

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS – UEA
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA – EST
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

VINÍCIUS DE FREITAS CASTRO LOBATO

**ANÁLISE DA REMOÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO ATRAVÉS DE
ADSORÇÃO PELA CASCA DA CASTANHA DO BRASIL (*Bertholletia excelsa*)**

MANAUS

2023

VINÍCIUS DE FREITAS CASTRO LOBATO

**ANÁLISE DA REMOÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO ATRAVÉS DE
ADSORÇÃO PELA CASCA DA CASTANHA DO BRASIL (*Bertholletia excelsa*)**

**Monografia apresentada ao Curso de Graduação
em Engenharia Química da Escola Superior de Tec-
nologia da Universidade do Estado do Amazonas,
para obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química.**

Orientadora: Profa. Dra. Kiki Pinheiro Melo Braga

MANAUS

2023

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

L796aa Lobato, Vinícius de Freitas Castro
Análise da remoção do corante azul de metileno
através de adsorção pela casca da castanha do Brasil
(Bertholletia excelsa) / Vinícius de Freitas Castro Lobato.
Manaus : [s.n], 2023.
50 f.: color.; 30 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Química -
Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2023.
Inclui bibliografia
Orientador: Braga, Kiki Pinheiro Melo

1. Adsorção. 2. Casca da castanha do Brasil. 3.
Isotermas de adsorção. I. Braga, Kiki Pinheiro Melo
(Orient.). II. Universidade do Estado do Amazonas. III.
Análise da remoção do corante azul de metileno através
de adsorção pela casca da castanha do Brasil (Bertholletia
excelsa)

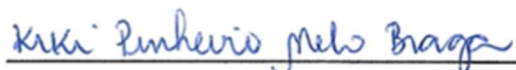
Elaborado por Jeane Macelino Galves - CRB-11/463

VINÍCIUS DE FREITAS CASTRO LOBATO

ANÁLISE DA REMOÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO ATRAVÉS DE
ADSORÇÃO PELA CASCA DA CASTANHA DO BRASIL (*Bertholletia excelsa*)

Monografia de Conclusão de Curso para obtenção do título de Engenheiro, Habilitação
em Engenharia Química - Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Estado do
Amazonas


Banca Examinadora:



Profa. Dra. Kiki Pinheiro Melo Braga – Orientadora



Profa. Dra. Regina Yanako Moriya – UEA



Profa. Dra. Luciana Aires de Oliveira - INPA

Conceito: Aprovado

Manaus, 17 de março de 2023.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, por uma vida dedicada aos filhos.

À minha orientadora, professora Dra. Kiki Braga por sempre estar disposta a me auxiliar ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À Eduarda Rodrigues por ter me ajudado na obtenção e preparo das castanhas.

Ao grupo de pesquisa Química Aplicada à Tecnologia que disponibilizou equipamento e estrutura para preparo e análise dos experimentos.

Ao HUB – Tecnologia e Inovação por possibilitar a realização dos ensaios de adsorção, especialmente ao discente Ronildo Nunes pelo auxílio no manuseio dos equipamentos.

Aos professores que fizeram parte da minha trajetória acadêmica.

À Universidade do Estado do Amazonas por fornecer a estrutura e corpo de docentes para a minha formação.

RESUMO

O efluente da indústria têxtil é classificado como o mais poluente entre os setores da indústria química. Esses efluentes apresentam altos valores de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e de Demanda Química de Oxigênio (DQO), alta concentração de matéria orgânica, temperatura elevada, pH variável, compostos orgânicos coloridos e grande quantidade de sólidos suspensos. Dentre os corantes têxteis presentes nesses efluentes, destaca-se o azul de metileno. Um dos métodos de tratamento mais utilizados nesse tipo de efluente industrial é a adsorção que é um processo de separação em que substâncias contidas em uma fase fluida são transferidas para a superfície de um sólido que possua características adsorventes. Com vista a redução de custos, dá-se especial atenção aos resíduos agroindustriais como alternativa aos adsorventes comerciais que encarecem o processo de remoção. Entre estes resíduos alternativos encontra-se a castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*) que tem uma produção anual de cerca de 33 mil toneladas no Brasil e que a cada tonelada processada são gerados em torno de 1,4 tonelada de resíduos. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi analisar a remoção do corante azul de metileno através do processo de adsorção pela casca da castanha do Brasil. Para os ensaios de adsorção, foram estudadas as variáveis concentração de azul de metileno e massa seca de casca de castanha do Brasil (Tyler 100), variando as concentrações de 10 a 20 mg/L de azul de metileno e carga de adsorvente de 0,01 a 0,02 g. Os ensaios consistiram na agitação, dessa solução, em shaker por 30 min, 150 rpm e 25 °C. conforme o planejamento fatorial composto central 2^2 , com rotação $2^{1/2}$. Para obtenção da isoterma de adsorção, foi fixada a carga de adsorvente de 0,015 g, 25 °C e agitação por 30 min; variando apenas as concentrações de azul de metileno. Nos experimentos de adsorção, verificou-se a alta capacidade de adsorção pela casca da castanha do Brasil, de modo que a maior remoção foi de 98,99 %. A superfície de resposta forneceu como condição ótima: azul de metileno a 12,0058 mg/L e 0,01843 g de castanha do Brasil sendo estimado um percentual de remoção de 99,06 %. A isoterma de adsorção se ajustou melhor ao modelo de Langmuir que estimou uma capacidade máxima de adsorção de 79,3651 mg/g. Portanto, a análise da remoção do corante azul de metileno possibilitou evidenciar a casca da castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*) como um adsorvente alternativo de baixo custo.

Palavras-chave: capacidade de adsorção, isotermas, castanha do Brasil, azul de metileno.

ABSTRACT

The effluent from the textile industry is classified as the most polluting among the sectors of the chemical industry. These effluents have high values of Biochemical Oxygen Demand (BOD) and Chemical Oxygen Demand (COD), high concentration of organic matter, high temperature, variable pH, colored organic compounds and large amounts of suspended solids. Among the textile dyes present in these effluents, methylene blue stands out. One of the most used treatment methods in this type of industrial effluent is adsorption, which is a separation process in which substances contained in a fluid phase are transferred to the surface of a solid that has adsorbent characteristics. With a view to reducing costs, special attention is given to agro-industrial residues as an alternative to commercial adsorbents that make the removal process more expensive. Among these alternative residues is the Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) which has an annual production of about 33 thousand tons in Brazil and that each processed ton generates around 1,4 ton of residues. Given the above, the objective of this work was to analyze the removal of methylene blue dye through the adsorption process by the Brazil nut shell. For the adsorption tests, the variables concentration of methylene blue and dry mass of Brazil nut shell (Tyler 100) were studied, varying the concentrations from 10 to 20 mg/L of methylene blue and adsorbent load of 0,01 to 0,02 g. The tests consisted of stirring this solution in a shaker for 30 min, 150 rpm and 25 °C. according to the central composite factorial design 2^2 , with rotation $2^{1/2}$. To obtain the adsorption isotherm, an adsorbent charge of 0,015 g was fixed, 25 °C and stirred for 30 min; varying only the concentrations of methylene blue. In the adsorption experiments, the high adsorption capacity of the Brazil nut shell was verified, so that the highest removal was 98,99%. The response surface provided the optimal condition: methylene blue at 12,0058 mg/L and 0,01843 g of Brazil nuts, with an estimated removal percentage of 99,06%. The adsorption isotherm best fitted the Lang-muir model which estimated a maximum adsorption capacity of 79,3651 mg/g. Therefore, the analysis of the removal of the methylene blue dye made it possible to highlight the bark of the Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) as an alternative low-cost adsorbent.

Keywords: adsorption capacity, isotherms, Brazil nut, methylene blue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Castanheira do Brasil	12
Figura 2 - Ouriços da castanheira do Brasil.	13
Figura 3 – Castanhas com e sem casca.....	13
Figura 4 – Fórmula estrutural plana do azul de metileno.....	15
Figura 5 – Etapas do processo de adsorção.....	16
Figura 6 – Isoterma de adsorção.....	20
Figura 7 – Estufa de esterilização marca Medicate	24
Figura 8 – Moinho de facas da marca Marconi.....	25
Figura 9 – Agitador de peneiras da marca Produtest.....	25
Figura 10 – Balança analítica.....	26
Figura 11 – Espectrofotômetro UV-Vis modelo UV 1800 marca Shimadzu.....	27
Figura 12 – Shaker da marca Novatecnica	28
Figura 13 – Casca de castanha do Brasil após trituração em moinho de facas.....	31
Figura 14 – Casca de castanha do Brasil de granulometria Tyler 100.....	32
Figura 15 – Espectro de absorbância para soluções de azul de metileno.....	32
Figura 16 – Curva de calibração do azul de metileno.....	33
Figura 17 – Aspecto visual antes e após o ensaio de adsorção nos ensaios 7 e 11.....	34
Figura 18 – Gráfico de Pareto de remoção do corante azul de metileno pela casca da castanha do Brasil.....	36
Figura 19 – Superfície de resposta para as variáveis concentração de azul de metileno e massa de adsorvente em relação ao percentual de adsorvato removido.....	37
Figura 20 – Isoterma de adsorção.....	39
Figura 21 – Isoterma de Langmuir.....	40
Figura 22 – Isoterma de Freundlich.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tamanho das peneiras do processo de separação granulométrica.....	26
Tabela 2 – Concentrações de azul de metileno para produção da curva de calibração.....	27
Tabela 3 – Fatores e níveis do planejamento fatorial composto central 2 ²	29
Tabela 4 – Matriz do planejamento fatorial composto central 2 ²	29
Tabela 5 – Classificação granulométrica do adsorvente.	31
Tabela 6 – Dados para obtenção da curva analítica do azul de metileno.	33
Tabela 7 – Resultado dos ensaios de adsorção realizados conforme planejamento fatorial. ...	34
Tabela 8 – Análise de variância de eficiência de remoção do corante azul de metileno pela casca da castanha do Brasil.	35
Tabela 9 – Dados obtidos para a isoterma de adsorção.....	38
Tabela 10 – Dados para obtenção da isoterma de Langmuir.....	39
Tabela 11 – Dados para obtenção da isoterma de Freundlich.	40
Tabela 12 – Parâmetros das isotermas de Langmuir e Freundlich.	41

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$C_{16}H_{18}N_3SCl$	Azul de metileno
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
pH	Potencial hidrogeniônico
PPM	Parte por milhão
RPM	Rotações por Minuto
UEA	Universidade do Estado do Amazonas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1 CASTANHEIRA DO BRASIL (<i>Bertholletia excelsa</i>)	12
2.1.1 Produção e geração de resíduo	14
2.2 CORANTES	14
2.2.1 Azul de metileno	15
2.3 TRATAMENTOS DE EFLUENTES TÊXTEIS	15
2.3.1 Adsorção	15
2.3.2 Processos oxidativos avançados	22
2.3.3 Biodegradação	23
2.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	23
2.4.1 Planejamento composto central rotacionado (DCCR)	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1 PREPARAÇÃO DO ADSORVENTE	24
3.2 PREPARO DA SOLUÇÃO ESTOQUE	26
3.3 CURVA DE CALIBRAÇÃO	27
3.4 ENSAIO DE ADSORÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO.....	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	31
4.2 CURVA DE CALIBRAÇÃO DO AZUL DE METILENO.....	32
4.3 ENSAIOS DE ADSORÇÃO DO AZUL DE METILENO.....	34
4.4 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO	38
5 CONCLUSÃO	43
6 PERSPECTIVAS	44
REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Existem mais de 100 mil corantes disponíveis comercialmente e são produzidas mais de 700 mil toneladas anualmente em todo o mundo. A indústria têxtil é um dos seguimentos que mais utiliza esse produto para suas atividades, como o azul de metileno, e é responsável por aproximadamente 20% de toda a poluição industrial. A remoção dos corantes dos efluentes têxteis é uma questão ambiental importante, pois mesmo concentrações baixas podem ser tanto visíveis quanto tóxicas (ADEGOKE; BELLO, 2015).

