



Universidade Federal de Catalão
Instituto de Química
Programa de Pós Graduação em Química



**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA ANALÍTICA DE BAIXO
CUSTO PARA AVALIAÇÃO DA ADSORÇÃO DO CORANTE
FLUORESCÉINA**

James Michael Silva

**Catalão-GO
2024**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO

INSTITUTO DE QUÍMICA

Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar, número 1120, - Bairro Setor Universitário, Catalão/GO, CEP 75704-020
Telefone: - - <https://www.ufcat.edu.br>

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA)

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DE TESES E DISSERTAÇÕES DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO (UFCAT)

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Catalão (UFCAT) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFCAT), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFCAT é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o(a) autor(a) e o(a) orientador(a) Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação ou Tese?

DISSERTAÇÃO

2. Nome completo do autor: **James Michael Silva**

Nome completo do(a) orientador(a): **Profª. Dra. Vanessa Nunes Alves**

3. Título do trabalho

Título: **DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA ANALÍTICA DE BAIXO CUSTO PARA AVALIAÇÃO DA ADSORÇÃO DO CORANTE FLUORESCÉINA**

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento: [X] SIM [] NÃO¹

[¹] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs.: Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor



Documento assinado eletronicamente por **VANESSA NUNES ALVES, Orientador(a)**, em 08/07/2024, às 17:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **James Silva registrado(a) civilmente como James Michael Silva, Usuário Externo**, em 09/07/2024, às 18:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufcat.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0085170** e o código CRC **28DDD94D**.

JAMES MICHAEL SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA ANALÍTICA DE BAIXO
CUSTO PARA AVALIAÇÃO DA ADSORÇÃO DO CORANTE
FLUORESCÉINA**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação do Instituto de Química da Universidade Federal de Catalão, como requisito para obtenção do título de Mestre em Química.

Orientadora:

Profa. Dra. Vanessa Nunes Alves

**Catalão-GO
2024**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFCAT.

Silva, James Michael
DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA ANALÍTICA DE BAIXO
CUSTO PARA AVALIAÇÃO DA ADSORÇÃO DO CORANTE
FLUORESCÉINA / James Michael Silva. - 2024.
122, CXXII f.

Orientadora: Profa. Dra. Vanessa Nunes Alves.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Catalão, Instituto
de Química, Catalão, Programa de Pós-Graduação em Química,
Catalão, 2024.

Apêndice.
Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de
figuras, lista de tabelas.

1. Corantes. 2. Adsorção . 3. Fluoresceína. 4. Sensores. 5.
TSL2561. I. Alves, Vanessa Nunes, orient. II. Título.

CDU 543

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 31 da sessão de Defesa de Dissertação de **James Michael Silva**, que confere o título de Mestre em Química, no Programa de Pós-graduação em Química da UFCAT.

Aos quinze dias do mês de março de dois mil e vinte e quatro, a partir das 13:30 horas, realizou-se no Miniauditório Congadas - Bloco L da UFCAT, a sessão pública de Defesa de Dissertação do(a) discente **James Michael Silva**, intitulada "**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA DE BAIXO CUSTO PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE FOLHAS DE TABOA (*TYPHA ANGUSTIFOLIA L.*) NA ADSORÇÃO DO CORANTE FLUORESCÉINA EM AMOSTRAS AQUOSAS**" na área de concentração em Química. Os trabalhos foram instalados pela Orientadora, Professora Doutora Vanessa Nunes Alves (PPGQ Mestrado - UFCAT) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor João Flávio da Silveira Petrucci (IQ - UFU), membro titular externo e Professor Doutor Alberthmeiry Teixeira de Figueiredo (PPGQ Mestrado - UFCAT), membro titular interno. Durante a arguição os membros da banca fizeram sugestões de pequenas alterações e complementações no trabalho final. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pela Professora Doutora Vanessa Nunes Alves, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos membros da Banca Examinadora.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA:

DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA ANALÍTICA DE BAIXO CUSTO PARA AVALIAÇÃO DA ADSORÇÃO DO CORANTE FLUORESCÉINA



Documento assinado eletronicamente por **VANESSA NUNES ALVES, Orientador(a)**, em 08/07/2024, às 16:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALBERTHMEIRY TEIXEIRA DE FIGUEREDO, Professor(a) do Magistério Superior**, em 09/07/2024, às 08:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Flávio da Silveira Petrucci, Usuário Externo**, em 09/07/2024, às 13:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufcat.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0086907** e o código CRC **31338E22**.

**“Não quero ter a terrível limitação de quem vive apenas do que é passível
de fazer sentido. Eu não: quero é uma verdade inventada”
Clarice Lispector**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, pela vida e por ser meu apoio incondicional em todos os momentos difíceis que enfrentei até hoje.

Aos meus pais, Jaimes Cardoso da Silva e Cleide Maria de Araújo, por sempre me apoiarem em todas as minhas decisões, e por sempre estarem ao meu lado.

Aos meus irmãos, Diuliam Felipe Cardoso de Araujo, Franklin Cardoso Silva, Matheus Magno Cardoso Silva e Jan Michel Silva pelos momentos de descontração, e por me incentivarem a sempre seguir em frente.

Agradeço imensamente a minha orientadora, Dra. Vanessa Nunes Alves pela excelente orientação e por ter acreditado em mim desde o início dessa jornada e por todas suas contribuições à minha formação acadêmica.

Ao professor Eduardo Souza do Instituto de Física da UFCAT, pela confiança e análises de fluorescência.

Aos professores da Universidade Federal de Uberlândia - UFU:

Dr. João Flavio da Silveira Petrucci, pela disponibilidade em sanar todas as dúvidas relacionadas a construção da plataforma analítica;

Dr. Guedmiller Souza de Oliveira, pela parceria no desenvolvimento do estudo de dinâmica molecular.

Aos meus grandes amigos Marcos Eduardo e Thiago Felipe, por sempre se fazerem presentes, mesmo que de longe, compartilhando momentos de alegria e tristezas.

Aos meus amigos e parceiros de laboratório, Amanda Barbosa, Ana Alice, Wallace Henrique, Nathalia Esteves pelas longas conversas e debates que tornaram os dias de trabalho mais leve e divertido.

Ao Instituto de Química e a UFCAT.

Aos órgãos de fomento CAPES e FAPEG.

RESUMO

O uso de corantes está presente desde a indústria têxtil, indústria de medicamentos, até a fabricação de alimentos. Porém, o descarte incorreto em rios e lagos representa uma crescente preocupação ambiental, pois além de prejudicarem o meio ambiente, prejudicam também a saúde humana. Globalmente, pesquisadores têm se dedicado ao desenvolvimento de métodos para remediar e quantificar contaminantes ambientais, e entre as diversas abordagens exploradas, destaca-se o uso de adsorventes, em conjunto com técnicas de detecção de baixo custo. Essa combinação apresenta um vasto potencial dentro das tecnologias emergentes, oferecendo uma solução viável e acessível para o monitoramento e mitigação da contaminação ambiental. Assim este trabalho tem como objetivo desenvolver uma plataforma de baixo custo para avaliar a capacidade das folhas de taboa (*Typha angustifolia* L.) na adsorção do corante Fluoresceína Sódica (FS) em amostras aquosas. A determinação da porcentagem de adsorção foi realizada através da leitura antes e depois da adsorção, onde a amostra é excitada por um LED azul (460 nm) e a leitura do sinal é realizada por um sensor TSL2561. As folhas de taboa demonstraram um potencial de adsorção superior a 40% frente ao corante FS. Foram realizadas caracterizações das folhas de taboa através de análises de espectroscopia de absorção na região do infravermelho (IR), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e ponto de carga zero (pH_{PCZ}). Os resultados de caracterização apontaram $pH_{PCZ}=6,76$. A análise de IR indicou uma composição característica de materiais vegetais, com grupos funcionais característicos das estruturas de celulose, hemicelulose e lignina. O MEV revelou uma superfície heterogênea e porosa. Os dados cinéticos de adsorção foram avaliados segundo os modelos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem, Avrami, Weber Morris e Elovich, sendo observado que o melhor ajuste foi obtido para o modelo de Elovich, com o equilíbrio sendo atingido após 30 minutos de contato. A influência da concentração no mecanismo de adsorção foi avaliada utilizando os modelos de isotermas de Langmuir, Freundlich e Sips, todos apresentando excelente ajuste, com R^2 superiores a 0,95. Foi realizado um estudo de dinâmica molecular em conjunto com ensaios experimentais, ambos indicando que a espécie em $pH=2$ é a que mais interage com o adsorvente, resultando em uma maior remoção do corante. Os resultados de adsorção foram medidos por meio da plataforma desenvolvida e comparados com os resultados obtidos no espectrofluorômetro, não apresentando diferenças estatísticas (t e f, 95% de confiança). As condições otimizadas da plataforma resultaram em uma faixa linear de 0,1 a 25 $mg\ L^{-1}$, com um tempo de análise e volume de amostra de 1 minuto e 3,0 μL respectivamente. Recuperações entre 82% e 103% foram obtidas. O limite de detecção (LD) e o limite de quantificação (LQ) obtidos foram de 0,1 e 0,025 $mg\ L^{-1}$, respectivamente. Dessa forma, conclui-se que a plataforma desenvolvida pode ser empregada na determinação da adsorção da FS através das folhas de taboa.

Palavras-chave: Corantes, Adsorção, Fluoresceína, Sensores, TSL2561.

ABSTRACT

The use of dyes is present in industries ranging from textile, pharmaceuticals to food manufacturing. However, improper disposal into rivers and lakes represents a growing environmental concern, as it not only harms the environment but also human health. Globally, researchers have been dedicated to developing methods to remediate and quantify environmental contaminants, and among the various approaches explored, the use of adsorbents, in conjunction with low-cost detection techniques, stands out. This combination holds significant potential within emerging technologies, offering a viable and accessible solution for environmental contamination monitoring and mitigation. Thus, this study aims to develop a low-cost platform to assess the capacity of *Typha angustifolia* L. leaves in adsorbing Fluorescein Sodium (FS) dye in aqueous samples. The determination of adsorption percentage was conducted through readings before and after adsorption, where the sample is excited by a blue LED (460 nm), and the signal reading is performed by a TSL2561 sensor. *Typha angustifolia* L. leaves demonstrated an adsorption potential exceeding 40% against FS dye. Characterizations of *Typha angustifolia* L. leaves were carried out through infrared spectroscopy (IR) analysis, scanning electron microscopy (SEM), and zero point of charge (pHPCZ). The characterization results indicated a pHPCZ of 6.76. IR analysis revealed a characteristic composition of plant materials, with functional groups characteristic of cellulose, hemicellulose, and lignin structures. SEM unveiled a heterogeneous and porous surface. Kinetic data of adsorption were evaluated according to pseudo-first-order, pseudo-second-order, Avrami, Weber Morris, and Elovich models, with the Elovich model showing the best fit, reaching equilibrium after 30 minutes of contact. The influence of concentration on the adsorption mechanism was assessed using Langmuir, Freundlich, and Sips isotherm models, all showing excellent fit, with R^2 values exceeding 0.95. A molecular dynamics study was conducted in conjunction with experimental assays, both indicating that the species at pH=2 interacts most with the adsorbent, resulting in greater dye removal. Adsorption results were measured through the developed platform and compared with those obtained from the spectrophotometer, showing no statistical differences (t and f, 95% confidence). The optimized conditions of the platform resulted in a linear range of 0.1 to 25 mg L⁻¹, with an analysis time and sample volume of 1 minute and 3.0 μ L, respectively. Recoveries between 82% and 103% were achieved. The obtained limits of detection (LOD) and quantification (LOQ) were 0.1 and 0.025 mg L⁻¹, respectively. Thus, it is concluded that the developed platform can be employed in determining FS adsorption through *Typha angustifolia* L. leaves.

