereus jamacaru*) pode ser considerado um adsorvente promissor, pois é um material fácil de ser encontrado na região nordestina, barato, fácil para ser preparado e se provou ser um material adsorvente eficiente na remoção do corante azul de metileno. A adsorção do corante selecionado é rápida, levando cerca de 19 horas para entrar em equilíbrio. A maior quantidade adsorvida obtida nesse trabalho, com concentração inicial de 200 mg g⁻¹, foi 36,18 mg g⁻¹, com o índice de remoção superior a 90%. Com relação ao estudo da cinética de adsorção, o modelo de Pseudo-Segunda Ordem foi o que melhor se ajustou aos resultados experimentais, sugerindo que a quimissorção é majoritária.

Além disso, os parâmetros discutidos nesse trabalho, custo-benefício, relação entre experimento e a ementa da disciplina e geração de resíduos, mostraram-se promissores em relação ao potencial deste experimento para ser utilizado como auxiliar no ensino da disciplina Química Ambiental para os graduandos em Licenciatura em Química: a utilização do cacto mandacaru em um experimento de adsorção do corante azul de metileno é eficiente, rápido e barato de ser realizada, como também os resíduos são de fácil descarte, possibilitando, dessa forma, que ele possa ser utilizado em aulas práticas no ensino de Química Ambiental.

REFERÊNCIAS

ALFREDO, A. P. C. *et al.* Adsorption of Methylene Blue in Potato Peel Using Batch and Fixed-bed Column Systems. **Revista Virtual de Química**, [S.L.], v. 7, n. 6, p. 1909-1920, 2015. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20150112>.

ANTUNES, E. C. E. S. *et al.* REMOÇÃO DE CORANTE TEXTIL UTILIZANDO A CASCA DO ABACAXI COMO ADSORVENTE NATURAL. **Holos**, [S.L.], v. 3, p. 81-97, 23 set. 2018. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2018.5334>.

ARRIGO, V.; ALEXANDRE, M. C. L.; ASSAI, N. D. S. O ENSINO DE QUÍMICA E A EDUCAÇÃO AMBIENTAL: uma proposta para trabalhar conteúdos de pilhas e baterias. **Experiências em Ensino de Ciências**, [S. I.], v. 13, n. 5, p. 306-325, 2018.

COSGROVE, S.; JEFFERSON, B.; JARVIS, P. Pesticide removal from drinking water sources by adsorption: a review. **Environmental Technology Reviews**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 1-24, 1 jan. 2019. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/21622515.2019.1593514>.

DAVET, A. *et al.* Atividade antibacteriana de *Cereus jamacaru* DC, Cactaceae. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, [S.I.], p. 561-564, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbfar/a/6hKy9z9tL6pK98dbtFNkpvw/?lang=pt>.

GARCIA, R. V. *et al.* Materials for methylene blue adsorption. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 10, n. 9, p. 1-12, 28 jul. 2021. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i9.18114>.

GEORGIN, J. *et al.* Powder ed biosorbent from the mandacaru cactus (*cereus jamacaru*) for discontinuous and continuous removal of Basic Fuchsin from aqueous solutions. **Powder Technology**, [S.L.], v. 364, p. 584-592, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.064>.

GISI, S. *et al.* Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: a review. **Sustainable Materials And Technologies**, [S.L.], v. 9, p. 10-40, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2016.06.002>.

HO, Y.S; MCKAY, G. Pseudo-second order model for sorption processes. **Process Biochemistry**, [S.L.], v. 34, n. 5, p. 451-465, jul. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0032-9592\(98\)00112-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0032-9592(98)00112-5).

KATHERESAN, V.; KANSEDO, J.; LAU, S. Y. Efficiency of various recent waste water dye removal methods: a review. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 6, n. 4, p. 4676-4697, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060>.

LI, H. *et al.* Rapid and Efficient Adsorption of Methylene Blue Dye From Aqueous Solution by Hierarchically Porous, Activated Starbons®: mechanism and porosity dependence. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], p. 1-52, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129174>.

LI, Z. *et al.* Adsorption of methylene blue on natural cotton based flexible carbon fiber aerogels activated by novel air-limited carbonization method. **Journal Of Molecular Liquids**, [S.L.], v. 242, p. 747-756, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2017.07.062>.

LIMA, A. F. *et al.* Adsorção de azul de metileno em hidrocarbônios de resíduos têxteis. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 25, n. 4, p. 1-16, 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200004.1185>.

MARRAKCHI, F. *et al.* High-surface-area and nitrogen-rich mesoporous carbon material from fishery waste for effective adsorption of methylene blue. **Powder Technology**, [S.L.], v. 321, p. 428-434, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2017.08.023>.

MORAIS, F. J.; AVELINO, A. C. S.; FERNANDES, S. B. S. **A educação ambiental no ensino de química: promovendo a cidadania no âmbito escolar**. 2018. Trabalho apresentado no V Congresso Nacional de Educação - CONEDU. Disponível em: https://editorarealize.com.br/editora/anais/conedu/2018/TRABALHO_EV117_MD1_SA16_ID5390_07092018175241.pdf. Acesso em: 09 dez. 2021.

NASCIMENTO, R. F. *et al.* **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: UFC, 2014. 258 p.

NJOKU, V.O. *et al.* Adsorption of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid by mesoporous activated carbon prepared from H₃PO₄-activated langsatempty fruit bunch. **Journal Of Environmental Management journal**, [S. L.], v. 1, n. 1, p. 138-144, 2015. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.02.002>.

NOVAIS, R. M. Experimentação no ensino de Química: analisando reflexões de licenciandos durante uma disciplina de prática de ensino. **Rede Latino-Americana de Pesquisa em Educação Química**, [S. L.], v. 2, n. 2, p. 24-50, 2018

PENHA, A. V. S.; MOURA, K. O.; PAZ, G. L. Tratamento de Águas Residuais: uma revisão sobre a adsorção do corante preto de amido 10b. **Revista Virtual de Química**, [S.I.], v. 13, n. 2, p. 1-12, 12 mar. 2021. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20210010>.

POPA, N.; VISA, M. The synthesis, activation and characterization of charcoal powder for the removal of methylene blue and cadmium from wastewater. **Advanced Powder Technology**, [S.L.], v. 28, n. 8, p. 1866-1876, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.appt.2017.04.014>.

RANI, S.; CHAUDHARY, S. Adsorption of methylene blue and crystal violet dye from wastewater using Citrus limettapeel as an adsorbent. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 60, p. 336-344, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.237>.

RONIX, A. *et al.* Hydro thermal carbonization of coffee husk: optimization of experimental parameters and adsorption of methylene blue dye. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 5, n. 5, p. 4841-4849, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2017.08.035>.

SANTOS, K.; MOITA NETO, J. M.; SOUSA, P. A. A. Química e Educação Ambiental: uma experiência no ensino superior. **Química Nova na Escola**, [S.L.], v. 36, n. 2, p. 119-125, 2014. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.5935/0104-8899.20140015>.

SHELKE, B. N.; JOPALE, M. K.; KATEGAONKAR, A. H. Exploration of biomass waste as low cost adsorbents for removal of methylene blue dye: a review. **Journal Of The Indian Chemical Society**, [S.L.], v. 99, n. 7, p. 1-15, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jics.2022.100530>.

WITEK-KROWIAK, A.; SZAFRAN, R. G.; MODELSKI, S. Biosorption of heavy metals from aqueous solutions onto peanut shell as a low-cost biosorbent. **Desalination**, [S.L.], v. 265, n. 1-3, p. 126-134, jan. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2010.07.042>.