Além da questão estética devido a facilidade de visualização dos corantes nos corpos hídricos, existem os efeitos nocivos na capacidade de aeração por conta da redução da penetração da luz solar, o que afeta o processo de fotossíntese ocasionando problemas como altos valores de DBO e DQO, alta concentração de matéria orgânica, entre outros, o que pode prejudicar a fauna ali existente (GUARATINI; ZANONI, 2000).

A adsorção é um processo de separação que consiste no contato do fluido (adsorvato) com uma superfície sólida porosa, chamada adsorvente, a qual pode promover a remoção dos corantes existentes no efluente. Com vista a redução de custos, dá-se especial atenção aos resíduos agroindustriais como alternativa aos adsorventes comerciais que encarecem o processo de remoção. Entre estes resíduos alternativos encontra-se a casca da castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*). Tal resíduo, encontra-se dentro do fruto da castanheira, chamado de ouriço, tendo em média 20 sementes que são justamente a castanha (LANG et al., 2014; WWF, 2022).

Diante do exposto acima, o objetivo geral deste trabalho foi analisar a remoção do corante azul de metileno através do processo de adsorção pela casca da castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*). E os objetivos específicos foram:

- Efetuar um planejamento fatorial composto central 2^2 com rotação $2^{1/2}$ para obter a superfície de resposta do processo de adsorção;
- Verificar as condições ótimas de remoção do corante azul de metileno;
- Realizar o ajuste das isotermas para os modelos de Langmuir e Freundlich no ponto central;
- Avaliar a capacidade adsortiva da casca da castanha do Brasil no processo de adsorção do corante azul de metileno conforme os modelos de Langmuir e de Freundlich.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CASTANHEIRA DO BRASIL (*Bertholletia excelsa*)

A castanheira do Brasil (*Bertholletia excelsa*) é uma das plantas mais importantes da Amazônia do ponto de vista econômico. As sementes comestíveis dessa espécie são frequentemente citadas, como um dos produtos mais importantes das reservas extrativistas da Amazônia (NYBG, 2022).

Essa espécie, também conhecida como castanha do Pará, está presente nos nove países que integram o bioma amazônico (Brasil, Peru, Colômbia, Equador, Bolívia, Guiana, Suriname, Venezuela e Guiana Francesa). As árvores possuem entre 30 m e 50 m de altura e de 1 m a 2 m de diâmetro o que a torna uma das espécies mais altas da Amazônia, como se pode ver na Figura 1 (WWF, 2022).

Figura 1 – Castanheira do Brasil



Fonte: Blog da Terra (2022).

A presença dessa espécie nesses países se deve ao fato de a castanha do Brasil ser mais propícia a se desenvolver em regiões de clima quente e úmido, sendo justamente esse o clima predominante na região amazônica. As áreas produtoras de castanha do Brasil apresentam temperaturas médias anuais que variam entre 24,3 °C e 27,2 °C com valores máximo de 30,6 °C e 32,6 °C e mínimos de 19,2 °C e 23,4 °C e umidade relativa entre 79 % e 86 % (MULLER et al., 1995).

A castanheira do Brasil dá origem a um fruto chamado de ouriço que, conforme a Figura 2, possui um formato esférico e de estrutura rígida semelhante ao coco. O ouriço mede entre 8 cm e 16 cm de diâmetro e dentro dele são encontradas as sementes que são denominadas castanhas e que popularmente são conhecidas como castanha do Brasil (ALMEIDA, 2015).

Figura 2 - Ouriços da castanheira do Brasil.



Fonte: ALMEIDA (2015).

As sementes apresentam um formato triangular anguloso, cuja casca é lenhosa, dura e rugosa com um polo radicular na base onde se origina a raiz primária, como se pode ver na Figura 3 (MORITZ, 1984). Em cada ouriço é encontrado de 10 a 25 unidades de castanhas ligados entre si por um material fibroso e desidratado (ALMEIDA, 2015).

Figura 3 – Castanhas com e sem casca.



Fonte: ALMEIDA (2015).

2.1.1 Produção e geração de resíduo

Segundo estudo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021), o Brasil produziu cerca de 33 mil toneladas de castanha do Brasil em 2020, o estado do Amazonas é o maior produtor do país sendo responsável por aproximadamente 11 mil toneladas o que equivale a 35,3 % do total produzido no país. O segundo maior produtor é o estado do Pará que tem uma produção estimada em torno de 8 mil toneladas e em terceiro está o estado do Acre que produziu cerca de 6 mil toneladas.

A cada tonelada processada são geradas em torno de 1,4 tonelada de resíduos. Se o processamento for realizado de forma industrial, tem-se maior geração de resíduos da castanha porque o fruto encontra-se no interior do ouriço e por haver o descarte das cascas amadeiradas da própria amêndoa e sua respectiva película, além de haver amêndoas que não se enquadram no padrão exigido para exportação e são descartadas (BOUVIE et al., 2016; DIAS et al., 2012).

2.2 CORANTES

Corantes são substâncias que conferem cor quando aplicados a um material. A coloração é obtida devido a característica dessas substâncias de absorverem luz na região do visível (350-760 nm) (ZOLLINGER, 1991).

Os corantes, devido a essa característica, são visíveis a olho nu e provocam uma significativa mudança na coloração dos corpos d'água em situações em que são lançados nestes como resultado do descarte de efluentes da indústria que utilizam essas substâncias, como a indústria têxtil. Os efluentes têxteis provocam contaminação que coloca em risco todo o sistema aquático (GUARATINI; ZANONI, 2000).

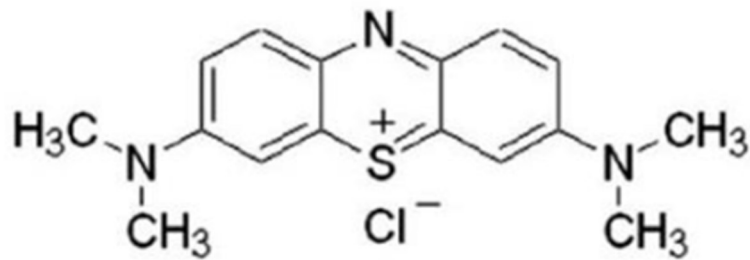
Esses efluentes apresentam altos valores de DBO e DQO, alta concentração de matéria orgânica, temperatura elevada, pH variável, compostos orgânicos coloridos e grande quantidade de sólidos suspensos. A coloração impede a penetração da luz o que retarda o processo de fotossíntese (CISNEROS; ESPINOZA; LITTER, 2002; GARG et al., 2004).

O efluente da indústria têxtil é classificado como o mais poluente entre os setores da indústria química. No Brasil, é utilizado cerca de 20 toneladas de corantes por ano, 20 % desse total é descartado como efluente (ARAVIND et al., 2016).

2.2.1 Azul de metileno

O corante azul de metileno é um composto químico aromático heterocíclico cuja fórmula molecular é $C_{16}H_{18}N_3SCl$ com massa molar de 319,8 g/mol, e com fórmula estrutural plana representada na Figura 4.

Figura 4 – Fórmula estrutural plana do azul de metileno.



Fonte: DOMINGUINI et al. (2014).

O azul de metileno é um corante catiônico cuja carga positiva é descentralizada e quando diluído a concentrações inferiores a 10^{-5} mol/L é encontrado na forma de monômero (BERGMANN; O'KONSKY, 1963).

Trata-se de um corante muito utilizado em testes de adsorção para remoção de contaminantes orgânicos de solução aquosa (AYGUN; YENISOY-KARRAKAS; DUMAN, 2003). Usado para tintura de cabelo, tingimento de madeira, na indústria têxtil, entre outros (VADIVELAN; KUMAR, 2005).

2.3 TRATAMENTOS DE EFLUENTES TÊXTEIS

2.3.1 Adsorção

A adsorção é um processo de separação em que substâncias contidas em uma fase fluida são transferidas para a superfície de um sólido que possua características adsorventes, retendo um ou mais tipos de moléculas ou íons presentes (McCABE; SMITH; HARRIOTT, 2001). Esse processo ocorre em sistemas sólido-líquido e sólido-gás em que a fase fluida (líquido ou gás) é denominada adsorvato e a fase sólida é denominada adsorvente (BUTT; GRAF; KAPPL, 2006).

O processo de adsorção de um sistema sólido-líquido é descrito por quatro etapas descritas abaixo e cada etapa está ilustrada pela Figura 5 (AKSU; ISOGLU, 2005; KALAVANTHY et al., 2005; MONTANHER; OLIVEIRA; ROLLEMBER, 2005):

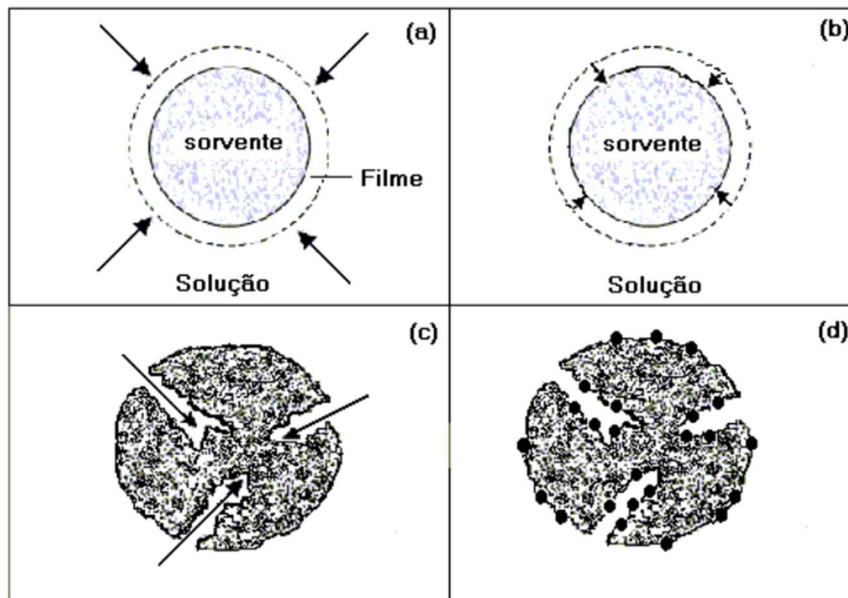
(a) transporte do adsorvato da fase aquosa para o filme que envolve a partícula do adsorvente;

(b) transporte do adsorvato através do filme até a superfície das partículas do adsorvente;

(c) transferência do adsorvato da superfície para o interior das partículas do adsorvente por difusão através dos poros;

(d) retenção dos íons nos sítios ativos do material adsorvente, por meio do processo de adsorção.

Figura 5 – Etapas do processo de adsorção.



Fonte: MONTANHER; OLIVEIRA; ROLLEMBER (2005).

2.3.1.1 Adsorventes

Esse processo de separação é amplamente utilizado em diversos trabalhos para remoção de corantes utilizando-se tanto o carvão ativado quanto biossorventes como a castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*), laranja (*Citrus sinensis L. Osbeck*), entre outros. Essa variedade de estudos evidencia a capacidade da adsorção como um processo eficiente para remoção de contaminantes.

O carvão ativado é o adsorvente mais adequado devido à sua grande capacidade de adsorção decorrente de sua grande área superficial e sua estrutura microporosa. Contudo, o uso do carvão ativado como adsorvente muitas vezes necessita de um alto investimento, elevando de forma significativa o custo final do tratamento. Nesse sentido, tem-se investigado vários adsorventes com eficiência na remoção de corantes de efluentes industriais e que sejam de baixo custo, derivados de resíduos agrícolas, industriais ou materiais naturais como alternativa ao uso do carvão ativado (ALBORNOZ et al., 2018; BERTACCO; CERON; LIKS, 2019).