Keywords: Dyes, Adsorption, Fluorescein, Sensors, TSL2561.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluoresceína Sódica.....	23
Figura 2: Fluoresceína sódica: (A) fluoresceína em pó e em (B) fluoresceína solubilizada em água.....	24
Figura 3: Diagrama das espécies de fluoresceína em função do pH.	24
Figura 4: Espécies fluoresceína.	25
Figura 5: <i>Thipha angutifolia</i> L.....	29
Figura 6: Representações gráficas das classificações de isotermas.	35
Figura 7: Diagrama de Energia de Jablonski para o fenômeno da fluorescência.	40
Figura 8: Fluorômetro portátil para a detecção de clorofila em plantas.....	43
Figura 9: Captura de tela do software IDE utilizado para as medidas de LUX.48	
Figura 10: Suporte para Cubeta: Em 1 (Vista frontal): A- tampa para a cubeta, B- Cubeta, C- entrada para o LED e em D- entrada para o sensor. 2 (Vista Lateral).	49
Figura 11: Diagrama 2D da plataforma desenvolvida para medidas de fluorescência.	49
Figura 12: Conexões do sensor e do LED.	50
Figura 13: Esquema visual do sistema simulado.	55
Figura 14: Espectro de emissão LED azul.	56
Figura 15: Curva Analítica para Configuração de 16x e 402ms no Canal de Luz Visível.....	60
Figura 16: Curva analítica para a configuração de 16x 402ms com filtro de luz no canal de luz visível.	61
Figura 17: Porcentagem de adsorção em função do pH.	63
Figura 18: A: Modelo de simulação com celulose, fluoresceína e água; B: Modelo de fibra de celulose.....	64
Figura 19: Espécies de fluoresceína.	65
Figura 20: Número de ligações de hidrogênio.....	67
Figura 21: Em vermelho os átomos de oxigênio responsável pela estabilização da interação celulose-fluoresceína.....	67

Figura 22: Espectroscopia na região do infravermelho (IR) folhas de taboa (<i>Typha angustifolia</i>).....	69
Figura 23: Micrografias (MEV) de folhas de Taboa (<i>Typha angustifolia</i> L.): 1 e 2 apresentam cortes longitudinais, ampliados 40x e 500x, respectivamente; 3 e 4 exibem cortes transversais, ampliados 500x e 3000x, respectivamente.	70
Figura 24: pH no ponto de carga zero (pH _{PCZ}) para as folhas de taboa (<i>Typha angustifolia</i> L.).....	72
Figura 25: Estudo do tempo de equilíbrio de adsorção para o corante FS. Massa do adsorvente: 20 mg; vol. da solução: 20mL; concentração: 10 mg L ⁻¹ ; pH: 2; agitação: 150 RPM; n = 3.	73
Figura 26: Modelo Cinético não linear para o corante FS. Massa do adsorvente: 20 mg; vol. da solução: 20mL; concentração: 10 mg L ⁻¹ ; pH: 2; agitação: 150 RPM; n = 3.....	75
Figura 27: Porcentagem de adsorção em função da concentração da FS. Massa do adsorvente: 20 mg; vol. da solução: 20 mL; pH: 2; tempo: 30 min.; agitação: 150 RPM; n = 3.....	79
Figura 28: Isotermas de equilíbrio para a FS. Massa do adsorvente: 20 mg; vol. da solução: 20 mL; pH: 2; tempo: 30 min.; agitação: 150 RPM; n = 3	80
Figura 29: Curva de calibração da FS utilizando o a plataforma analítica desenvolvida.	84
Figura 30: Imagem área dos pontos de coleta das amostras de água natural. (A)-Amostra 1-Universidade Federal de Catalão, bairro setor universitário; (B)-Amostra 2-Três represas-Loteamento parque das mangueiras; (C)-Amostra 3-Condomio residencial; (D)-Amostra 4-Represa clube do povo-loteamento santa cruz.	86
Figura 31: Pictograma AGREEprep obtido para este trabalho.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classe de corantes e aplicações.....	20
Tabela 2: Adsorventes alternativos e suas aplicações.	28
Tabela 3: Sensores utilizados para diferentes analitos e aplicações.....	42
Tabela 4: Valores dos componentes utilizado para o desenvolvimento da plataforma analítica.....	50
Tabela 5: Análise Comparativa de Parâmetros Analíticos sob Variação de Resistores.	57
Tabela 6: Análise dos canais de leitura do sensor TSL2561 em diferentes Configurações de taxa de integração e ganho.....	59
Tabela 7: Descrição do sistema simulado.	64
Tabela 8: Energia de interação das espécies presentes na configuração do sistema.....	66
Tabela 9: Dados de porcentagem de adsorção (Ads%) e desvio padrão (DP) do estudo do tempo.....	73
Tabela 10: Dados obtidos a partir dos modelos cinéticos não lineares de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem, Avrami, Weber Morris e Elovich.....	76
Tabela 11: Dados obtidos a partir dos modelos isoterma não linear de Langmuir, Freundlich e Sips.....	81
Tabela 12: Capacidade máxima de adsorção ($q_{\text{máx}}$) para diferentes materiais vegetais utilizados como adsorventes, reportados na literatura.	83
Tabela 13: Desempenho analítico da plataforma desenvolvida neste trabalho.	85
Tabela 14: Determinação da porcentagem de adsorção da fluoresceína; T (amostra 1), 3R (amostra 2), P (amostra 3) e CP (amostra 4).	88

LISTA DE ABREVIATURAS

CLAE	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência
FS	Fluoresceína Sódica
IDE	Integrated Development Environment – Ambiente de desenvolvimento Integrado
IR	Infra Red – Infra Vermelho
LD	Limite de Detecção
LED	Light Emitting Diode - Diodo Emissor de Luz
LQ	Limite de Quantificação
LUX	Intensidade Luminosa
MD	Molecular dynamics - Dinâmica Molecular
NIR	Near-Infrared Spectroscopy - Espectroscopia no Infravermelho próximo
PME	Particle-Mesh Ewald – Partícula de rede de Ewald
PLA-HT	Ácido Polilático de Alta temperatura
USB	Universal Serial Bus
VMD	Visual Molecular Dynamics – Visualização da dinâmica molecular

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampere
Å	Ångström
C_e	Concentração do adsorvato no equilíbrio
C_i	Concentração inicial do soluto na solução
C_t	Concentração de fluoresceína no tempo t
K_{av}	Constante cinética de Avrami
K_f	Constante de equilíbrio de Freundlich
K_L	Constante de equilíbrio de Langmuir
K_S	Constante de afinidade de Sips
K_1	Constante de velocidade de pseudo-primeira ordem
K_2	Constante de velocidade de pseudo-segunda ordem
mA	Mili Ampere
n_{AV}	Ordem fracionária do mecanismo de adsorção de Avrami
n_F	Expoente adimensional da equação de Freundlich
n_S	Expoente adimensional de Sips
Ω	Ohms
pH_{PCZ}	Valor do pH no ponto de carga zero
q_e	Quantidade de adsorvato adsorvida no equilíbrio
q_{max}	Capacidade máxima de adsorção
q_t	Quantidade de adsorvato adsorvida no tempo t
R^2	Coefficiente de determinação
χ^2	Teste Qui-quadrado
V	Volts
ΔpH	Variação do pH

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	Referencial bibliográfico.....	19
2.1	Corantes.....	19
2.2	Corantes Medicinais.....	21
2.3	Fluoresceína Sódica.....	23
2.4	Adsorção	25
2.5	Adsorventes Naturais.....	27
2.6	Taboa (<i>Typha angustifolia L.</i>).....	28
2.7	Cinética de adsorção.....	30
2.7.1	Modelos cinéticos	31
2.8	Equilíbrio de adsorção.....	34
2.9	Modelos de Isotermas	36
2.10	Espectroscopia de Fluorescência	39
2.11	Métodos analíticos alternativos	41
2.12	Uso de led como Fonte de radiação em dispositivos analíticos	43
2.13	Impressão 3D.....	44
3	Objetivos.....	46
3.1	Objetivo geral	46
3.2	Objetivos específicos	46
4	Materiais e métodos.....	46
4.1	Padrões, reagentes e soluções.....	46
4.2	Vidrarias e materiais.....	46
4.3	Materiais e construção da plataforma analítica	47
4.4	Preparo do material adsorvente	51
4.5	Caracterização do Material adsorvente.....	51
4.5.1	Análise por Espectroscopia na Região do Infravermelho (IV)	51
4.5.2	pH NO Ponto de Carga Zero (pH _{pcz}).....	51

4.5.3	Microscopia eletrônica de Varredura (MEV)	52
4.6	Determinação Analítica	52
4.7	Ensaio de adsorção.....	52
4.8	Estudo da Influência do pH	53
4.9	Estudo da Influência do tempo de contato (cinética de adsorção)	53
4.10	Estudo da influência da concentração do corante FS (isotermas de adsorção)	53
4.11	Investigação teórica do processo de adsorção da molécula de fluoresceína na superfície da fibra de celulose	53
5	Resultados e discussões	55
5.1	Otimização da plataforma analítica	55
5.1.1	Otimização do sinal analítico	55
5.1.2	Avaliação da resposta analítica do sensor tsl2561	58
5.2	Otimização e caracterização dos parâmetros de adsorção.....	61
5.2.1	Avaliação da adsorção da Fluoresceína.....	61
5.2.2	Influência do pH nas espécies da fluoresceína	62
5.2.3	Estudo da dinâmica molecular.....	63
5.3	Caracterização do material adsorvente.....	68
5.3.1	Espectroscopia de absorção na região do infravermelho (IR)	68
5.3.2	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	70
5.3.3	Determinação do pH no Ponto de Carga Zero (pH _{PCZ}).....	71
5.4	Estudo da influência do tempo de contato (cinética de adsorção)	72
5.5	Estudo da influência da concentração da FS na solução (isotermas de adsorção)	78
5.6	Avaliação do desempenho analítico através da plataforma desenvolvida	84
5.7	DETERMINAÇÃO DA ADSORÇÃO DA FLUORESCEÍNA PELA PLATAFORMA DESENVOLVIDA	86

6	CONCLUSÃO	89
7	Química Verde	90
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
	Anexo A.....	117
	Código utilizado para as medidas de fluorescência utilizando o TS2561	117

1 INTRODUÇÃO

A necessidade dos seres humanos em atribuir cores a objetos é uma preocupação que existe a milhares de anos (ABEL, 2012). Inicialmente, essas cores eram extraídas sumariamente de plantas, minerais e animais que faziam parte do ambiente. Os primeiros exemplos da utilização de corantes datam de cerca de 40.000 a.C., na forma de pinturas rupestres (GOMES et al., 2013), onde o homem primitivo tentou representar o seu cotidiano e expressar os conhecimentos adquiridos por meio da arte (CISNEIROS; TAVARES; COSTA, 2022; OLIVEIRA, 2022). Essa busca por cores levou a procura de novos corantes, que marcaram o avanço da história da coloração.