Casarin (2014) usou concentração inicial de 100 mg/L de azul de metileno em agitação de 200 rpm por 90 min, pH 5 e temperatura de 25 °C em ensaios de adsorção para comparar a remoção utilizando carvão ativado em pó P.A. marca Synth e a casca da castanha do Brasil de granulometria Tyler 65. Os adsorvatos utilizados foram os íons cádmio, chumbo e cromo a 12 g/L de modo que foram obtidos percentual de remoção utilizando carvão ativado e casca de castanha do Brasil, respectivamente, de 73 % e 99 % para o Cd^{2+} , 99 % e 100 % para o Pb^{2+} e 83,3 % e 98 % para o Cr^{3+} .

No trabalho de Freitas et al. (2019), foi realizada a remoção do corante azul reativo 5G pela adsorção em 300 mg de raiz de bagaço de laranja (*Citrus sinensis L. Osbeck*) onde foi obtida remoção de 88,4 % de uma solução de concentração inicial de 100 mg/L do corante, temperatura de 40 °C, pH 2, duração de 420 min e agitação de 100 rpm.

Moreira (2021) utilizou 1 g de casca de castanha do Brasil de granulometria de 0,05 mm onde obteve 99,21 % de remoção de uma solução de azul de metileno de concentração inicial de 70 ppm através da adsorção na castanha do Brasil com agitação de 125 rpm por 60 min, a 25 °C e pH 7.

Xavier et al. (2021) utilizou 0,4 g de pedaços uniformes de aproximadamente 1 cm de comprimento de bagaço da cana de açúcar para remover 95,5 % de uma solução do corante têxtil da marca Tupy cor bordô nº 16 com concentração inicial de 200 mg/L com agitação de 144 rpm por 60 min, pH 7 e 25 °C.

2.3.1.2 Tipos de adsorção

O processo de adsorção pode ser classificado como adsorção química e adsorção física, a classificação se deve a natureza das forças superficiais envolvidas (NUNES, 2009). A adsorção física ocorre quando as moléculas da substância são retidas na superfície do sólido (adsorvente) por conta de forças intermoleculares, sem reação química. A adsorção química ocorre

com troca elétrons entre o sólido e a molécula adsorvida. Ressalta-se que é possível que os dois tipos ocorram concomitantemente (MELO, 2009; VOLESKY, 1990).

2.3.1.3 Fatores que influenciam o processo de adsorção

Alguns fatores do processo devem ser observados para que se possa otimizá-lo e obter melhores resultados, sendo eles: pH da solução, quantidade de adsorvente, superfície de contato, natureza do adsorvato, concentração da espécie de interesse e temperatura do sistema (VOLESKY, 1990).

O pH da solução interfere diretamente nos sítios ativos do material adsorvente e na especiação dos íons em solução, porque os processos que afetam a quantidade de íons disponíveis na solução como a hidrólise e reações redox são fortemente influenciadas pelo pH (OZER et al., 2004).

O aumento da massa de adsorvente promove uma maior quantidade de íons adsorvidos por conta do aumento do número de sítios ativos. Ressalta-se que em alguns casos não ocorre essa relação, pois a quantidade de íons disponíveis é inferior a quantidade de sítios ativos o que torna irrelevante o aumento da quantidade para o processo (MONTANHER, 2009).

Pelo fato de a adsorção ser um fenômeno de superfície, tem-se que uma maior área superficial favorece o processo. Isso se deve pelo aumento da quantidade de sítios ativos disponíveis em cada partícula de material adsorvente, o que possibilita que uma maior quantidade de moléculas ou íons de adsorvato possam se alojar em uma mesma partícula (SEKAR; SAKTHI; RENGARAJ, 2004).

A eletronegatividade, raio iônico e potencial de hidrólise ($pK_{\text{hidrólise}}$) são alguns dos fatores que podem influenciar o processo de adsorção (MIMURA et al., 2010). O quanto maior a eletronegatividade, maior será a interação para o processo de adsorção (SAG; AKEAEL; KUTSAL, 2002). No caso do raio iônico, o quanto menor ele for, maior será a acessibilidade à superfície e aos poros do adsorvente promovendo maior adsorção (SRIVASTAVA; MALL; MISHRA, 2008). Ao levar em conta o potencial de hidrólise, tem-se que quanto maior o $pK_{\text{hidrólise}}$, ou seja, quanto maior for a tendência a sofrer hidrólise, menor será a interação o que promove uma menor adsorção (LESMANA et al., 2009).

O aumento da concentração inicial de íons ou moléculas promove maior retenção no adsorvente, contudo se esse aumento ultrapassar uma certa quantidade não haverá sítios ativos suficientes para promover a adsorção o que faz o processo estagnar (MONTANHER, 2009).

A temperatura do processo afeta a agitação das moléculas do sistema, o que interfere nas forças de atração e repulsão entre o adsorvato e o adsorvente (MARIN et al., 2005). Além disso, o aumento da temperatura provoca a redução da viscosidade da solução o que aumenta a taxa de difusão das moléculas do adsorvato em toda camada limite externa e interna (DOGAN et al., 2006).

2.3.1.4 Isotermas de adsorção

Isoterma de adsorção é a relação de equilíbrio entre a quantidade do material adsorvido e a concentração na fase fluida, a uma temperatura constante. A isoterma é obtida ao se adicionar uma massa de adsorvente em um determinado volume de uma série de soluções com concentrações iniciais diferentes e conhecidas. Quando o sistema atinge o equilíbrio, tem-se a concentração final de soluto na solução e obtém-se a capacidade de adsorção do adsorvente (NASCIMENTO et al., 2014).

A concentração final pode ser obtida através de métodos analíticos como espectrometria e os valores da capacidade de adsorção é obtida através de balanço de massa conforme a Equação 1 (NASCIMENTO et al., 2014).

$$Q_{eq} = \frac{C_0 - C_{eq}}{m} V \quad (1)$$

Onde:

Q_{eq} é a capacidade de adsorção no equilíbrio (mg/g);

C_0 é a concentração inicial do adsorvato (mg/L);

C_{eq} é a concentração de adsorvato no equilíbrio (mg/L);

V é o volume da solução (L);

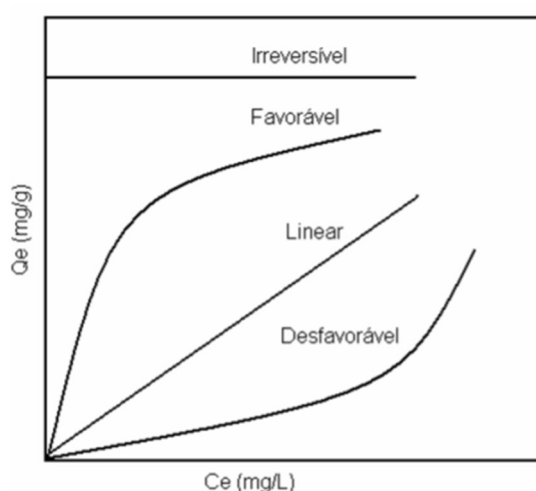
m é a massa de adsorvente (g).

2.3.1.4.1 Comportamento das isotermas

As isotermas são representadas graficamente através da relação entre Q_{eq} e C_{eq} como mostrado na Figura 6 que demonstra o comportamento das seguintes isotermas de adsorção (ALVES, 2007).

- Isoterma linear: relação diretamente proporcional entre a capacidade de adsorção e a concentração de equilíbrio do adsorvato na fase fluida;
- Isoterma favorável: alta capacidade de adsorção para uma baixa concentração de equilíbrio de adsorvato, também chamadas de isotermas convexas;
- Isoterma irreversível: capacidade de adsorção independe da concentração de equilíbrio do adsorvato;
- Isoterma desfavorável: capacidade de adsorção baixa para uma alta concentração de equilíbrio.

Figura 6 – Isoterma de adsorção



Fonte: ALVES (2007).

2.3.1.4.2 Isoterma de Langmuir

Langmuir propôs um modelo para explicar a adsorção sobre uma superfície uniforme com os seguintes pressupostos e esse modelo é representado pela Equação 2 (WITEK-KROWIAK; SZAFRAN; MODELSKI, 2011; AMUDA; GIWA; BELLO, 2007).

- a captação de íons ou moléculas ocorre sobre uma superfície homogênea;
- os adsorvatos são quimicamente adsorvidos em um número fixo de sítios ativos;
- um sítio interage somente com uma superfície de adsorvato (monocamada);
- todos os sítios são energeticamente equivalentes;
- não há qualquer interação entre os íons adsorvidos;
- a energia de ativação é a mesma em toda a superfície.

$$Q_{eq} = \frac{Q_m C_{eq} K_L}{1 + K_L C_{eq}} \quad (2)$$

Onde:

C_{eq} é a concentração do íon em equilíbrio na solução (mg/L);

Q_{eq} é a quantidade adsorvida no equilíbrio por unidade de massa do adsorvente (mg/g);

Q_m é a capacidade máxima de adsorção (mg/g);

K_L é a constante relacionada com as forças de interação adsorvente-adsorvato (L/mg).

O modelo matemático é expresso na forma linear pela Equação 3 (NJOKU, 2011).

$$\frac{C_{eq}}{Q_{eq}} = \frac{1}{Q_m K_L} + \frac{C_{eq}}{Q_m} \quad (3)$$

O comportamento favorável da isoterma de adsorção é avaliado pela constante denominada parâmetro de equilíbrio (R_L) que é calculada conforme a Equação 4 e que quando o valor se encontra entre 0 e 1 tem-se que o processo é favorável, quando for maior que 1 tem-se que o processo é desfavorável e quando igual a 1 corresponde a uma isoterma linear (HALL et al., 1966).

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L * C_0} \quad (4)$$

Onde:

C_0 é a concentração inicial de maior valor (mg/L);

K_L é a constante de Langmuir.

2.3.1.4.3 *Isoterma de Freundlich*

Este modelo pressupõe uma superfície heterogênea, considerando sítios de ligação com interação diferentes para o adsorvato supondo que os sítios que formem ligações mais fortes são ocupados primeiro enquanto os mais fracos são ocupados por último, além disso, é suposto que a adsorção acontece em várias camadas. A Equação 5 apresenta o modelo matemático (MONTANHER; OLIVEIRA; ROLLEMBER, 2005; OLIVEIRA et al., 2005).

$$Q_{eq} = k_F C_{eq}^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

Onde:

Q_{eq} é a quantidade adsorvida por grama do adsorvente no equilíbrio;

K_F é a constante de Freundlich;

C_{eq} é a concentração do adsorbato no equilíbrio;

n é o parâmetro empírico relacionada a eficiência de adsorção.

O modelo matemático é expresso na forma linear pela Equação 6.

$$\ln Q_{eq} = \ln k_F + \frac{1}{n} \ln C_{eq} \quad (6)$$

A constante n representa a eficiência da adsorção, quando $1/n$ é um valor entre zero e um tem-se que o processo pode ser classificado como um processo favorável, quando maior que 1, diz que o processo é desfavorável (NASCIMENTO et al., 2014).

2.3.2 Processos oxidativos avançados

Processos oxidativos avançados possuem potencial para degradar total ou parcialmente as moléculas presentes nos efluentes que não são completamente degradadas em sistemas biológicos de tratamento. O sistema de reação é caracterizado pela produção de radicais hidroxila, este radical é capaz de mineralizar praticamente qualquer molécula orgânica, ocorrendo a produção de CO_2 , H_2O e íons inorgânicos não tóxicos ou com baixa toxicidade (TEXEIRA; JARDIM, 2004; MALDONADO et al., 2007).

Martins et al. (2011) aplicaram métodos Fenton, foto-Fenton e UV/ H_2O_2 para o tratamento do efluente contendo corante preto Biozol UC onde o processo foto-Fenton obteve os melhores resultados em pH 3 onde removeu 95,4 % do corante.

No trabalho de Lacerda (2010) foi realizada a remoção do corante azul de metileno presente em efluentes da indústria têxtil através do tratamento fotocatalítico do efluente a partir de óxidos de ferro recobertos com dióxido de titânio. Foram utilizados três tipos de lâmpadas: luz visível, luz negra e lâmpada UV. Obteve-se remoção de até 98 % do corante azul de metileno em pH 12 utilizando-se a lâmpada de luz visível.

2.3.3 Biodegradação

A biodegradação é um processo em que um microrganismo é capaz de transformar uma molécula química complexa em uma molécula mais simples. Os microrganismos utilizam essas moléculas como fonte de carbono para obtenção de energia necessária ao crescimento e manutenção do metabolismo (BURATINI, 2008).

Ozdemir et al. (2008) estudou a biodegradação do corante acid black 210 pela bactéria *Vibrio harveyo*, que obteve uma remoção de 94 % em ensaios com duração de 24 h sem agitação, foram utilizadas soluções de 100 ppm do corante.

Almeida (2013) analisou a degradação do corante Procion Red MX-5B através do contato com o fungo filamentosso *Aspergillus terreus* que obteve uma remoção de 99 % em um ensaio de duração de 336 h.

O estudo de Agrawal et al. (2013) realizou a remoção do corante acid black 210 pela bactéria *Providencia stuartii*. No estudo foi obtida remoção total da coloração e degradação do composto em frações menores, as condições ótimas foram em pH 8 e com presença de 2,5 % de NaCl.

2.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental consiste na utilização de critérios científicos e estatísticos para a organização de um conjunto de ensaios de modo a extrair o máximo de informações úteis através de uma quantidade mínima de experimentos. No planejamento, define-se as variáveis a serem manipuladas (fatores) e quais são as variáveis de resposta (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2007).

2.4.1 Planejamento composto central rotacionado (DCCR)

O planejamento composto central é utilizado para experimentos em que o número de fatores k é maior ou igual a 2. Este tipo de delineamento é de característica simétrica e de segunda ordem e tem a finalidade de reduzir o número de ensaios, obtendo-se um erro mínimo nos experimentos. Este planejamento contém pontos fatoriais codificados como +1 ou -1, pontos axiais codificados para $+\alpha$ ou $-\alpha$, onde $\alpha = 2^{k/4}$ e um ponto central onde geralmente realiza-se de 3 a 5 repetições (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2007).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos de preparo do adsorvente e do adsorvato e análise em espectrofotômetros UV-Vis foram realizados no Laboratório de pesquisa, C-38, da Escola Superior de Tecnologia (EST) da Universidade do Estado do Amazonas – UEA. Os ensaios de adsorção foram realizados no Laboratório ILUM/HUB localizado no campus da UEA-EST.

3.1 PREPARAÇÃO DO ADSORVENTE

As cascas da *Bertholettia excelsa* foram adquiridas em uma venda local no bairro Parque 10 no município de Manaus. As cascas foram lavadas em água corrente e submetidas a aquecimento em estufa da marca Medicate (Figura 7) a 50 °C por 24 horas para remoção do excesso de umidade. A literatura recomenda temperatura em torno de 50 °C para preservar a integridade das castanhas, não correndo o risco de degradá-las devido ao calor (ÁLVARES et al., 2012; BITTENCOURT, 2020). Em seguida, o material foi levado ao moinho de facas da marca Marconi (Figura 8), para serem trituradas por uma hora e posteriormente coletadas em embalagem plástica e selada.

Figura 7 – Estufa de esterilização marca Medicate



Fonte: Própria (2023).

Figura 8 – Moinho de facas da marca Marconi.



Fonte: Própria (2023).

O material obtido da etapa de trituração foi separado por granulometria por meio de peneiras com diferentes aberturas, conforme a Tabela 1, as quais foram sobrepostas em ordem decrescente de abertura, de cima para baixo, e fixadas a um agitador de marca Produtest, como mostrado na Figura 9, e agitadas por 1 hora. Apenas o material retido na peneira de tamanho Tyler 100, foi utilizado como adsorvente neste trabalho, por propiciar maior área superficial, aumentando a quantidade de sítios ativos disponíveis e favorecendo o processo de adsorção (VOLESKY, 1990).

Figura 9 – Agitador de peneiras da marca Produtest.



Fonte: Própria (2023).

Tabela 1 – Tamanho das peneiras do processo de separação granulométrica.

Classificação	Tyler	Abertura (mm)
1	16	0,991
2	28	0,581
3	32	0,495
4	35	0,417
5	48	0,295
6	65	0,208
7	100	0,147

Fonte: BRASKEM (2002).

3.2 PREPARO DA SOLUÇÃO ESTOQUE

Foi preparada uma solução estoque de azul de metileno pH 7 com concentração de 100 mg/L, da qual foi obtida diferentes concentrações, que serviram para determinação da curva de calibração e realização dos ensaios de adsorção. Para isso, foi depositado 100 mg de azul de metileno sobre um vidro de relógio e pesado em balança analítica de marca Sartorius (Figura 10). Em seguida, esse material foi transferido para um balão volumétrico de 1 L, o qual foi preenchido com água destilada. A solução obtida foi transferida para um frasco âmbar de 1 L.

Figura 10 – Balança analítica.



Fonte: Própria (2023).

3.3 CURVA DE CALIBRAÇÃO

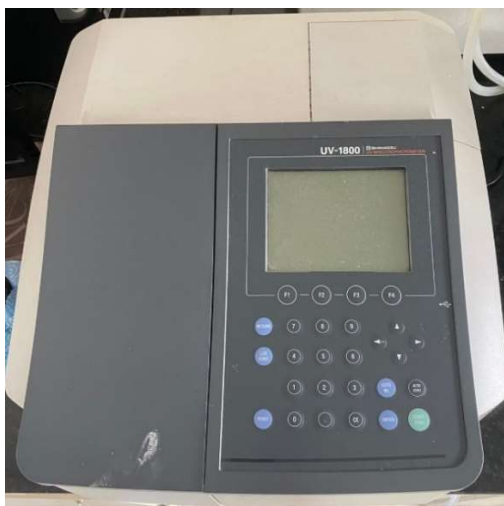
Para a construção da curva de calibração, foram preparadas soluções a partir da solução estoque, conforme as concentrações apresentadas na Tabela 2. E na sequência, foi feita a aferição da absorbância em espectrofotômetro UV-Vis 1800 UV da marca Shimadzu, como mostrado na Figura 11.

Tabela 2 – Concentrações de azul de metileno para produção da curva de calibração.

Concentração de azul de metileno (mg/L)
0,0
5,0
10,0
15,0
20,0
25,0

Fonte: Própria (2022).

Figura 11 – Espectrofotômetro UV-Vis modelo UV 1800 marca Shimadzu



Fonte: Própria (2023).

Inicialmente foi realizada uma varredura no espectrofotômetro, onde foi medida a absorbância a cada 1 nm em uma faixa de 400 a 800 nm, de modo a identificar o comprimento de onda de maior absorbância, para ser usado como referência nas análises após os ensaios de adsorção. Após a aferição das respectivas absorbâncias, foi elaborado um gráfico da

concentração de azul de metileno em função da absorbância e efetuada uma regressão linear para obtenção de uma equação da reta que melhor se ajustasse aos valores obtidos experimentalmente.

3.4 ENSAIO DE ADSORÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO

Os ensaios de adsorção, de modo geral, foram feitos a partir da mistura de 50 mL de solução em diferentes concentrações de azul de metileno e diferentes massas de casca de castanha do Brasil, as quais foram inseridas em erlenmeyers de 125 mL e agitados em shaker da marca Novatecnica (Figura 12) a 150 rpm por 30 min a 25 °C, decorrido esse tempo, a solução passou por uma etapa de filtração a vácuo, para separação das partículas sólidas das líquidas, depois o adsorvato residual foi analisado em espectrofotômetro UV-Vis.

Figura 12 – Shaker da marca Novatecnica



Fonte: Própria (2023).

A partir da absorbância aferida em espectrofotômetro UV-Vis no comprimento de onda indicado na varredura, foi utilizada a equação da curva de calibração para o cálculo da concentração final de azul de metileno.

Os ensaios de adsorção realizados para se verificar as condições ótimas de adsorção foram realizados de acordo com um planejamento fatorial composto central 2^2 , com rotação $2^{1/2}$, quadruplicata no ponto central e um único ensaio nos demais pontos.

As variáveis independentes foram a concentração de azul de metileno e a massa de castanha do Brasil (*Bertholettia excelsa*) e a variável de resposta foi a eficiência de remoção.

Os fatores e níveis para estes parâmetros estão na Tabela 3 e a matriz do planejamento experimental está na Tabela 4, o software utilizado foi o Statistica versão 12.

Tabela 3 – Fatores e níveis do planejamento fatorial composto central 2^2 .

Fatores	$-2^{1/2}$	-	0	+	$+2^{1/2}$
Azul de metileno (mg/L)	10,0000	11,4645	15,000	18,5355	20,0000
<i>Bertholettia excelsa</i> (g)	0,0100	0,0115	0,0150	0,0185	0,0200

Fonte: Própria (2022).

Tabela 4 – Matriz do planejamento fatorial composto central 2^2 .

Ensaio	Azul de metileno (mg/L)	<i>Bertholettia excelsa</i> (g)
1	+	+
2	$-2^{1/2}$	0
3	0	$+2^{1/2}$
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	+	-
8	0	$-2^{1/2}$
9	0	0
10	-	-
11	-	+
12	$+2^{1/2}$	0

Fonte: Própria (2022).

Para calcular a eficiência de remoção do azul de metileno na solução, foi usada a Equação 7 após o processo de adsorção.

$$R = \frac{C_o - C_f}{C_o} * 100 \quad (7)$$

em que:

R é a eficiência de remoção do azul de metileno pela castanha do Brasil (*Bertholettia excelsa*);

C_o é a concentração inicial do azul de metileno;

C_f é a concentração de azul de metileno após o ensaio de adsorção.

Para os ensaios de isoterma de adsorção, foram adicionados 0,015 g de casca de castanha do Brasil em cinco Erlenmeyers. Vale ressaltar, no entanto, que a massa utilizada nesses experimentos corresponde a usada no ponto central do planejamento experimental fatorial (Tabela 3) e as concentrações de azul de metileno usadas foram as mesmas que constam na Tabela 2, excluindo-se a concentração de zero mg/L.

Para o cálculo da capacidade de adsorção de equilíbrio desses experimentos, utilizou-se a Equação 1. Por fim, foi construída a isoterma de adsorção, que relaciona a capacidade de adsorção no equilíbrio com a concentração de adsorvato no equilíbrio, e realizado o ajuste tanto para o modelo de Langmuir quanto para o de Freundlich.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados encontrados nos estudos de remoção do azul de metileno pela castanha do Brasil (*Bertholettia excelsa*), serão apresentados e discutidos neste tópico.

4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Após a etapa de secagem e trituração em moinho de facas, foi obtido um total de 465,1 g de casca de castanha do Brasil, como visualizado na Figura 13. Posteriormente, o material passou pela etapa de separação por granulometria em agitador de peneiras, e na Tabela 5, são apresentadas as massas retidas em cada peneira.

Figura 13 – Casca de castanha do Brasil após trituração em moinho de facas.



Fonte: Própria (2023).

Tabela 5 – Classificação granulométrica do adsorvente.

Classificação	Tyler	Abertura (mm)	Massa (g)
1	16	0,991	259,54
2	28	0,581	41,70
3	32	0,495	94,12
4	35	0,417	14,71
5	48	0,295	35,57
6	65	0,208	3,06
7	100	0,147	12,74
Coletor	-	-	1,03
Total	-	-	462,47

A Figura 14 mostra o material retido na peneira Tyler 100, ou seja, 12,74 g de particulado com diâmetro médio de 0,147 mm, o qual foi utilizado em todos os ensaios de adsorção.

Figura 14 – Casca de castanha do Brasil de granulometria Tyler 100.