Inicialmente, as indústrias de corantes e pigmentos limitavam-se à utilização de corantes de origem natural (MABUZA; SONNENBERG; MARX-PIENAAR, 2023). No entanto, em 1856, o químico orgânico William Henry Perkin Junior acidentalmente sintetizou o primeiro corante artificial, ao qual chamou de Malva (PLATER, 2014). Esse corante foi produzido através da oxidação de bases do alcatrão, como a anilina e a toluidina, resultando em uma cor roxa intensa (ZANONI; YAMANAKA, 2016). O trabalho de Perkin foi o ponto de partida para o crescimento exponencial da indústria de corantes. Atualmente, os corantes têm diversas aplicações, sendo as mais comuns nas indústrias de alimentos (BARCIELA; PEREZ-VAZQUEZ; PRIETO, 2023; DURAZZO et al., 2022; SINGH et al., 2023), medicamentos (MCHEDLOV-PETROSSYAN et al., 2022; WAINWRIGHT, 2008) e têxteis (BENKHAYA; M' RABET; EL HARFI, 2020; CLARK, 2011).

A aplicação de corantes na indústria desempenha um papel essencial em vários setores, proporcionando uma ampla gama de benefícios, que vão desde aspectos estéticos até a criação de identidade para o produto (HUNGER, 2007). Nos últimos anos, a aplicação de corantes passou por transformações significativas para atender às exigências da indústria (NARIMATSU et al., 2020; SANTOS et al., 2021; TONAZIO et al., 2011).

Na indústria têxtil, por exemplo, a busca por corantes sustentáveis tem aumentado significativamente (VANKAR; SHUKLA, 2019b), pois todos os anos são despejados inúmeros resíduos químicos no meio ambiente (SAMANTA; AWWAD; ALGARNI, 2020), esse cenário tem despertado a

preocupação de empresas e consumidores que buscam soluções mais ecológicas e menos poluentes. Nesse contexto, alternativas como corantes naturais, extraídos de plantas, frutas e até mesmo de insetos, têm ganhado destaque no mercado (ARORA; AGARWAL; GUPTA, 2017; XIA et al., 2023).

A inovação também tem sido um foco crucial no setor de corantes alimentares (LANDIM NEVES; SILVA; MEIRELES, 2021; NOVAIS et al., 2022). Tem havido investimentos significativos em pesquisa e desenvolvimento para produzir alternativas sustentáveis e saudáveis para os consumidores (NWOBA et al., 2020; STICH, 2016). Os fabricantes também estão voltando sua atenção para opções de corantes naturais como substitutos dos corantes sintéticos, que são conhecidos por causarem problemas ambientais e de saúde (ECHEGARAY et al., 2023). Uma forma de se fazer isso é substituindo corantes artificiais por corantes extraídos de frutas e vegetais (CARVALHO et al., 2021; HERRERA; VIERA; ROCA, 2023; RODRÍGUEZ-MENA et al., 2023).

Juntamente com os setores têxteis e de alimentos, a indústria de corantes medicinais também se tornou cada vez mais proeminente ao longo dos anos (VANKAR; SHUKLA, 2019). Esses corantes são utilizados em diversas áreas médicas, desde a fabricação de produtos farmacêuticos até diagnósticos por imagem (BADARO et al., 2014; DE HAAN et al., 2021; LEI et al., 2020). Eles desempenham um papel vital na descoberta de novos remédios e na melhoria do bem-estar geral dos pacientes (PÉREZ-IBARBIA et al., 2016). À medida que a investigação científica e tecnológica continua a progredir, a indústria de corantes medicinais cresceu e estabeleceu parcerias com outras áreas relacionadas com a saúde, incluindo a biotecnologia e a nanotecnologia, resultando em soluções cada vez mais eficazes e seguras para o tratamento de uma série de doenças e condições médicas (CHAINANI-WU, 2003; ISMAIL et al., 2019; VOLLONO et al., 2019).

Um exemplo de corante utilizado na medicina é a fluoresceína sódica (FS) e seus derivados, que são corantes medicinais amplamente empregados para fins terapêuticos (FRANZINI et al., 2023; WAQAS; SHAMIM, 2018). Essas substâncias podem se ligar às proteínas plasmáticas e, quando expostas à luz ultravioleta, emitem uma fluorescência verde vívida, que permite a visualização detalhada de estruturas e tecidos vasculares (FOLARON et al., 2018; HEYNE; MAUREL; SCAIANO, 2006). A FS é comumente utilizada em

vários procedimentos médicos, incluindo angiografia retiniana, testes de diagnóstico oftalmológico e avaliação da circulação sanguínea (BADDAM et al., 2023; GUAGLIANO et al., 2013; LARSEN, 1993; TSANG; SHARMA, 2018).

Embora os corantes tenham uma ampla gama de aplicações e sejam inquestionavelmente essenciais, apresentam desvantagens significativas (AL-TOHAMY et al., 2022). Especialmente no caso dos corantes sintéticos, surgem diversas preocupações relacionadas à sua utilização (“Front Matter”, 2019; TKACZYK; MITROWSKA; POSYNIK, 2020). Essas preocupações podem ser agrupadas em várias categorias, abrangendo os riscos ambientais e de saúde (ARDILA-LEAL et al., 2021; MILLER et al., 2022).

Quando se trata de poluição ambiental gerada pelo descarte incorreto de corantes em locais inapropriados como corpos d'água e rios, os impactos são imensuráveis (DUBEY et al., 2010). A contaminação das águas pode afetar diretamente a vida aquática, prejudicando o desenvolvimento de peixes, plantas e microrganismos que habitam esses ecossistemas (KHAN et al., 2023; MABUZA; SONNENBERG; MARXPIENAAR, 2023). Além disso, a poluição das águas pode se espalhar para outras áreas, atingindo Fontes de água potável e comprometendo a saúde humana. O consumo de água contaminada pode levar, problemas de pele e até mesmo câncer (CARNEIRO et al., 2010; MAHMOOD et al., 2016).

Em termos de saúde, o uso de corantes pode causar uma série de problemas preocupantes. Por exemplo, certos indivíduos podem desenvolver alergias ou intolerâncias a determinados corantes, causando sintomas como erupções cutâneas, inchaço, coceira e até dificuldades respiratórias (MILLER et al., 2022). Além disso, alguns corantes, especialmente os sintéticos, têm sido associados a efeitos colaterais prejudiciais, como hiperatividade em crianças e possíveis problemas neurológicos (SAMBU et al., 2022).

Dado a esses fatores, a remoção de corantes é uma pauta constante sobre as questões ambientais (DARAEI et al., 2023; KUMAR et al., 2023; LUO et al., 2023; SADEGH et al., 2023), já que a presença destas substâncias nos ecossistemas aquáticos pode causar sérios impactos. Por isso, é fundamental buscar soluções eficientes e sustentáveis para tratar efluentes contendo corantes, como a utilização de processos físicos, químicos

ou biológicos, bem como a conscientização da população e a adoção de práticas menos poluentes por parte das indústrias (JIANG et al., 2023; JUNG et al., 2023).

Dentro das práticas sustentáveis, uma abordagem se destaca por sua eficiência notável na remoção de contaminantes: a adsorção utilizando materiais provenientes de Fontes renováveis, como materiais vegetais. Esses materiais, quando empregados como adsorventes, demonstram a capacidade de reter poluentes de várias origens, o que contribui para a preservação do meio ambiente e a conservação dos recursos naturais (DOTTO; MCKAY, 2020; THOMAS; CRITTENDEN, 1998). Além disso, a utilização de fontes renováveis representa uma alternativa viável e econômica em comparação com métodos de tratamento mais tradicionais e não sustentáveis.

A efetividade da remediação de contaminantes depende não apenas da técnica de descontaminação escolhida, mas também da rigorosa avaliação da concentração e composição dos poluentes após o tratamento (CHAKRABORTY; DAS, 2017). A análise precisa dos contaminantes retidos é crucial para determinar a eficiência da técnica de remediação e para o desenvolvimento de estratégias de mitigação mais eficazes; Nesse contexto, a utilização de metodologias analíticas, como cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) ou espectrometria de massa (MS), torna-se crucial (FERREIRA et al., 2023).

Porém, tais técnicas exigem equipamentos que, muitas vezes, não estão acessíveis a todos, devido aos altos custos envolvidos. Diante dessa realidade, desenvolver métodos analíticos de baixo custo torna-se fundamental para facilitar o processo analítico (FAHMIDEH; ZOWGHI, 2020). Alternativas portáteis vêm sendo desenvolvidas, como por exemplo a cromatografia gasosa portátil e técnicas de espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), que têm despertado interesse devido à sua simplicidade, portabilidade e custo acessível (RAHIMI et al., 2020). Além disso, a pesquisa em tecnologias emergentes, como sensores químicos e biossensores, promete revolucionar a análise de contaminantes por se tratarem de técnicas de baixo custo. Investir no desenvolvimento e aplicação de métodos analíticos de baixo custo é crucial não apenas para tornar a análise mais acessível, mas também para a

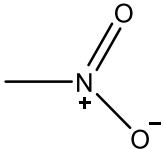
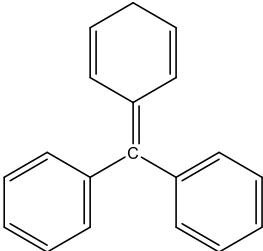
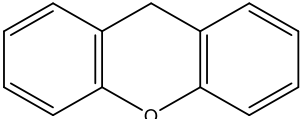
democratização da ciência como um todo (FAHMIDEH; ZOWGHI, 2020; FOLARON et al., 2018).

2 Referencial bibliográfico

2.1 CORANTES

Segundo Nikfar e Jaberidoost (2014), corantes são substâncias químicas que possuem a capacidade de conferir cor a outras substâncias ou materiais. São amplamente utilizados em várias aplicações, como coloração de tecidos, alimentos, produtos farmacêuticos, plásticos, tintas, entre outros, com o objetivo de fornecer uma variedade de cores e efeitos visuais (SABNIS, 2017). Os corantes podem ser naturais, obtidos de Fontes como plantas e minerais, ou sintéticos, criados em laboratório por meio de processos químicos (ARDILA-LEAL et al., 2021). Eles desempenham um papel essencial em várias indústrias e aplicações, agregando valor estético, funcional ou informativo aos produtos em que são empregados. Podendo ser classificados de acordo com diversos critérios. Uma das categorizações mais comuns considera sua origem e classe, dividindo-os em corantes naturais e corantes sintéticos. Além disso, os corantes são classificados com base em categorias e em suas aplicações, são elas: alimentícias, têxteis, farmacêuticos, cosméticos, tintas, pigmentos e várias outras aplicações industriais (BENKHAYA; M' RABET; EL HARFI, 2020). Na **Tabela 1** é possível conferir algumas classes de corantes, sendo o corante fluoresceína sódica (FS) o foco deste trabalho.