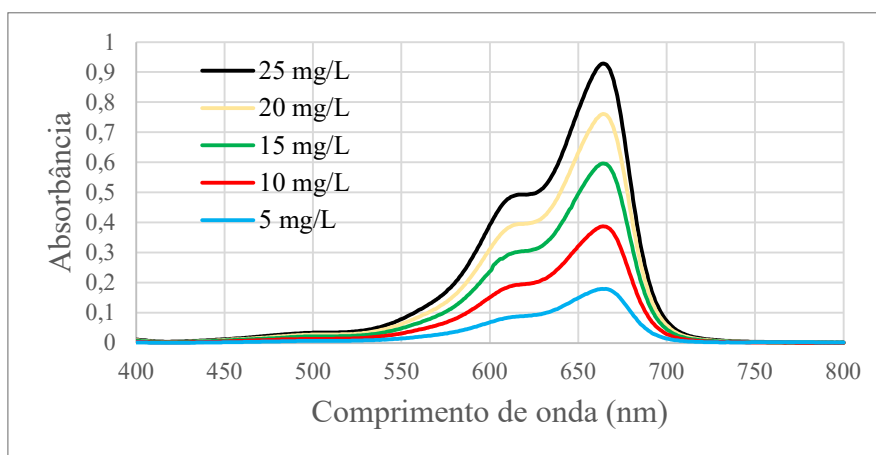


Fonte: Própria (2023).

4.2 CURVA DE CALIBRAÇÃO DO AZUL DE METILENO

A Figura 15 apresenta o espectro de absorvância obtido para as concentrações de azul de metileno, conforme a Tabela 2.

Figura 15 – Espectro de absorvância para soluções de azul de metileno.



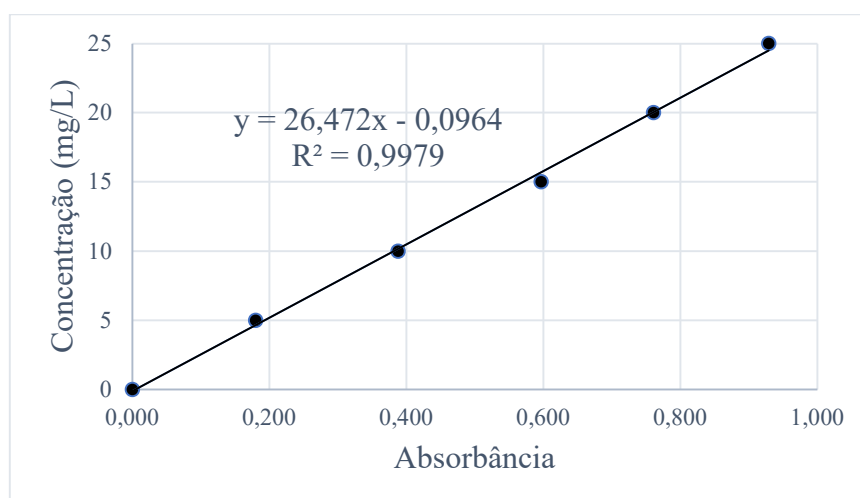
A partir da varredura do espectro foi verificado que ocorreu maior absorvância da luz no comprimento de onda de 664 nm, valor semelhante ao encontrado no trabalho de Georgin et al. (2018). E na Tabela 6, tem-se os valores de absorvância obtidos da leitura das amostras de azul de metileno nas diferentes concentrações, conforme a Tabela 2, no comprimento de onda de 664 nm.

Tabela 6 – Dados para obtenção da curva analítica do azul de metileno.

Concentração de azul de metileno (mg/L)	Absorbância
5,0	0,180
10,0	0,388
15,0	0,597
20,0	0,761
25,0	0,929

A Figura 16 mostra a curva de calibração do azul de metileno obtida dos dados presentes na Tabela 6, onde tem-se a concentração de azul de metileno em função da absorbância. Após o ajuste matemático, a equação obtida apresentou um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9979$, o que significa que a equação da reta tem uma probabilidade de 99,79 % de representar a variância das grandezas analisadas (SKOOG et al., 2006).

Figura 16 – Curva de calibração do azul de metileno.



A equação obtida através do ajuste da curva está representada na Equação 8 que foi utilizada para calcular a concentração de azul de metileno a partir da absorbância aferida no espectrofotômetro UV-Vis.

$$y = 26,472x - 0,0964 \quad (8)$$

em que:

y é a concentração de azul de metileno (mg/L);

x é a absorbância aferida no espectrofotômetro.

4.3 ENSAIOS DE ADSORÇÃO DO AZUL DE METILENO

A Figura 17 apresenta o aspecto visual da solução de azul de metileno antes e após o ensaio de adsorção nos ensaios 7 e 11. Nota-se visualmente que existe uma boa capacidade de adsorção do adsorvato pela casca da castanha do Brasil

Figura 17 – Aspecto visual antes e após o ensaio de adsorção nos ensaios 7 e 11.



Fonte: Própria (2023).

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos após os ensaios de adsorção do corante azul de metileno pela casca da *Bertholletia excelsa* realizados conforme o planejamento fatorial.

Tabela 7 – Resultado dos ensaios de adsorção realizados conforme planejamento fatorial.

Ensaio	Azul de metileno (mg/L)	<i>Bertholletia excelsa</i> (g)	Remoção (%)
1	+	+	97,66
2	-2 ^{1/2}	0	98,85
3	0	+2 ^{1/2}	98,70
4	0	0	98,17
5	0	0	97,82
6	0	0	98,17
7	+	-	93,81
8	0	-2 ^{1/2}	95,17
9	0	0	97,47
10	-	-	96,68
11	-	+	98,99
12	+2 ^{1/2}	0	95,45

Na Tabela 7, é possível verificar que o maior percentual de remoção do corante azul de metileno ocorreu no ensaio 11, o qual utilizou uma concentração de azul de metileno de 11,4645 mg/L e 0,0185 g de casca de castanha do Brasil, e se obteve uma remoção de 98,99 %.

O menor percentual de remoção ocorreu no ensaio 7, com uma concentração de adsorvato de 18,5355 mg/L, 0,0115 g de bioadsorvente e percentual de remoção de 93,81 %. Sugere-se então que, pode ter ocorrido uma saturação dos sítios ativos disponíveis nas partículas de adsorvente, com o aumento da concentração e diminuição de adsorvente, não favorecendo a remoção (MONTANHER, 2009).

Ao analisar todos os ensaios realizados, observa-se que a média de remoção do corante foi de 97,25 %, supõe-se que a alta eficiência de remoção deve-se a característica física da casca da castanha de possuir alta porosidade possibilitando maior superfície de contato o que favoreceu a adsorção (SEKAR; SAKTHI; RENGARAJ, 2004).

A análise estatística dos ensaios experimentais, tendo como variável de resposta a eficiência de remoção para o ensaio de adsorção, estão representadas na Tabela 8 e nas Figuras 18 e 19, para análise de variância (ANOVA), pelo gráfico de Pareto e superfície de resposta, respectivamente.

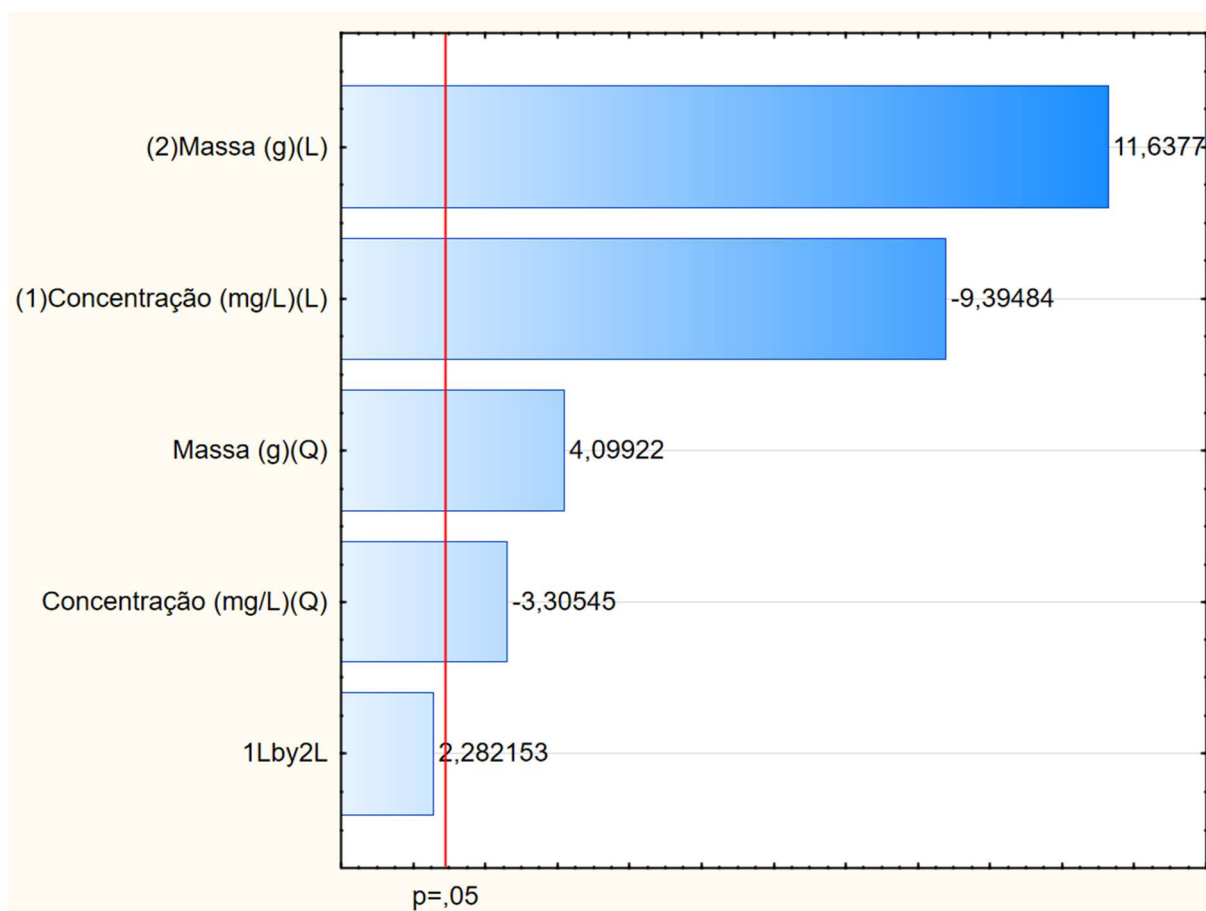
Tabela 8 – Análise de variância de eficiência de remoção do corante azul de metileno pela casca da castanha do Brasil.

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	F-valor	P-valor
(1) Concentração de adsorvato (linear)	1	10,13971	10,13971	88,2631	0,000083
Concentração de adsorvato (quadrática)	1	1,25519	1,25519	10,9260	0,016297
(2) Massa de adsorvente (linear)	1	15,55908	15,55908	135,4371	0,000024
Massa de adsorvente (quadrática)	1	1,93040	1,93040	16,8036	0,006363
(1)*(2)	1	0,59832	0,59832	5,2082	0,062615
Erro	6	0,68928	0,11488		
Total	11	29,65613			

Por meio da Tabela 8, observa-se que o p-valor está abaixo de 0,05 para concentração de azul de metileno e massa de castanha do Brasil. Assim, as variáveis de estudo foram estatisticamente significativas para o processo de remoção do corante. No entanto, a relação entre os dois fatores não foi estatisticamente significativa. Em relação ao coeficiente de determinação R^2 -adj, este indicou um percentual de 95,74 %, o que garante uma boa representatividade dos resultados pelo modelo.

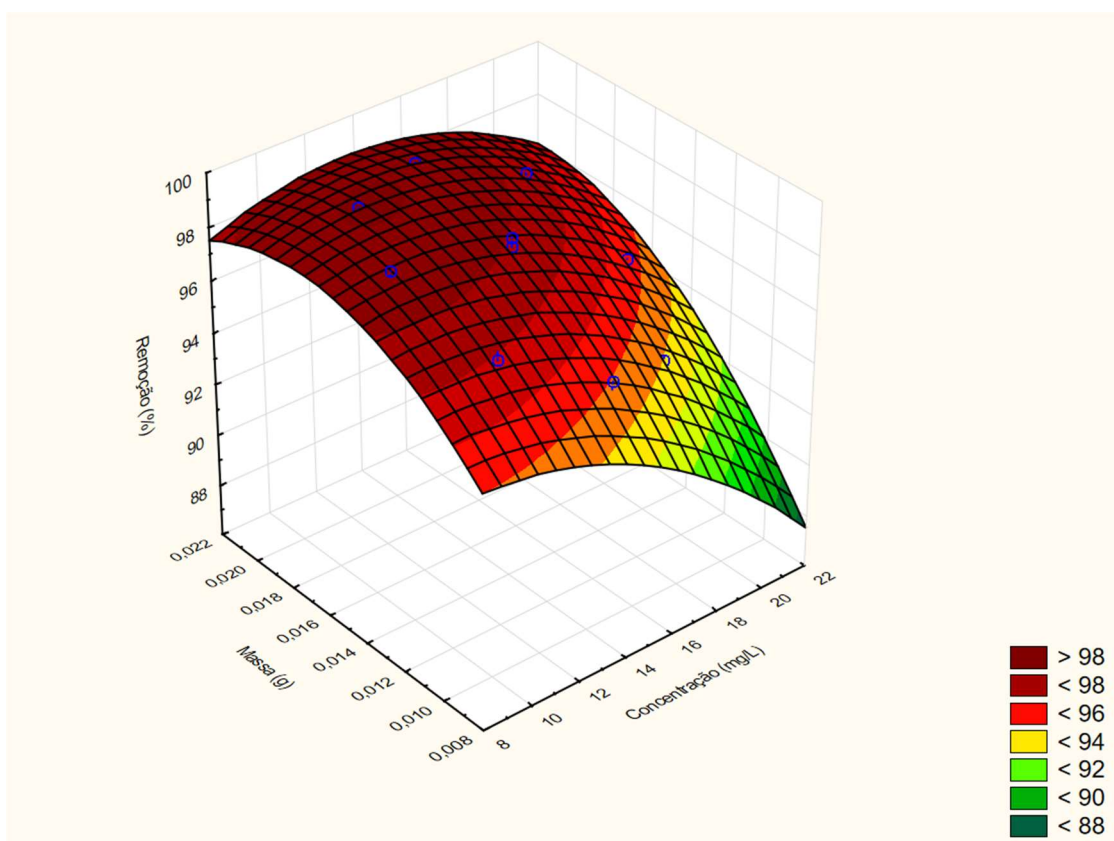
No gráfico de Pareto (Figura 18), é possível confirmar estatisticamente as variáveis significativas no processo de adsorção, ou seja, nota-se que tanto a massa de castanha do Brasil quanto a concentração de azul de metileno tiveram efeito significativo sobre a remoção do corante a um nível de significância de 0,05, onde um incremento de massa tende a propiciar um aumento na remoção, enquanto uma diminuição da concentração proporciona uma tendência no aumento na eficiência de remoção.

Figura 18 – Gráfico de Pareto de remoção do corante azul de metileno pela casca da castanha do Brasil.



A Figura 19 representa os resultados obtidos na forma de uma superfície de resposta para as variáveis concentração de azul de metileno e massa de castanha do Brasil e a superfície é descrita por um modelo matemático que está representado pela Equação 9.

Figura 19 – Superfície de resposta para as variáveis concentração de azul de metileno e massa de adsorvente em relação ao percentual de adsorvato removido.



$$Z = 85,8714 + 0,2803x + 1248,4329y - 0,0354x^2 + 30,9405xy - 43936,3636y^2 \quad (9)$$

Onde:

z é o percentual de remoção do azul de metileno (%);

x é a concentração de azul de metileno (mg/L);

y é a massa de castanha do Brasil (g).

A partir desse modelo obtido, tem-se que as condições ótimas de remoção ocorrem quando se tem uma concentração de azul de metileno de 12,0058 mg/L e uma massa de castanha do Brasil de 0,01843 g de onde é estimado um percentual de remoção de 99,06 %.

Os resultados obtidos neste estudo foram superiores aos obtidos por Brito et al. (2010) que utilizaram 2,5 g de casca da castanha do Brasil de granulometria de 0,5 mm com tempo de

agitação de 120 min e obtiveram uma remoção de 71,77 % a uma temperatura de 20 °C e 67,07 % a 60 °C em uma solução de azul de metileno de concentração inicial de 1100 mg/L com pH 6,5.

Resultados próximos aos encontrados neste trabalho, foram os obtidos por Lima (2017), em que usou como adsorvente, 4,8 g biocarvão do endocarpo do fruto do Ouricuri (*Syagrus coronata*) reativado por reação de Fenton, com granulometria de 0,149 mm e solução de 100 mg/L de azul de metileno, em pH 3. Os ensaios foram conduzidos a temperatura de 800 °C sob agitação em agitador magnético múltiplo a 500 rpm por 240 min, apresentando um percentual de 99,41 % de remoção. E o trabalho de Ponnusami, Vikram e Srivastava (2008), com concentração inicial de azul de metileno de 100 mg/L, pH 7,5, temperatura de 30 °C, sob agitação de 200 rpm por 120 min, usando 0,2 g de pó de folha de goiaba (granulometria Tyler 150), os quais obtiveram um percentual de remoção de 97,89 %.

Neste trabalho, comparado aos estudos acima citados, é possível identificar que: utilizando uma massa menor de adsorvente, sem ativação, com temperatura menor, em um menor tempo de operação, a castanha do Brasil apresenta uma alta capacidade de remoção do corante da indústria têxtil. Dessa forma, pode-se observar a possibilidade de reutilização desse resíduo de forma efetiva, minimizando o acúmulo de rejeitos e reduzindo a contaminação do meio ambiente.

4.4 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

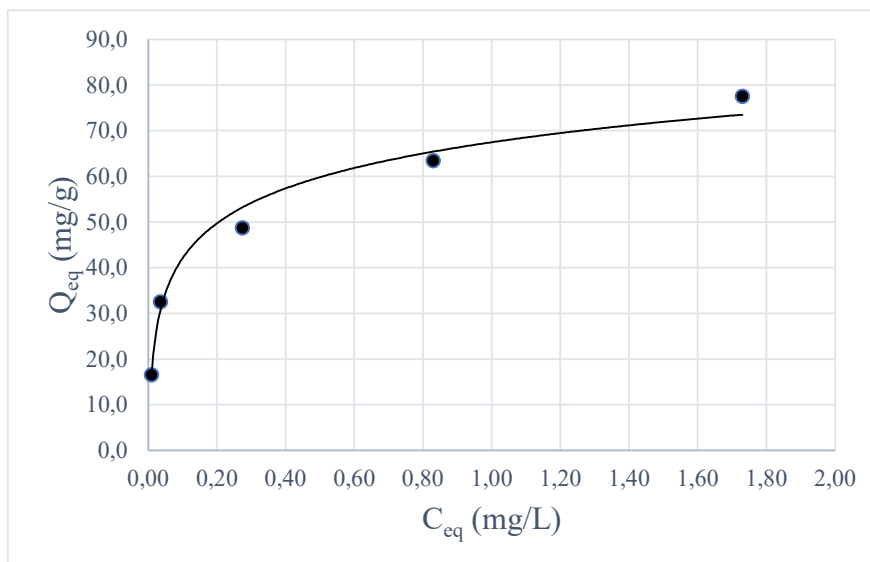
A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos dos ensaios de adsorção realizados para obtenção da isoterma de adsorção do azul de metileno utilizando a casca da castanha do Brasil como adsorvente.

Tabela 9 – Dados obtidos para a isoterma de adsorção.

C_o (mg/L)	C_{eq} (mg/L)	Remoção (%)	Q_{eq} (mg/g)
5,0	0,00949	99,81	16,6350
10,0	0,03596	99,64	32,5622
15,0	0,27421	98,17	48,7609
20,0	0,83012	95,85	63,4764
25,0	1,73017	93,08	77,5661

A partir dos dados da Tabela 9, foi plotado o gráfico da capacidade de adsorção no equilíbrio (Q_{eq}) em função da concentração de azul de metileno no equilíbrio (C_{eq}) que corresponde a curva da isoterma de adsorção, conforme a Figura 20.

Figura 20 – Isotherma de adsorção.



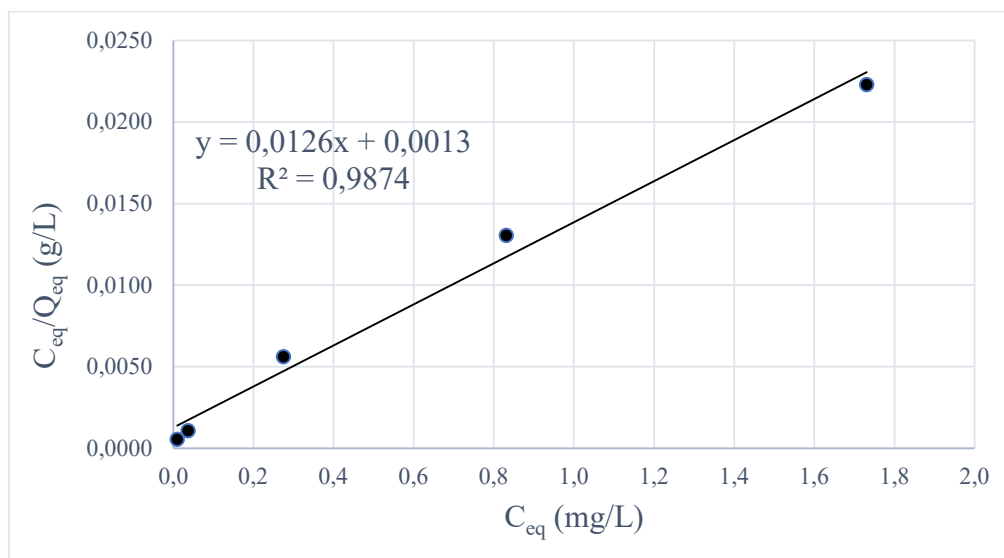
Segundo Alves (2007), o aspecto apresentado pela isoterma descrita na Figura 20 mostra indícios de que o processo de adsorção de azul de metileno pela casca da castanha do Brasil é um processo favorável, ou seja, tem alta capacidade de adsorção para uma baixa concentração de equilíbrio de adsorvato.

A Tabela 10 apresenta os valores das variáveis necessárias para a construção da isoterma de Langmuir que consiste em um gráfico da razão entre a concentração de azul de metileno no equilíbrio e a capacidade de adsorção no equilíbrio (C_{eq}/Q_{eq}) em função da concentração de azul de metileno no equilíbrio (C_{eq}) que está representada na Figura 21.

Tabela 10 – Dados para obtenção da isoterma de Langmuir.

C_{eq} (mg/L)	Q_{eq} (mg/g)	C_{eq}/Q_{eq} (g/L)
0,00949	16,6350	0,0006
0,03596	32,5622	0,0011
0,27421	48,7609	0,0056
0,83012	63,4764	0,0131
1,73017	77,5661	0,0223

Figura 21 – Isoterma de Langmuir.