Tabela 1: Classe de corantes e aplicações.

Corante	Classe Química	Cromóforo	Indústria	Exemplos de Uso
Amarelo Cromo	Azo		Têxtil, Couro, Papel	Pigmento amarelo para tecidos, couro e papel
Vermelho Ácido 18	Azo		Têxtil, Alimentos	Corante vermelho para tecidos e alimentos
Verde Malaquita	Trifenilmetano		Têxtil, Cosméticos, Tintas	Corante verde para tecidos, cosméticos e tintas
Violeta de Genciana	Trifenilmetano		Têxtil, Antisséptico	Corante violeta para tecidos e antisséptico
Rodamina B	Xanteno		Têxtil, Microscopia	Corante vermelho fluorescente para tecidos e microscopia
Fluoresceína de Sódio	Xanteno		Diagnóstico Médico, Marcação de Água, Cosméticos	Corante fluorescente para testes diagnósticos, marcação de água e em alguns produtos cosméticos.
Eritrosina	Xanteno		Alimentos	Vermelho para doces, gelatinas e conservas.
Eosina	Xanteno		Farmacêutica	Corante vermelho para testes diagnósticos e microscopia.

Fonte: Adaptada, EL-SIKAILY; KHALED; EL NEMR, 2012.

A FS pertence à classe dos xantenos que são corantes orgânicos heterocíclicos com estrutura base que leva o mesmo nome, composto por três anéis combinados, incluindo um anel de oxigênio. Estes corantes têm a capacidade de absorver luz em uma faixa específica de cores e, em seguida, emitir luz em outra faixa, conhecida como fluorescência. Sua utilidade reside na marcação e rastreamento de moléculas em laboratórios, na indústria de tintas e na pesquisa biomédica (KARAMAN et al., 2023). No presente trabalho será estudado a FS, a qual é um exemplo de corante pertencente a esta classe.

2.2 CORANTES MEDICINAIS

Os corantes medicinais têm uma longa história que remonta a civilizações antigas, onde plantas, minerais e substâncias naturais eram usados em práticas medicinais (ABEL, 2012; ŠULEKOVÁ et al., 2017). Com o avanço da ciência, especialmente na química do século XIX, cientistas começaram a isolar e sintetizar corantes a partir de substâncias naturais, levando ao desenvolvimento de corantes medicinais mais seguros e eficazes (CHENGAI AH et al., 2010). Hoje, os corantes são utilizados na indústria farmacêutica para diversos fins, como a facilitação da identificação de medicamentos e a melhoria da estabilidade, solubilidade e biodisponibilidade de certos produtos (PÉREZ-IBARBIA et al., 2016; RAHMAN, 2017).

Os corantes medicinais são utilizados principalmente nos tempos modernos para melhorar o reconhecimento e a administração de medicamentos, resultando em uma experiência terapêutica mais segura e eficiente (WAINWRIGHT, 2008). Esses corantes são frequentemente empregados pela indústria farmacêutica para colorir cápsulas, comprimidos e xaropes, auxiliando a diferenciação de medicamentos, característica especialmente benéfica para pacientes submetidos a diversos tratamentos (ŠULEKOVÁ et al., 2017). Além disso, os corantes são empregados em preparações líquidas para ocultar sabores desagradáveis e auxiliarem os usuários a identificar e medir a quantidade exata utilizando os dosadores frequentemente fornecidos junto com o medicamento (DUA; PAUL, 2020).

Já no contexto da medicina, constituem-se agentes de contraste essenciais empregados em procedimentos de imagem, com o objetivo de aprimorar a capacidade dos profissionais de saúde em visualizar estruturas

anatômicas e fisiológicas de interesse clínico (LICHA et al., 2002). Esses agentes desempenham funções cruciais, tais como o realce dos vasos sanguíneos em angiografias, incrementando a resolução das imagens em exames de ressonância magnética e permitindo a identificação de estruturas em análises histológicas de amostras de tecido (SONG et al., 2021; ZHU et al., 2019). Além disso, na pesquisa biomédica, os corantes fluorescentes são empregados para rastrear entidades celulares específicas, proporcionando informações valiosas para estudos científicos e diagnóstico de patologias (HAWE; SUTTER; JISKOOT, 2008).

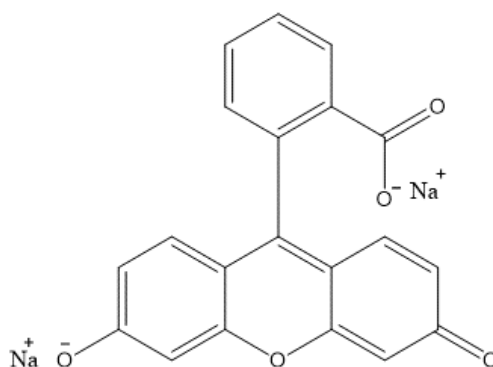
A hematoxilina e eosina são exemplos de aplicação de corantes na medicina. Essas substâncias são rotineiramente aplicadas na histologia para demarcar componentes nucleares e estruturas celulares, contribuindo substancialmente para a precisão diagnóstica (COOKSEY, 2021; RAHMAN, 2017). O azul de Evans, por sua vez, é empregado na citologia e histologia para intensificar as características das fibras colágenas e estruturas reticulares, aprimorando a resolução dos tecidos examinados (GORDEEVA et al., 2019). Já a FS, com especial relevância na oftalmologia, assume a função de avaliar a condição vascular retiniana e corneana, bem como a detecção de irregularidades vasculares, valendo-se da emissão de fluorescência (FALCO et al., 2019; TSANG; SHARMA, 2018). Cada um desses corantes, de maneira precisa e especializada, fornece um arcabouço visual que aprimora a prática clínica e o processo diagnóstico.

Sem dúvida, os corantes desempenham um papel de notável relevância no campo da medicina, onde exercem funções cruciais no diagnóstico de doenças, fomentam pesquisas biomédicas e aprimoram a qualidade dos serviços de saúde (WAINWRIGHT, 2008). À medida que a medicina avança, surge a necessidade de desenvolver corantes menos prejudiciais ao meio ambiente, visando a redução de seu impacto ambiental. Isso assegura que essas ferramentas permaneçam essenciais para o progresso da medicina e o bem-estar geral da população (TIWARI, 2022).

2.3 FLUORESCÉINA SÓDICA

A FS, apresentada na **Figura 1** é utilizada comumente na oftalmologia, com o intuito de se diagnosticar úlceras de córnea, tanto em animais quanto em humanos, com sua aplicação mais comum sendo na angiografia com fluoresceína, onde o corante é injetado na corrente sanguínea do paciente para visualizar vasos sanguíneos na retina e córnea (YAMAOKA et al., 2020). Essa técnica é fundamental para o diagnóstico de doenças oculares, como a retinopatia diabética (ELRASHIDY; SAMIR, 2022). A fluoresceína sódica também encontra uso em procedimentos de imagem para avaliar a saúde vascular em outras partes do corpo, mas sua aplicação principal permanece na oftalmologia (MARMOR; RAVIN, 2011).

Figura 1: Fluoresceína Sódica.



Fonte: O autor

A principal propriedade explorada da fluoresceína é a sua capacidade de fluorescer, absorvendo a luz na faixa do azul (cerca de 440-485 nm) e emitindo na faixa do verde (aproximadamente em 500-550 nm) (MARTINS; SUCUPIRA; SUAREZ, 2015). Este comprimento de onda pode variar de acordo com o sal utilizado. Ao ser solubilizada em água, a fluoresceína adquire uma coloração verde-amarelada intensa, como mostrado na **Figura 2**, podendo prejudicar a vida aquática, uma vez que este é um corante capaz de alterar a cor da água e afetar diretamente os organismos aquáticos, comprometendo a fotossíntese e consequentemente a cadeia alimentar aquática (SHARMA; SHARMA; SONI, 2021).

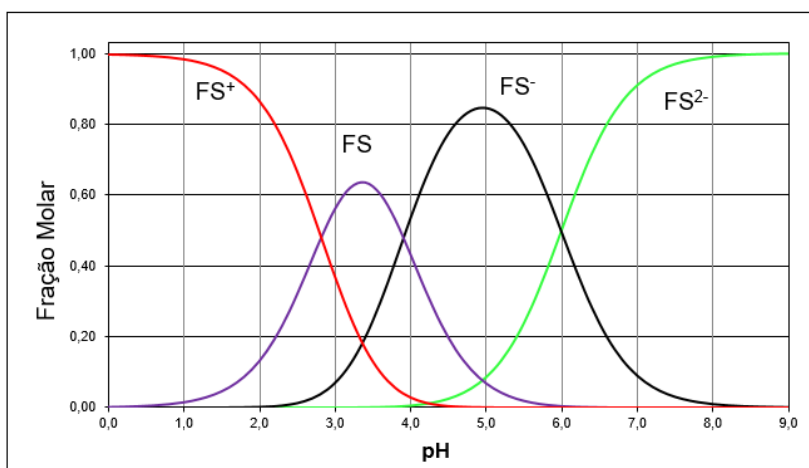
Figura 2: Fluoresceína sódica: (A) fluoresceína em pó e em (B) fluoresceína solubilizada em água.



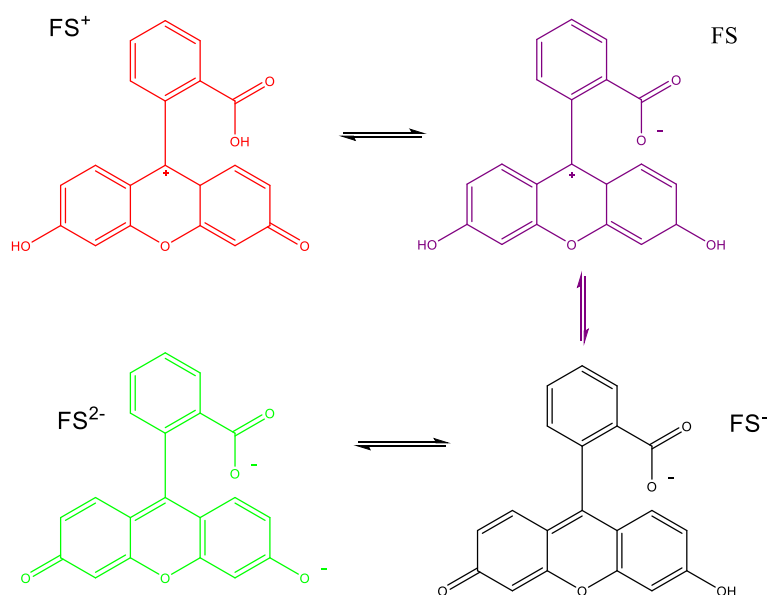
Fonte: O Autor.

O equilíbrio aquoso da FS envolve quatro espécies, nomeadas de monoânion (FS^-), diânion (FS^{2-}), a forma neutra (FS), e o cátion (FS^+) com pKa respectivamente 2, 4 e 6. Utilizando os valores de pKa, o pesquisador BATISTELA et al., (2010) construiu o diagrama de distribuição das espécies em função do pH que pode ser visualizado na **Figura 3**. As espécies estão representadas na **Figura 4**.

Figura 3: Diagrama das espécies de fluoresceína em função do pH.



Fonte: O Autor.

Figura 4: Espécies fluoresceína.

Fonte: O Autor.

Com o crescente uso da fluoresceína em diversas aplicações, surge a necessidade de implementar procedimentos voltados para a sua remoção, tornando-se cada vez mais essencial na mitigação de potenciais impactos ambientais. Embora a fluoresceína seja frequentemente empregada de forma segura em diversas aplicações, a acumulação potencial desse corante em corpos d'água e ecossistemas pode resultar em impactos ambientais indesejados ao longo do tempo (MENDOZA et al., 2020; WALTHALL; STARK, 1999). A necessidade de desenvolver métodos de remoção e detecção é crucial para prevenir possíveis desequilíbrios nos ecossistemas aquáticos, garantindo a preservação da qualidade da água e a manutenção da saúde ambiental. O emprego de abordagens, como a adsorção, revela-se promissor nesse contexto, oferecendo uma estratégia eficiente para mitigar os efeitos a longo prazo da presença da fluoresceína, contribuindo assim para a sustentabilidade e preservação dos ecossistemas aquáticos (SHEN et al., 2023).

2.4 ADSORÇÃO

A adsorção é um processo no qual átomos, moléculas ou íons são retidos na superfície de um sólido e/ou um fluido (ALI; GUPTA, 2006). As forças intermoleculares entre as partículas adsorventes e as substâncias adsorvidas são a causa deste fenômeno (POURHAKKAK et al., 2021). A

adsorção é uma ocorrência amplamente observada em diversos campos da ciência e tecnologia e desempenha um papel crucial em múltiplos processos, como catálise, separação de componentes, purificação de água, tratamento de águas residuais e adsorção de gases em superfícies sólidas, entre outros (ALAQARBEH, 2021).

Existem duas classes distintas de adsorventes: os sintéticos e os naturais (LIN; JUANG, 2009). Os sintéticos são materiais especialmente projetados para atender a requisitos específicos, oferecendo alta seletividade e capacidade de adsorção controlada. Exemplos incluem polímeros funcionais e sílicas mesoporosas (RAKIĆ et al., 2013). Por outro lado, os adsorventes naturais são derivados de fontes naturais, como carvão ativado, argilas e zeólitas e materiais vegetais, sendo amplamente disponíveis e muitas vezes mais acessíveis (JIA; DAI; YANG, 2020; WANG; PENG, 2010).

Ambas as classes têm suas vantagens, e a escolha entre elas depende das necessidades da aplicação, equilibrando seletividade, custo e impacto ambiental. Cada classe desempenha um papel importante em processos de purificação, separação e tratamento em diversas áreas, desde a indústria química até o tratamento de água e efluentes (LIMA; ADEBAYO; MACHADO, 2015; SHI et al., 2022). Existem dois principais mecanismos de adsorção: a adsorção física (fisiossorção) e a adsorção química (quimiossorção).

A adsorção física é caracterizada pelo envolvimento de forças de van der Waals, que são forças fracas e não específicas. Na adsorção física, as moléculas adsorvidas são atraídas pela superfície sólida devido a essas forças, mas não ocorrem interações químicas significativas entre as moléculas adsorvidas e a superfície. A adsorção física é geralmente reversível e ocorre a temperaturas mais baixas (BRUCH; COLE; ZAREMBA, 2007).

A adsorção química envolve ligações químicas reais entre as moléculas adsorvidas e a superfície do sólido adsorvente. Isso geralmente envolve a formação de ligações covalentes ou iônicas entre as moléculas e a superfície, resultando em uma ligação mais forte e, muitas vezes, irreversível. A adsorção química é mais específica e ocorre a temperaturas mais elevadas (AGBOOLA; BENSON, 2021).

2.5 ADSORVENTES NATURAIS

Os adsorventes naturais são materiais derivados de fontes naturais, como plantas, minerais e outros recursos do ambiente (AL-GHEETHI et al., 2022). Eles desempenham um papel significativo em diversas aplicações, incluindo o tratamento de água, purificação de produtos químicos e até mesmo na indústria médica como por exemplo, a hemodiálise que utiliza filtros de diálise para remoção de substâncias indesejadas do sangue (FADHILAH et al., 2021).

Alguns exemplos notáveis de adsorventes naturais incluem o carvão ativado, obtido a partir de cascas de coco e madeira, que é eficaz na remoção de diversos poluentes, e as argilas, como a bentonita, amplamente utilizadas na purificação de petróleo e tratamento de água (BABU; PRASANNA; KUMAR, 2022).

Sua origem renovável e biodegradabilidade os tornam alternativas sustentáveis para o tratamento de água, purificação de efluentes e controle de odores, contribuindo para a redução de resíduos e a preservação do meio ambiente. No entanto, a eficácia desses adsorventes pode variar de acordo com a fonte e o processo de preparação, tornando essencial a realização de estudos específicos para otimizar sua utilização em aplicações particulares. Na **Tabela 2** pode-se conferir alguns destes adsorventes alternativos:

Tabela 2: Adsorventes alternativos e suas aplicações.

Adsorvente	Resíduo Tratado	Referência
Carvão Ativado	Poluentes orgânicos, odores, produtos químicos indesejados, contaminantes da água	(WANG et al., 2022; WEI et al., 2023)
Turfa	Íons metálicos, substâncias orgânicas dissolvidas, corantes em soluções aquosas	(ALJUMAILI; ABDUL-AZIZ, 2023; GHAREDAGHLOO; PRICE, 2021)
Casca de Arroz	Poluentes orgânicos e inorgânicos na água, corantes, substâncias indesejadas	(LALA et al., 2023; THUAN et al., 2023)

Fonte: O Autor.

2.6 TABOA (*TYPHA ANGUSTIFOLIA L.*)

A *Typha angustifolia* é uma planta de vida longa encontrada em ambientes aquáticos e pantanosos (QIN; SUN, 2005). Pertencente à família *Typhaceae*, que inclui 16 espécies distribuídas em regiões tropicais, essas plantas são reconhecidas por sua adaptabilidade a condições úmidas e seu papel vital nos ecossistemas aquáticos, proporcionando habitat e alimento para uma variedade de vida selvagem, desde aves aquáticas até insetos e peixes (KAMALI MOGHADDAM, 2022). Além disso, as *Typhaceae* desempenham um papel importante na estabilização de solos úmidos e na filtragem de águas, contribuindo para a manutenção da qualidade ambiental. A *Typha angustifolia L.* é uma planta de porte médio com folhas estreitas e alongadas, que se

erguem verticalmente acima da água em ambientes aquáticos e pantanosos (LIU et al., 2018). Suas inflorescências cilíndricas, conhecidas como espigas, destacam-se entre as folhas, exibindo uma cor marrom característica. Devido a essas características, a *T. angustifolia* também é conhecida como taboa estreita (**Figura 5**).

Figura 5: *Thipha angustifolia* L.



Fonte: Biodiversity4all.

A *T. angustifolia* apresenta diversas aplicações, desde seu uso como material para a confecção de artesanato até sua utilização como medicamento. Suas fibras flexíveis são frequentemente empregadas na produção de cestos, esteiras e outras peças artesanais, sendo apreciadas especialmente por sua durabilidade. Além disso, diferentes partes da planta, incluindo suas folhas e inflorescências, têm sido exploradas na medicina tradicional de várias culturas (SANA et al., 2015). Compostos presentes na *T. angustifolia* têm propriedades anti-inflamatórias e cicatrizantes, sendo utilizados no tratamento de feridas, queimaduras e inflamações cutâneas. Além disso, extratos da planta têm sido estudados por seu potencial no combate a microorganismos patogênicos, sugerindo possíveis aplicações no desenvolvimento de novos medicamentos. Essa ampla gama de usos demonstra a importância e

o potencial desta planta em diferentes áreas, desde a arte até a saúde (CHEN et al., 2022; QIN; SUN, 2005).

Além destas aplicações, também tem sido explorada como um adsorvente alternativo para a remoção de metais pesados, corantes e outras substâncias indesejáveis em águas contaminadas. BOUMAZA e colaboradores (2018) estudou a aplicação das folhas da taboa para a remoção de corante catiônico em soluções aquosas. DUMAN; UREY; KOCA (2015) estudaram a fitorremediação de metais pesados da *T. angustifolia*. Ainda sobre fitorremediação, TAUFIKURAHMAN et al. (2019) exploraram essa propriedade para a fitorremediação de cromo (Cr) em sistemas de escoamento de curtume.

A eficácia demonstrada dessa planta como um adsorvente alternativo destaca seu potencial como uma solução viável e sustentável para o tratamento de efluentes contaminados, contribuindo assim para a preservação e a saúde dos ecossistemas aquáticos. Essa abordagem não apenas oferece uma alternativa eficiente para a remoção de poluentes, mas também destaca a importância da utilização de recursos naturais na busca por soluções ambientais. A eficiência da adsorção pode ser estudada por meio de experimentos de cinética e isoterma de adsorção, o que auxilia na compreensão dos mecanismos envolvidos.

2.7 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

A cinética avalia a taxa de adsorção de substâncias em interfaces sólido-líquido ou gás-sólido, descrevendo a variação da concentração do adsorvato na superfície sólida ao longo do tempo (MUSAH et al., 2022). Esse estudo visa compreender como as moléculas adsorvidas interagem com as superfícies sólidas, levando em consideração fatores como difusão, afinidade química e outras variáveis (QIU et al., 2009).

Através de modelos matemáticos, a cinética de adsorção permite prever o comportamento das substâncias adsorvidas e otimizar a eficácia de aplicações práticas, como o tratamento de água, a cromatografia e processos de engenharia química (RUDZIŃSKI; PŁAZIŃSKI, 2007). A compreensão da cinética de adsorção é essencial para o projeto e operação eficiente de sistemas de adsorção e para o tratamento eficaz de poluentes.

O mecanismo predominante depende das características do sistema, do adsorvato e do adsorvente, bem como das condições do processo. Cada mecanismo tem suas próprias equações cinéticas e requisitos específicos, que influenciam a cinética de adsorção em um sistema particular (KURNIAWAN et al., 2023; NADIRI et al., 2023; ZHOKH; TRYPOLSKYI; STRIZHAK, 2023). Os principais mecanismos envolvidos na cinética de adsorção incluem:

- Difusão superficial: Compreende o movimento das moléculas adsorvidas na superfície do material, podendo ocorrer somente na superfície ou nas camadas superficiais do adsorvente (LI et al., 2023).
- Difusão intra partícula: Esse mecanismo aborda a difusão do adsorvato adsorvido dentro do material, geralmente poroso, como por exemplo materiais como o carvão ativado. Essa difusão ocorre nos poros do material adsorvente (ZHOKH; TRYPOLSKYI; STRIZHAK, 2023).
- Adsorção química: Esse caso, o adsorvato adsorvido interage por meio de reações químicas, levando a formação de ligações químicas. Muito comum em processos de adsorção de íons (AGBOOLA; BENSON, 2021).
- Adsorção física: Esse mecanismo refere-se a adsorção superficial do adsorbato, nesse caso a adsorção é mantida por atrações eletrostáticas tais como forças de Van der Waals e interações do tipo dipolo (BRUCH; COLE; ZAREMBA, 2007).