A partir dos pontos experimentais apresentados na Tabela 10, realizou-se o ajuste de curva para a isoterma de Langmuir de onde obteve-se a Equação 10 que apresenta um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9874$.

$$y = 0,0126x + 0,0013 \quad (10)$$

Onde:

y é a razão da concentração de azul de metileno no equilíbrio e da capacidade de adsorção da castanha do Brasil no equilíbrio (C_{eq}/Q_{eq}) (g/L);

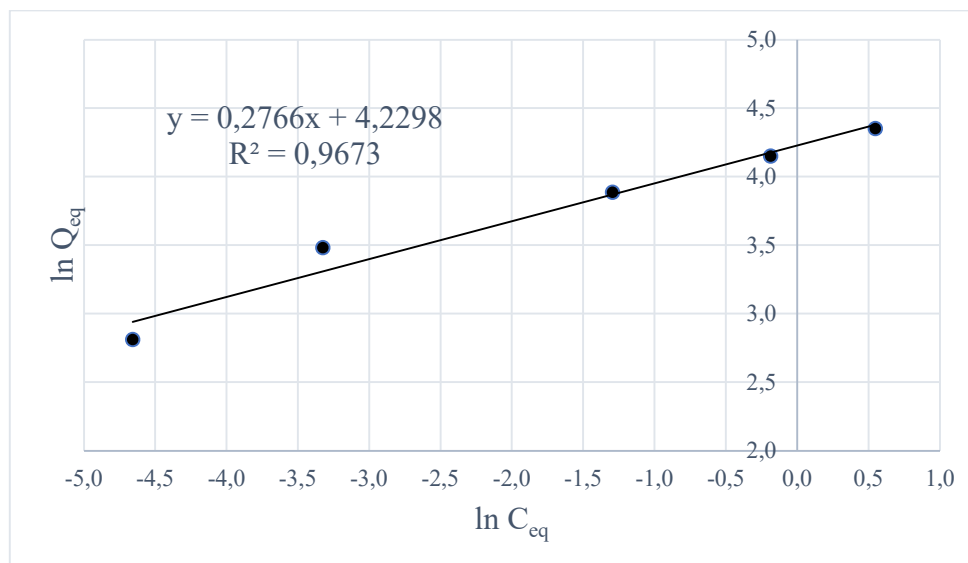
x é a concentração de azul de metileno no equilíbrio (C_{eq}) (mg/L).

A Tabela 11 apresenta os valores necessários para construção da isoterma de Freundlich que consiste em um gráfico do logaritmo natural da capacidade de adsorção no equilíbrio ($\ln Q_{eq}$) em função do logaritmo natural da concentração de azul de metileno no equilíbrio ($\ln C_{eq}$) que está representado na Figura 22.

Tabela 11 – Dados para obtenção da isoterma de Freundlich.

C_{eq} (mg/L)	Q_{eq} (mg/g)	$\ln C_{eq}$	$\ln Q_{eq}$
0,00949	16,6350	-4,6577	2,8115
0,03596	32,5622	-3,3253	3,4832
0,27421	48,7609	-1,2939	3,8869
0,83012	63,4764	-0,1862	4,1507
1,73017	77,5661	0,5482	4,3511

Figura 22 – Isoterma de Freundlich.



A partir dos pontos experimentais apresentados na Tabela 11, realizou-se o ajuste de curva para a isoterma de Freundlich de onde obteve-se a Equação 11 que apresenta um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9673$.

$$y = 0,2766x + 4,2298 \quad (11)$$

Onde:

y é a logaritmo natural da capacidade de adsorção da castanha do Brasil no equilíbrio ($\ln Q_{eq}$);
x é o logaritmo natural da concentração de azul de metileno no equilíbrio ($\ln C_{eq}$).

A partir das Equações 10 e 11 é possível obter os parâmetros das isotermas de Langmuir e Freundlich para a adsorção do azul de metileno pela castanha do Brasil que se encontram na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros das isotermas de Langmuir e Freundlich.

Langmuir				Freundlich		
Q_m (mg/g)	K_L (L/mg)	R_L	R^2	K_F	$1/n$	R^2
79,3651	9,6923	0,0041	0,9874	68,7035	0,2766	0,9673

Com base nos parâmetros obtidos dos modelos de Langmuir e Freundlich apresentados na Tabela 12, tem-se que o modelo de Langmuir apresentou o melhor ajuste de curva com um

coeficiente de determinação $R^2 = 0,9874$, logo é o modelo que melhor descreve o comportamento da adsorção do azul de metileno pela casca da castanha do Brasil. Com isso, tem-se que o adsorvato apresenta maior tendência de formar uma monocamada envolta do adsorvente fazendo com que os sítios ativos sejam ocupados de maneira homogênea (AMUDA; GIWA; BELLO, 2007).

Através do modelo de Langmuir, pode-se verificar que a capacidade máxima de adsorção (Q_m) é de 79,3651 mg/g, esse valor é próximo da maior capacidade de adsorção obtida dentre todos os ensaios de adsorção para a isoterma de adsorção realizados que foi de 77,5661 mg/g. O resultado obtido foi próximo ao de Georgin et al. (2018) que obteve uma capacidade de adsorção de 83,8 mg/g utilizando concentração inicial de 300 mg/L de azul de metileno com pH 4 com 0,05 g de casca de castanha do Brasil de granulometria de 0,25 mm em agitação de 200 rpm por 1 hora, a 25 °C.

A capacidade adsortiva obtida neste trabalho foi superior ao obtidos em estudos que utilizaram outros adsorventes para remoção do azul do metileno, como em Antunes et al. (2018) que obteve uma capacidade adsortiva de 7,5 mg/g de ensaio de adsorção de uma solução de concentração inicial de 100 mg/L com pH 3, utilizando 0,5 g de casca de abacaxi de granulometria de 0,2 mm em agitação de 150 rpm por 240 min a 30 °C e Alfredo et al. (2015) que obteve 48,7 mg/g tendo como adsorvente 0,2 g de casca de batata de granulometria de 0,425 mm com solução de concentração inicial de 1000 mg/L com pH 6,3 em temperatura de 25 °C com agitação em Banho Maria com agitação recíproca Dubnoff por 1 hora.

Além disso com o valor do parâmetro de equilíbrio R_L igual a 0,0041 pode-se constatar que o processo de adsorção pode ser classificado como um processo favorável por esse valor se encontrar em um valor entre zero e um (HALL et al., 1966).

5 CONCLUSÃO

Os ensaios realizados, conforme o planejamento experimental fatorial, geraram resultados que permitiram a obtenção de uma superfície de resposta do processo, o que possibilitou realizar o estudo acerca da eficiência da remoção do azul de metileno pela casca da castanha do Brasil.

A partir dos dados estatísticos advindo da superfície de resposta, estimou como condições ótimas para os ensaios de adsorção, dentro das condições de operação utilizadas, como sendo uma concentração de 12,0058 mg/L de azul de metileno e uma massa de 0,01843 g de casca de *Bertholletia excelsa* onde tem-se como estimativa para a eficiência de remoção de 99,06 %.

O experimento realizado possibilitou a obtenção das isotermas de adsorção do azul de metileno pela castanha do Brasil tanto conforme o modelo de Langmuir quanto o modelo de Freundlich.

Verificou-se que a isoterma de adsorção se ajustou melhor ao modelo de Langmuir, a partir deste modelo estimou-se uma capacidade máxima de adsorção de 79,3651 mg/g, além disso foi observado que se trata de um processo de adsorção classificado como favorável.

Portanto, a análise da remoção do corante azul de metileno possibilitou evidenciar a casca da castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*) como um adsorvente alternativo de baixo custo para remoção do corante.

6 PERSPECTIVAS

- Realizar experimentos para obtenção de isoterma de adsorção com a quantidade de 0,01843 g de adsorvente, sendo essa a massa considerada como ótima pela superfície de resposta;
- Avaliar a remoção de azul de metileno na concentração inicial de 100 mg/L, além de outros fatores tais como: pH, temperatura e granulometria;
- Realizar ensaios de adsorção para comparar com outros adsorventes advindos de resíduos agroindustriais;
- Estudar a adsorção em efluentes industriais.

REFERÊNCIAS

- ADEGOKE, K. A.; BELLO, O. S. Dye sequestration using agricultural wastes as adsorbents. **Water Resources and Industry**. v. 5, n. 4, p. 8-24, 2015.
- AGRAWAL, S.; TIPRE, P B.; DAVE, S. Optimization of triazo Acid Black 210 dye degradation by *Providencia sp.* SRS82 and elucidation of degradation pathway. **Process biochemistry**, v. 49, p. 110-119, 2014.
- AKSU, Z.; ISOGLU, I. A. Removal of cooper (II) ions from aqueous solution by biosorption onto agricultural waste sugar beet pulp. **Process Biochemistry**, v. 40, n. 9, p. 3031-3044, 2005.
- ALBORNOZ, S.L.; ROCHA, R. D. C.; LIMA, V. A.; PARABOCZ, C. R. B.; MARQUES, R. G.; SÁNCHEZ, W.N. (2018). Adsorption of Textile Dyes Reactive Red 195 and Reactive Blue 203 on Apple Pomace Kinetic, Equilibrium, Thermodynamic and Mechanism Studies. In: 12 Encontro Brasileiro Sobre Adsorção, 1, 416-421.
- ALFREDO, A. P. C.; GONÇALVES, G. C.; LOBO, V. S.; MONTANHER, S. F. Adsorção de Azul de Metileno em Casca de Batata Utilizando Sistemas em Batelada e Coluna de Leito Fixo. **Revista Virtual de Química**. v. 7. n. 6, p. 1909-1920, 2015.
- ALMEIDA, E. J. R. Estudo da biorremediação dos azo-corantes têsteis Acid Blue 161 e Procion Red MX-5B por fungos filamentosos em solução simples e solução binária associado a testes de toxicidade com *Lactuca sativa* e *Artemia salina*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista – UNESP, 2013.
- ALMEIDA, J. J. **Do extrativismo à domesticação: as possibilidades da castanha do pará**. Tese (Doutorado em História). Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2015.
- ÁLVARES, V. S.; CASTRO, I. M.; COSTA, D. A.; LIMA, A. C.; MADRUGA, A. L. S. Qualidade da castanha do Brasil do comércio de Rio Branco, Acre. **ACTA amazônica**. v. 42, n. 2, p. 269-274, Manaus, 2012.
- ALVES, A. C. M. **Avaliação do tratamento de efluentes líquidos contendo cobre e chumbo por adsorção em carvão ativado**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento). Universidade Federal de Alagoas – UFAL. Maceió, 2007.
- AMUDA, O. S.; GIWA, A. A.; BELLO, I. A. Removal of heavy metal from industrial wastewater using modified activated coconut shell carbon. **Biochemical Engineering**. v. 132, p. 174-181, 2007.
- ANTUNES, E. C. E. S.; PEREIRA, J. E. S.; PEREIRA, R. L. S.; MEDEIROS, M. F. D.; BARROS NETO, E. L. Remoção de corante têxtil utilizando a casca de abacaxi como adsorvente natural. **Holos**. v. 3, p. 81-97, 2018.
- ARAVIND, P. et al. Eco-friendly and facile integrated biologicalcum-photo assisted electrooxidation process for degradation of textile wastewater. **Water Research**. v. 93, p. 230-241, 2016.

AYGUN, A.; YENISOY-KARRAKAS, S.; DUMAN, I. Production of granular activated carbon from fruit stones and nutshells and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties. **Microporous and Mesoporous Materials**. v. 66, p. 189-195, 2003.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 3 ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2007.

BERGMANN, K.; O'KONSKY, C. T. A Spectroscopy study of methylene blue monomer, dimer, and complexes with montmorillonite. **Journal of Physical Chemistry**. v. 67, p. 2169-2177, 1963.

BERTACCO, T. C.; CERON, L. P.; LIKS, L. A. Verificação da capacidade de adsorção da cinza da casca de arroz em efluente de cromo hexavalente em fluxo contínuo. **Engevista**, v. 21, n. 1, p. 114-125, 2019.

BITENCOURT, M. A. F. **Isotermas de dessorção, secagem e caracterização nutricional das amêndoas da castanha do Brasil da região Amazônica**. Dissertação (mestrado), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Rio Verde, 2020.