Os modelos matemáticos desempenham um papel essencial na compreensão e descrição da cinética de adsorção, fornecendo ferramentas para prever como a concentração de adsorvato muda com o tempo durante o processo de adsorção. Essas equações, ou conjuntos de equações, permitem quantificar e otimizar a taxa de adsorção, de forma a ajustar as variáveis do processo para maximizar a eficiência da adsorção. Os modelos matemáticos abrangem desde equações simples de primeira e segunda ordem até modelos mais complexos que levam em consideração a difusão, a química de superfície e a heterogeneidade do adsorvente.

2.7.1 MODELOS CINÉTICOS

Existem diversos modelos matemáticos que podem ser empregados para analisar as condições cinéticas dos adsorventes e os mais

utilizados são os de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem, difusão intra-partícula e Elovic (WANG; GUO, 2020). O modelo cinético de pseudo-primeira ordem é uma das abordagens mais comuns para descrever a cinética de adsorção em sistemas líquido-sólido ou gás-sólido. Esse modelo parte do princípio de que a taxa de adsorção é diretamente proporcional à diferença entre a quantidade máxima de adsorvato que pode ser adsorvida na superfície do adsorvente (conhecida como capacidade máxima de adsorção) e a quantidade atual de adsorvato adsorvido (**Equação 1**) (CORTÉS et al., 2023; LIMA et al., 2021).

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

Onde: q_t é a quantidade de solução adsorvida (mg g^{-1}) no tempo t ;
 q_e é a quantidade de solução adsorvido (mg g^{-1}) equilíbrio;
 k_1 é a constante de velocidade de pseudo-primeira ordem (min^{-1}).

A equação que descreve o modelo pseudo-segunda ordem é fundamental na caracterização de sistemas de adsorção. Nesse modelo, a etapa limitante é de natureza química e a taxa da reação depende da quantidade de soluto adsorvido na superfície do adsorvente e da quantidade adsorvida em equilíbrio (**Equação 2**). Essa equação é essencial para descrever com precisão o comportamento cinético em sistemas onde a concentração do soluto varia consideravelmente durante a reação, tornando-a valiosa na modelagem de processos de adsorção em diversas aplicações químicas e ambientais (BULLEN et al., 2021; HO; MCKAY, 1999).

$$q_t = \frac{K_2 \cdot q_e^2 \cdot t}{1 + K_2 \cdot q_e \cdot t} \quad (2)$$

Onde: q_t é a quantidade de soluto adsorvida (mg g^{-1}) no tempo t (min);
 q_e é quantidade de soluto adsorvida (mg g^{-1}) no tempo de equilíbrio;
 K_2 é constante da velocidade da reação da adsorção ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$).

O modelo cinético de Avrami (**Equação 3**), também conhecido como modelo fracionário, propõe que a taxa de adsorção não pode ser considerada uma constante fixa, mas sim uma variável de natureza dinâmica e sujeita a alterações através de várias ordens de reação. Essa variabilidade pode ocorrer ao longo de todo o curso de interação entre o adsorvato e o adsorvente (GUIMARÃES; RIOS; ALVES, 2019; SHIRZAD; VINEY, 2023).

$$q_t = q_e \cdot (1 - e^{-K_{AV} \cdot t})^n \quad (3)$$

Onde: q_t é a quantidade de soluto adsorvida (mg g^{-1}) no tempo t (min);

q_e é quantidade de soluto adsorvida (mg g^{-1}) no tempo de equilíbrio;

K_{AV} é a constante cinética de Avrami (min^{-1});

n é a ordem fracionária da reação.

O modelo cinético Weber-Morris é empregado com o objetivo de analisar e descrever a cinética de reações químicas. Esse modelo é particularmente útil para investigar a difusão que ocorre em materiais sólidos porosos (OBRADOVIĆ, 2020; RUDZIŃSKI; PŁAZIŃSKI, 2007). A equação não linear para este modelo está representada na (**Equação 4**).

$$q_t = K_{dif} \sqrt{t} + C_t \quad (4)$$

Onde: q_t é a quantidade de soluto adsorvida (mg g^{-1}) no tempo t (min);

K_{dif} é a constante de difusão intra-partícula ($\text{mg.g}^{-1} \text{min}^{-1/2}$);

C_t é o coeficiente linear (mg.g^{-1}) obtidos pela inclinação e intersecção da curva do gráfico q_t versus \sqrt{t} .

O modelo de Elovich é utilizado para descrever a cinética de adsorção de moléculas em superfícies sólidas-liquido. Esse modelo descreve a taxa de adsorção como uma função do tempo, e é composto por duas partes: uma componente linear e uma componente exponencial. A componente linear representa a adsorção inicial, enquanto a componente exponencial representa

a adsorção posterior, quando a superfície de adsorção começa a ficar saturada. A equação de Elovich é dada por:

$$q_t = \frac{1}{\alpha} \ln (\beta \cdot t + 1) \quad (5)$$

Onde: q_t é a quantidade de soluto adsorvida (mg g^{-1}) no tempo t (min);

α é uma constante relacionada à taxa de adsorção ($\text{mg g}^{-1}\text{min}^{-1}$);

β é outra constante que influencia a taxa de adsorção (g mg^{-1}).

2.8 EQUILÍBRIO DE ADSORÇÃO

A cinética é fundamental para a análise e compreensão do fenômeno de adsorção, pois impacta o tempo necessário para que um sistema alcance o equilíbrio nesse processo. Nesse contexto, é crucial o estudo do equilíbrio de adsorção, que ocorre quando a taxa de adsorção se iguala à taxa de dessorção na superfície do material (MUSAH et al., 2022). As informações fornecidas neste estudo desempenham um papel crítico na compreensão dos componentes físico-químicos que governam o processo de adsorção. Isto, por sua vez, permite uma avaliação minuciosa da eficácia deste processo como uma operação singular (NADIRI et al., 2023).

O equilíbrio é alcançado quando a concentração do soluto na fase líquida (C_e) se estabiliza. Neste ponto, a capacidade de adsorção do adsorvente (q_e) pode ser determinada a partir da construção de gráficos que relacionam a quantidade de adsorvato removido (q_e em mg g^{-1}) e a quantidade remanescente em solução (C_e em mg L^{-1}) no tempo de equilíbrio (**Equação 6**). A esses gráficos são atribuídos o nome de isotermas de adsorção (CHEN et al., 2022; MURPHY et al., 2023; NAGY et al., 2013). Para sua construção, é essencial conduzir experimentos nos quais são mantidas massas e volumes fixos, variando apenas as concentrações iniciais do adsorvato à uma temperatura constante.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m} \quad (6)$$

Onde: C_0 é a concentração inicial do adsorbato (mg L^{-1});

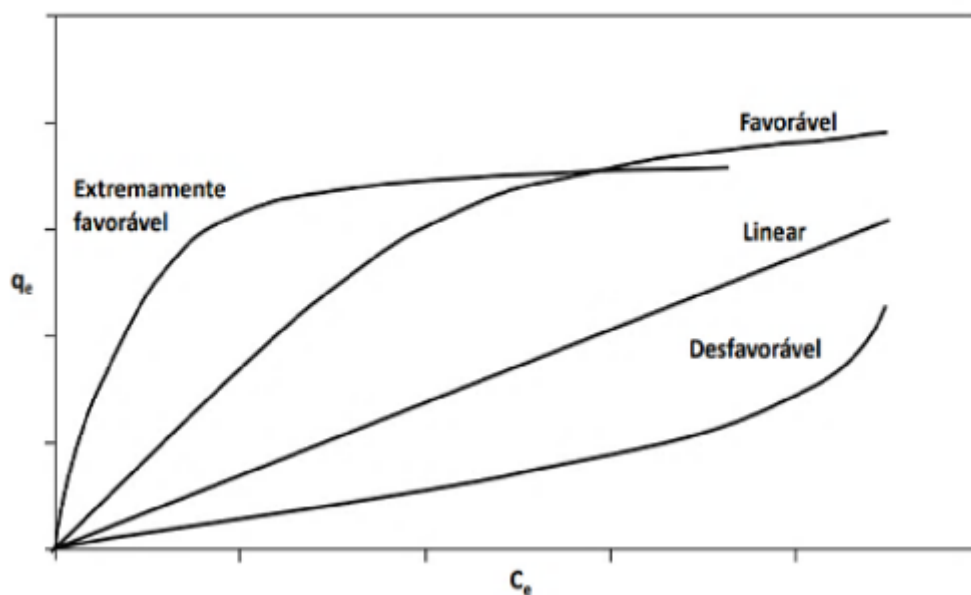
C_e é a concentração final do adsorbato (mg L^{-1}), após processo de adsorção;

V é o volume da solução (L);

m = massa do material adsorvente (g).

A análise dos pontos no gráfico ajuda a determinar o modelo de isoterma de adsorção que descreve o sistema e a obter informações sobre a afinidade e capacidade de adsorção do adsorvente; Existem diversos modelos que tentam explicar o mecanismo pelo qual ocorre a adsorção. DO (1998) classifica e avalia os processos de adsorção mediante ao formato da curva obtida pelos modelos matemáticos (**Figura 6**), dado pela função dos modelos de isotermas.

Figura 6: Representações gráficas das classificações de isotermas.



Fonte: Adaptado (DO, 1998).

Quando uma isoterma assume a forma côncava para baixo, é considerada vantajosa. Isto significa que mesmo baixas concentrações de adsorbato numa solução resultam numa quantidade considerável de adsorção, já as isotermas com a concavidade voltada para cima são consideradas desfavoráveis, pois denotam que um aumento significativo na capacidade de adsorção só ocorre quando a concentração de adsorbato na solução é elevada, apresentando uma baixa capacidade de adsorção. A isoterma linear varia de

forma exponencial com a concentração. Por outro lado, uma isoterma irreversível ocorre quando a quantidade de adsorção atinge o seu valor máximo e não depende da concentração de adsorbato no equilíbrio (DO, 1998; MORENO-CASTILLA, 2004; TRAN et al., 2023). Neste trabalho serão abordados os modelos matemáticos de isoterma de Langmuir, Freundlich e Sips.

2.9 MODELOS DE ISOTERMAS

A isoterma de Langmuir é baseada em três suposições gerais: cobertura da monocamada, equivalência dos sítios e a independência desses sítios (isso para sistemas gasosos). Já os sistemas de solução, a adsorção dos solutos em superfícies sólidas (adsorvente) não cumpre estas premissas e, basicamente, existem duas explicações para a isoterma original de Langmuir não ser ideal para esse tipo de sistema: primeiro que quando uma espécie é adsorvida da solução, deve haver dessorção simultânea a fim de reestabelecer o equilíbrio de cargas e, em segundo lugar, a existência de heterogeneidade superficial podendo levar a uma adsorção descontínua, onde átomos ou moléculas formam aglomerados em vez de uma camada contínua (SOHN; KIM, 2005; WANG et al., 2023).