Blog da Terra. Disponível em: <https://blogdaterracombr.wordpress.com/2020/05/12/castanha-do-brasil-uma-gigante-ameacada/>. Acesso em 16 de julho de 2022.

BOUVIE, L.; BORTELLA, D. R.; PORTO, P. A. O.; SILVA, A. C.; LEONEL, S. Caracterização físico-química dos frutos de castanheira do Brasil. **Nativa**, v. 4, n. 2, p. 107-111, 2016.

BUTT, H. J.; GRAF, K.; KAPPL, M. **Physics and chemistry of interfaces**. 2 ed. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 2006.

BRASKEM. **Tabela de peneiras padrão**. Disponível em: https://www.braskem.com.br/Portal/Principal/Arquivos/html/boletm_tecnico/Tabela_de_peneiras_padrao.pdf. Acesso em 16 de fevereiro de 2023.

BRITO, S. M. O.; ANDRADE, H. M. C.; SOARES, L.F.; AZEVEDO, R.P. Brazil nut shells as a new biosorbent to remove methylene blue and indigo carmine from aqueous solutions. **Journal of Hazardous Materials**. v. 174, p. 84-92, 2010.

BURATINI, S. V.; ZAGATTO, P.; BERTOLETTI, E. **Ecotoxicologia Aquática, Princípios e Aplicações**. 2 ed, São Carlos: RiMa, 2008.

CASARIN, J. **Adsorção de íons metálicos utilizando a casca da semente de castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*) como bioissorvente**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2014.

CISNEROS, R. L.; ESPINOZA, A. G.; LITTER, M. I. **Chemosphere**. v. 48, p. 393, 2002.

DAMSON, A. W.; CAST, A. P. **Physical chemistry of Surfaces**. 6 ed. New York: John Wiley and Sons, 1997.

DIAS, J. M. C. S.; SANTOS, D. T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2012.

DOMINGUINI, L.; MENEGARO, D. A.; MIGUEL, T. F.; Bó, M. D. Utilização de resíduos de materiais cerâmicos na adsorção de corante Azul de Metileno. **Cerâmica**, v. 60, p. 218–222, 2014.

DOGAN, M.; ALKAN, M. DEMIRBAS, O. Adsorption kinetics of maxilo blue GRL onto sepiolite. **Chemical Engineering Journal**, v. 124, p. 89-1010, 2006.

FREITAS, T. S. M.; RIGUETO, C. V. T.; GERALDI, C. A. Q.; LOSS, R. A.; GUEDES, S. F.; ARANDA, D. A. G.; MUCHAVE, G. J.; GONCALVES, J. A. Biossorção do bagalo de laranja (*Citrus sinensis* L. Osbeck) na remoção de corante azul reativo 5G. **Engevista**, v. 21, n. 2, p. 256-266, 2019.

GARG, V. K.; AMITA M.; KUMAR, R.; GUPTA, R. Basic dye (methylene blue) removal from simulated wastewater by adsorption usin indian rosewood sawdust: a timber industry waste. **Elsevier**, v. 63, n. 3, p. 243-250, 2004.

GEORGIN, J.; MARQUES, B. S.; PERES, E. C.; ALLASIA, D.; DOTTO, G. L. Biosorption of cationic dyes by Pará chestnut husk (*Bertholletia excelsa*). **Water Science & Technology**, v. 77, n. 6, p. 1612-1621, 2018.

GUARATINI, C. I.; ZANONI, M. V. B. Corantes Têxteis. **Química Nova**, v. 23, n. 1, p. 71-78, 2000.

HALL, K. R.; EAGLETON, L. C.; ACRIVOS, A.; VERMEULEN, T. Pore and solid diffusion kinetics in fixed-bed adsorption under constant pattern conditions. **Industrial Engineering Fundamentals**, v. 5, n. 2, p. 212-223, 1966.

IBGE. Disponível em <https://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2021/10/06/amazonas-e-o-maior-produtor-de-castanha-do-para-do-pais-diz-ibge.ghtml>. Acesso em 23 de agosto de 2022

KALAVANTHY, M. H. et al. Kinetics and isotherm studies of Cu (II) adsorption onto H₃PO₄ activated rubber wood sawdust. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 292, n. 3, p. 354-362, 2005.

LACERDA, C. A. M. **Avaliação da efetividade de remoção de cor de soluções corantes e efluentes têxteis pelo tratamento fotocatalítico com óxidos de ferro recobertos com dióxido de titânio**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

LANG, W.; HUANG, Q.; JIANG, X.; ZHOU, L.; FAN, H. Adsorption of Cu²⁺ and methylene blue on dodecyl sulfobetaine surfactante-modified montmorillonite. **Applied Clay Science**, v. 95, p. 150-158, 2014.

LESMANA, S.; FEBRIANA, N.; SOETAREDJO, F. E.; SUNARSO, J. Studies on potential applications of biomass for the separation of heavy metal from water and wastewater. **Biochemical Engineering Journal**, v. 44, n. 1, p. 19-21, 2009.

LIMA, R. S. **Adsorção de azul de metileno em biocarvão do endocarpo do fruto do ouricuri (*Syagrus coronata* (Mart) Becc.) reativado por reação de fenton**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas, 2017.

MALDONADO, M. I.; PASSARINHO, P. C.; OLLER, I.; GERNJAK, W.; FERNÁNDEZ, P.; BLANCO, J.; MALATO, S. Photocatalytic degradation of EU priority substances: A comparison between TiO₂ and Fenton plus photo-Fenton in a solar pilot plant. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 185, p. 354-363, 2007.

MARIN, P.; BORBA, C. E.; MODENES, A. N.; OLIVEIRA, S. P. D.; PASSAIA, N.; FIGUEIREDO, L. S. Avaliação do efeito da temperatura, pH e granulometria do adsorvente, na adsorção do corante Azul Reativo 5G. **Engevista**, v. 1, n. 1, p. 59-68, 2015.

MARTINS, L. M.; SILVA, C. E.; MOITA NETO, J. M.; LIMA, A. S.; MOREIRA, R. F. P. M. Aplicação de fenton, foto-fenton e UV/H₂O₂ no tratamento de efluente têxtil sintético contendo o corante Preto Biozol UC. **Eng Sanit Ambient**, v. 16, n. 3, p. 261-270, 2011.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 6 ed., McGraw-Hill, 2001.

MELO, C. R. **Síntese de zeólita tipo 5^a a partir de caulim para adsorção de metais pesados de soluções aquosas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2009.

MIMURA, A. M. S.; VIEIRA, T. V. A.; MARTELLI, P. B. Aplicação da casca de arroz na adsorção dos íons Cu⁺², Al⁺³, Ni⁺² e Zn⁺². **Química Nova**, v. 33, n. 6, p. 1279-1284, 2010.

MONTANHER, S. F. **Utilização da biomassa de bagaço de laranja como material sorvente de íons metálicos presentes em soluções aquosas**. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Estadual de Maringá – UEM, 2009.

MONTANHER, S. F.; OLIVEIRA, E. A.; ROLLEMBER, M. C. Removal of metal ions from aqueous solutions by sorption onto rice bran. **Journal of Hazardous Material**, v. 117, p. 207-211, 2005.

MOREIRA, C. F. **Adsorção do corante têxtil azul de metileno usando como adsorvente a casca da castanha do Brasil (*Bertholettia excelsa*)**. Bagé, RS. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pampa, 2021.

MORITZ, A. **Estudos biológicos da floração e frutificação da castanha do Brasil**. EMBRAPA, 1984.

MULLER, C. H.; FIQUEIREDO, F. J. C.; KATO, A. K.; CARVALHO, J. E. U.; STEIN, R. L. B.; SILVA, A. B. **Coleção Plantar: Castanha do Brasil**. Embrapa, 1995.

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

NJOKU, V. O. Adsorption of Copper (II) and Lead (II) from Aqueous Solutions onto Nigerian Natural Clay. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 5, n. 5, p. 346-353, 2011.

NYBG - The New York Botanical Garden. **The Brazil Nut Industry – Past, Present and Future**. Disponível em: <https://www.nybg.org/bsci/braznut/>. Acesso em 16 de julho de 2022.

NUNES, D. L. **Preparação de carvão ativado a partir de torta prensada de *Papuanussativues l.* e utilização para clarificação de soluções**. Dissertação (Mestrado em Ciências de Alimentos). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.

OLIVEIRA, E. A. MONTANHER, S. F.; ANDRADE, A. D.; NOBREGA, J. A.; ROLLEMBERG, M. C. Equilibrium studies for the sorption of chromium and nickel from aqueous solutions using raw rice bran. **Process Biochemistry**, v. 49, n. 11, p. 3485-3490, 2005.

OZDEMIR, G.; PAZARBASI, B.; KOCYIGIT, A.; OMEROGU, E.; YASA, I.; KARABOZ, I. Decolorization of Acid Black 210 by *Vibrio harveyi* TEMS1, a newly isolated bioluminescent bacterium from Izmir Bay, Turkey. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 24, p. 1375-1381, 2008.

OZER, A.; OZER, D.; OZER, A. The adsorption of copper (II) ions on to dehydrated wheat bran (DWB): determination of the equilibrium and thermodynamic parameters. **Process Biochemistry**, v. 39, p. 2183-2191, 2004.

PONNUSAMI, V.; VIKRAM, S.; SSIVASTAVA, S. N. Guava (*Psidium guajava*) leaf powder: novel adsorbent for removal of methylene blue from aqueous solutions. **Journal of hazardous materials**, v. 152, p. 276-286, 2008.

SAG, Y.; AKEAEL, B.; KUTSAL, T. Ternary biosorption equilibria of Cr (VI), Cu (II) and Cd (II), on *Rhizopus arrhizus*. **Separation Science and Technology**, v. 37, n. 2, p. 279-309, 2002.

SEKAR, M.; SAKTHI, V.; RENGARAJ, S. Kinetics and equilibrium adsorption study of lead (II) onto activated carbon prepared from coconut shell. **Colloid and Interface Science**, v. 279, p. 307-313, 2004.

SKOOG, D. A., WEST, D. M., HOLLER, F. J., CROUCH, S. R. **Fundamentos de Química Analítica**. 8 ed., Editora Thomson, 2006.

SRIVASTAVA, V. C.; MALL, I. D.; MISHRA, I. M. Adsorption of toxic metal ions onto activated carbon. Study of sorption behaviour through characterization and kinetics. **Chemical Engineering and Processing**, v. 47, n. 8, p. 1269-1280, 2008.

TEIXEIRA, C. P.; JARDIM, A. **Processos Oxidativos Avançados – Conceitos teóricos**. Caderno temático, v. 3. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Instituto de Química – IQ, Laboratório de Química Ambiental – LQA. Campinas, 2004.

VADIVELAN, V.; KUMAR, K. V. Equilibrium, kinetics, mechanism, and process design for the sorption of methylene blue onto rice husk. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 286, p. 90-100, 2005.

VOLESKY, B. **Biosorption of heavy metals**. CRC Press, 1990.

WITEK-KROWIAK, A.; SZAFRAN, R. G.; MODELSKI. Biosorption of heavy metals from aqueous solutions onto peanut shell as a low-cost biosorbent. **Desalination**, v. 265, n. 1-3, p. 126-134, 2011.

WWF-Brasil. **Castanheira do Brasil: Grandiosa e Ameaçada**. Disponível em: https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/especiais/biodiversidade/especie_do_mes/fevereiro_castanheira_do_brasil/. Acesso em 16 de julho de 2022.

XAVIER, C. S. F.; VIEIRA, F. F.; ALVES, M. P.; SOUSA, J. T. Utilização do bagaço de cana de açúcar na adsorção de corantes têxteis em soluções aquosas. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, 2021.

ZOLLINGER, H. R. **Color chemistry: Syntheses, properties and applications of organic dyes and pigments**. Wiley-VCH: Weinheim, New York, 2. ed, 1991.