Com base nesses fatores, é necessário realizar modificações na isoterma de Langmuir (MARCZEWSKI, 2010). A primeira modificação considera que o soluto, durante o processo de adsorção, segue um comportamento de semelhante ao da adsorção de gases, mas com um comportamento mais geral descrito por um termo polinomial (**Equação 7**). Refletindo a ideia de que o comportamento de adsorção não é linear, como na isoterma de Langmuir original, mas pode seguir uma relação polinomial mais complexa.

$$C^m(1 - \theta) \quad (7)$$

Onde: C é a concentração do soluto;
 θ é a fração da superfície coberta.

A segunda modificação considerou que a concentração do soluto também afeta a fase de dessorção. Embora não tenha sido possível determinar a forma exata da função, optou-se por uma simplificação assumindo que ela segue uma função polinomial simples (**Equação 8**).

$$C^m \cdot \theta \quad (8)$$

Isso reflete a ideia de que a concentração do soluto também afeta a taxa de dessorção, além da adsorção. A fim de representar com precisão os comportamentos de adsorção em sistemas de solução líquida, estas modificações foram implementadas, estas mudanças permitem uma representação mais exata e adaptável do fenômeno de adsorção nestes sistemas específicos (LIU, 2006). Com tais modificações a equação de Langmuir para sistemas em solução é expressa da seguinte maneira (**Equação 9**):

$$q_e = \frac{q_{max} \cdot b \cdot C_e}{1 + b \cdot C_e} \quad (9)$$

Onde: q_e é a quantidade de adsorbato adsorvido por grama de adsorvente, no equilíbrio (mg g^{-1});

C_e é a concentração do adsorbato remanescente na fase líquida, no equilíbrio (mg L^{-1});

$q_{m\acute{a}x}$ é a capacidade máxima de adsorção (mg g^{-1});

b é a constante de interação adsorvente/adsorbato (mg L^{-1}).

A Isoterma de Freundlich é uma equação utilizada para representar o processo de adsorção em superfícies sólidas, particularmente em situações onde a adsorção não está em conformidade com um comportamento idealizado de monocamadas, conforme a Isoterma de Langmuir idealiza (DEBORD et al., 2023). Esse modelo é baseado na hipótese de que a adsorção ocorre em múltiplas camadas, o que significa que as moléculas do adsorbato podem se acumular em mais de uma camada sobre a superfície do

adsorvente. A isoterma de Freundlich é uma relação empírica que descreve a quantidade de adsorbato adsorvido por unidade de peso do adsorvente em função da pressão ou concentração do soluto na solução **(Equação 10)** (BALÁŽ; ALÁČOVÁ; BRIANČIN, 2005; PEREIRA et al., 2022; SHAFQAT; PIERZYNSKI, 2014). O parâmetro n na equação de Freundlich reflete a heterogeneidade da superfície do adsorvente. Quanto maior o valor de n maior a heterogeneidade, indicando que diferentes sítios de adsorção na superfície têm diferentes afinidades pelo soluto (VALENTE et al., 2002).

$$q = K_f \cdot C_e^{1/n} \quad (10)$$

Onde: q_e é a quantidade de adsorbato adsorvido no equilíbrio (mg g^{-1});

K_f é a constante de equilíbrio do modelo de Freundlich (mg g^{-1});

C_e é a concentração de equilíbrio (mg L^{-1});

$1/n$ é a constante relacionada a heterogeneidade da superfície.

A isoterma de Sips é um modelo que utiliza a combinação das isotermas de Langmuir e Freundlich (SAADI et al., 2015). A premissa desse modelo é baseada na adsorção heterogênea, ou seja, onde há a possibilidade de múltiplos sítios de adsorção. Esse modelo prevê comportamento da adsorção com base na concentração do adsorbato. Em baixas concentrações este modelo aproxima-se do modelo de Freundlich, já em altas concentrações de adsorbato este modelo prevê uma capacidade de sorção em mono camada característica da isoterma de Langmuir **(Equação 11)** (GIRISH, 2017).

$$q_e = \frac{q_{max} \cdot (K_s \cdot C_e^{1/ns})}{1 + K_s \cdot C_e^{1/ns}} \quad (11)$$

Onde: q_e é a quantidade de adsorbato adsorvida no equilíbrio (mg g^{-1});

q_{max} é a capacidade máxima de adsorção (mg g^{-1});

K_s é a constante de equilíbrio de adsorção de Sips (L mol^{-1});

$1/ns$ é o expoente de Sips (adimensional);

C_e é a concentração de equilíbrio (mg L^{-1}).

Outro importante parâmetro da isoterma de Sips é a constante de equilíbrio de adsorção (K_s), esta implica diretamente na afinidade do adsorbato pelo material adsorvente, onde K_s é a razão da constante de adsorção (K_a) pela constante de dessorção (K_d), e desempenha um papel fundamental na determinação do equilíbrio entre a fase líquida e a superfície do adsorvente (WANG et al., 2023). Além disso, o modelo de Sips prevê a heterogeneidade da superfície do material representado por n_s , variando de 0 a 1. Para valores de $n_s=1$, o sistema é considerado homogêneo seguindo o modelo de Langmuir. Se $n_s < 1$, o sistema é considerado heterogêneo aproximando do modelo de Freundlich; se $n_s > 1$, indica a formação de multicamadas do adsorbato sobre o adsorvente (JEMUTAI-KIMOSOP et al., 2022).

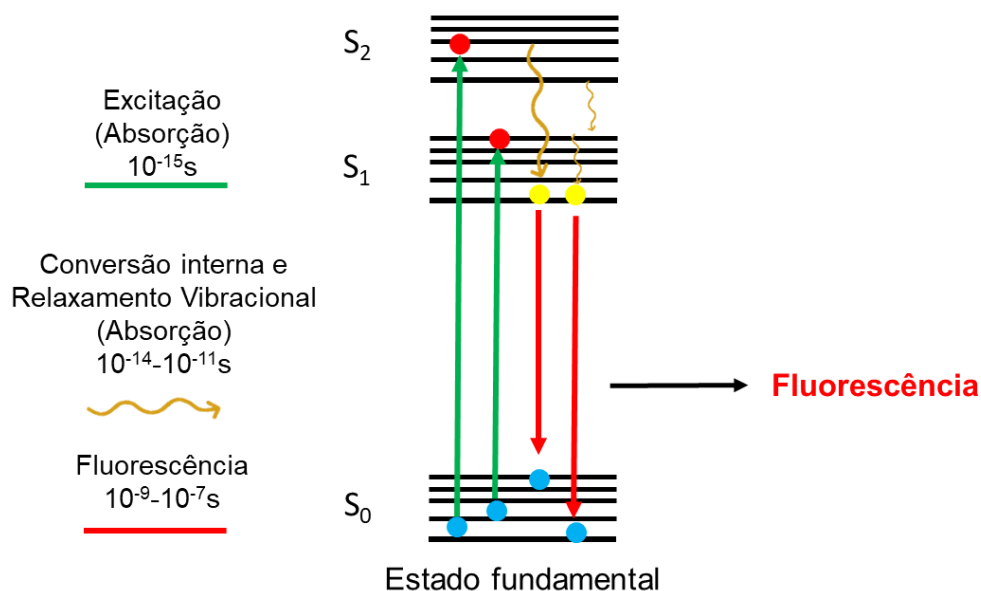
2.10 ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA

A espectroscopia de fluorescência, também conhecida como fluorometria, é um tipo de espectroscopia que mede a intensidade da luz emitida por uma amostra após a absorção de uma luz incidente (PARKER; REES, 1962). Essa técnica baseia-se no princípio de que certas moléculas, quando excitadas pela luz, emitem radiação em comprimentos de onda específicos, sendo esta uma característica intrínseca da estrutura deste tipo de molécula. Os espectros de excitação e emissão de um determinado fluoróforo são determinados monitorando a emissão de fluorescência no comprimento de onda de interesse (ATVARS; MARTELLI, 2002).

A luminescência pode ser dividida em fluorescência e fosforescência, dependendo da natureza e do estado excitado envolvido no processo (DAS et al., 2012). A espectroscopia de fluorescência oferece diversas vantagens, incluindo a capacidade de quantificar analitos, determinar comprimentos ideais de excitação e fornecer informações sobre o ambiente que afeta as propriedades de fluorescência da molécula (SENESI; D'ORAZIO, 2005). A comparação da espectroscopia de fluorescência com outras técnicas espectroscópicas, como espectroscopia de absorção e espectrometria de absorção atômica (AA), revela diferenças e benefícios distintos.

A espectroscopia de absorção é uma técnica que mede os dados de absorção óptica de uma amostra diluída usando um feixe de luz incidente. Em contraste, a espectroscopia de fluorescência detecta a intensidade da luz emitida por uma amostra após ela ter absorvido a luz incidente, portanto, a espectroscopia de fluorescência é frequentemente considerada mais sensível do que a espectroscopia de absorção, pois mede diretamente a luz emitida pela amostra ao passo que a na espectroscopia de absorção é feito a diferença do feixe transmitido através da amostra pelo feixe inicial (GEDDES; LAKOWICZ, 2006; YU et al., 2021). Na **Figura 7** é possível verificar o mecanismo para a fluorescência.

Figura 7: Diagrama de Energia de Jablonski para o fenômeno da fluorescência.



Fonte: Adaptado de (ISLER et al., 2018).

Os equipamentos de espectroscopia de fluorescência são altamente eficientes, oferecendo uma alta capacidade de detecção e quantificação. Contudo, é relevante destacar que esses equipamentos tendem a ser de alto custo, limitando o acesso à técnica (CROCOMBE, 2018). Como alternativa, têm sido desenvolvidos dispositivos analíticos de baixo custo, sendo estes mais acessíveis, que empregam sensores alternativos para a detecção e quantificação da fluorescência (SHIN; GUTIERREZ-WING; CHOI,

2021; ZHANG et al., 2016). Esses dispositivos, muitas vezes baseados em sensores ópticos integrados em microchips, microcontroladores ou dispositivos portáteis de espectroscopia, representam uma abordagem mais econômica para a análise de fluorescência, embora possam apresentar algumas limitações em termos de sensibilidade ou resolução (LALL et al., 2024; MURPHY et al., 2023).

2.11 MÉTODOS ANALÍTICOS ALTERNATIVOS

Atualmente existem diversas técnicas capazes de detectar e quantificar uma ampla gama de corantes, cada uma oferecendo abordagens distintas com base nas propriedades químicas e físicas dos mesmos (SMITH et al., 2021). Desde as abordagens clássicas como a espectroscopia na região do UV-Vis, que utiliza-se da absorção de radiação ultravioleta e visível em comprimento de ondas específicos, até métodos mais avançados como técnicas cromatográficas, que permitem a separação e a identificação destes corantes (GOROG, 2018).

Além das técnicas mencionadas, a espectrometria de massas (MS) e espectroscopia de fluorescência também são amplamente utilizadas na análise de corantes (VETTUMPERUMAL et al., 2018; WOZNIAK et al., 2021). A espectrometria de massas permite a identificação precisa dos corantes com base na razão massa/carga (M/Z), oferecendo alta sensibilidade e seletividade, enquanto a espectroscopia de fluorescência explora as propriedades ópticas dos corantes, fornecendo informações sobre sua estrutura molecular (LECH; POŁEĆ-PAWLAK; JAROSZ, 2009). Essas técnicas possibilitam uma análise mais abrangente dos corantes, fornecendo informações detalhadas sobre sua composição, estrutura e comportamento em uma variedade de amostras e sistemas (YAMJALA; NAINAR; RAMISETTI, 2016).

Porém tais técnicas são consideradas de alto custo e exigem recursos especializados, tanto em termos de equipamentos quanto de pessoal qualificado, o que pode representar um desafio significativo para organizações com recursos limitando o acesso aos mesmos (SOUZA et al., 2020). No entanto, os avanços contínuos na tecnologia abrem portas para novas tecnologias mais acessíveis e de baixo custo. Estas são projetadas para serem fáceis de serem implementadas e utilizam materiais alternativos, sendo que

muitas dessas se beneficiam por serem miniaturizadas e utilizarem baixo volume de amostras. Além disso, muitas vezes são dispositivos portáteis, possibilitando a análise *in loco* e evitando uma série de problemas inerentes ao armazenamento e transporte de amostras (MAYER; BAEUMNER, 2019).

Dentro desta vertente sensores alternativos vem ganhando destaque nos últimos anos, devido à sua capacidade de oferecer análises rápidas e precisas em uma variedade de campos, desde a detecção de poluentes ambientais até a monitorização da qualidade de alimentos e medicamentos (DINCER et al., 2019; MORAES et al., 2014). Na **Tabela 3** é possível observar alguns destes sensores alternativos.

Tabela 3: Sensores utilizados para diferentes analitos e aplicações.

Sensor	Analito	Referência
<i>Smartphone</i>	Glicose no sangue humano.	(MARTINKOVA; POHANKA, 2016)
Sensor RGB TCS34725	Corantes em solução aquosa.	(DE CARVALHO OLIVEIRA et al., 2022)
Sensor RGB	Cobre (II) em amostras de solos.	(GUO et al., 2024)
Sensor fibra óptica	Gases industriais	(OHIRA et al., 2015)
<i>Smartphone</i>	Nitrito em solução aquosa.	(RAJASULOCHANA et al., 2022)
Scanner de mesa	Fe, Cu e Ni em amostras de material particulado.	(MENTELE et al., 2012)
<i>Web-can</i>	Corante Fluoresceína	(BALSAM et al., 2012)

Fonte: O Autor.

Esses sensores representam uma importante contribuição para a simplificação e agilidade dos processos analíticos, oferecendo soluções acessíveis e eficazes para diversos desafios enfrentados em diferentes áreas da ciência e da indústria. Eles possibilitam uma coleta de dados mais precisa e

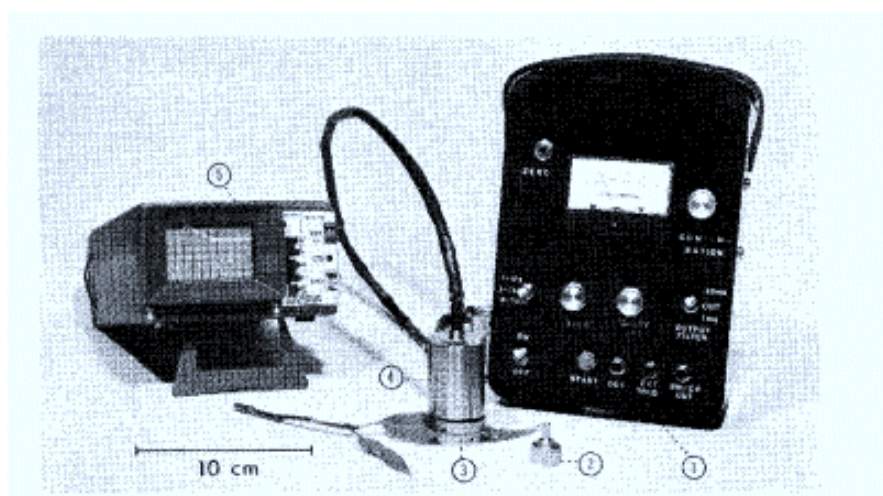
em tempo real, facilitando a tomada de decisões e o desenvolvimento de novas tecnologias.

2.12 USO DE LED COMO FONTE DE RADIAÇÃO EM DISPOSITIVOS ANALITICOS

O uso de Diodos Emissores de Luz, ou simplesmente LEDs (do inglês Light Emitting Diodes), surgiu como um grande avanço na construção de dispositivos ópticos, sendo utilizados como Fonte de radiação no desenvolvimento de sensores analíticos (LAU et al., 2006). A utilização de LEDs como Fonte de luz tornou-se muito comum, uma vez que estes cobrem uma ampla faixa que vai desde o ultravioleta até o infravermelho (380-900nm). Isso se deve ao seu baixo gasto de energia, longo tempo de vida, emissão estável, além de serem baratos em comparação com outras Fontes de luz mais robustas, como por exemplo as lâmpadas de arco, muito utilizadas em dispositivos analíticos como o espectrofotômetro UV-vis (LAU et al., 2004).

O primeiro relato sobre o uso destes fotodiodos em dispositivo analítico foi descrito por FLASCHKA; MCKEITHAN; BARNES, (1973) que utilizaram um LED vermelho e um fototransistor para a construção de um módulo fotométrico. Já em 1975, é relatado o primeiro fluorômetro portátil. Este era utilizado para a determinação de clorofila em plantas (**Figura 8**).

Figura 8: Fluorômetro portátil para a detecção de clorofila em plantas.



Fonte: (SCHREIBER; GROBERMAN; VIDAVER, 1975)

O instrumento consistia em duas partes: uma sonda de fluorômetro, contendo um LED vermelho acoplado a um fototransistor, e um amplificador de sinal conectado a um painel para visualização do mesmo, juntamente com um osciloscópio para gravação do sinal. Todo o equipamento era alimentado por baterias (SCHREIBER; GROBERMAN; VIDAVER, 1975).

Os fotômetros e fluorímetros baseados em LEDs compartilham o mesmo princípio fundamental de interação da luz com a matéria para realizar análises quantitativas ou qualitativas (BUI; HAUSER, 2015). Enquanto os fotômetros medem a absorção de luz pela amostra para determinar a concentração de uma substância específica, os fluorímetros excitam os fluoróforos presentes na amostra, medindo a intensidade da luz de fluorescência emitida como resultado dessa excitação (DANTAS et al., 2017; TEDETTI; JOFFRE; GOUTX, 2013).

A construção dos mesmos é de fato bastante simples, pois possuem poucos módulos e estes muitas das vezes são de baixo custo ou utilizam materiais alternativos, facilmente disponíveis no mercado (BUI; HAUSER, 2015). Isso torna os fotômetros e fluorômetro baseados em LEDs acessíveis para uma variedade de aplicações, desde laboratórios acadêmicos até projetos de pesquisa em campo (JO; TAYADE, 2014). Além disso, a simplicidade na construção desses instrumentos também permite que eles sejam adaptados e customizados de acordo com as necessidades específicas do usuário, contribuindo para uma maior flexibilidade e versatilidade na realização de análises ópticas (MORBIOLI et al., 2017).

Portanto, o uso de LEDs como Fonte de radiação em dispositivos analíticos está continuamente evoluindo, com melhorias na eficiência dos dispositivos, maior capacidade de sintonização espectral e redução de custos. Essa tendência promete impulsionar ainda mais a miniaturização, a automação e a portabilidade dos instrumentos analíticos, tornando-os mais acessíveis e ampliando suas aplicações (HOSSAIN et al., 2015).

2.13 IMPRESSÃO 3D

A impressão 3D é um avanço tecnológico que possui aplicação em diversos campos, incluindo a pesquisa científica, ao oferecer dispositivos personalizados com precisão de design e geometria, além da flexibilidade na

escolha de materiais, fornecendo soluções práticas para uma ampla gama de desafios científicos (MANZANARES PALENZUELA; PUMERA, 2018). Na química analítica, por exemplo, essa tecnologia permite a fabricação de dispositivos adaptados às necessidades específicas de cada experimento, desde microdispositivos para análise em fluxo até células eletroquímicas de geometrias complexas (GROSS; LOCKWOOD; SPENCE, 2017; NIELSEN et al., 2020).

A impressão 3D se consolidou como uma excelente ferramenta na construção de dispositivos analíticos. Segundo (CARDOSO et al., 2020), essa tecnologia apresenta vantagens únicas, como um tempo de prototipagem rápido, liberdade de design para desenvolver ferramentas únicas e a capacidade de construir esses dispositivos em larga escala, seguindo a geometria desejada e gerando um mínimo de resíduos.

Essa tecnologia, em conjunto com a aplicação de sensores analíticos, expande significativamente as possibilidades no desenvolvimento de dispositivos analíticos de custo acessível. Um exemplo é o trabalho realizado por (LEAL et al., 2023), no qual foi desenvolvida uma plataforma de IoT impressa em 3D para monitorar as concentrações de sulfeto de hidrogênio (H_2S). Nesse projeto, um LED serviu como Fonte de luz, enquanto um sensor TSL2591 foi empregado para realizar as medições necessárias. Além disso, esse dispositivo foi integrado a um drone, possibilitando a análise vertical do H_2S , ampliando assim as capacidades de monitoramento e facilitando o monitoramento de poluentes atmosféricos.

Com base nas informações apresentadas, este trabalho tem como objetivo desenvolver um dispositivo de baixo custo para medidas de fluorescência, utilizando impressão 3D e um sensor TSL2561, para avaliar as folhas de taboa (*Typha angustifolia* L.) como material adsorvente na remoção de FS em matrizes aquosas.

3 Objetivos

3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi o desenvolvimento de uma plataforma de baixo custo para avaliar as folhas de taboa (*Typha angustifolia* L.) como material adsorvente na remoção de FS em matrizes aquosas.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir um dispositivo impresso em 3D utilizando sensor de Luz (TSL2561, lux-sensor, TAOS) e um microcontrolador Arduíno Uno para a realização de medidas de fluorescência.
- Otimizar os parâmetros do sensor utilizando soluções de FS em diferentes concentrações.
- Otimizar e caracterizar os parâmetros de adsorção da FS pelas folhas de taboa (*Typha angustifolia* L.).
- Avaliar a capacidade de adsorção da FS pelo dispositivo desenvolvido.
- Calibração e obtenção dos parâmetros analíticos.
- Aplicações em amostras de águas.

4 Materiais e métodos

4.1 PADRÕES, REAGENTES E SOLUÇÕES

As soluções utilizadas foram preparadas a partir de reagentes de grau analítico e água ultrapura, coletada de um sistema de purificação de água Milli-Q® (Millipore, Merck, Alemanha). As soluções foram preparadas a partir da diluição do sal padrão de fluoresceína sódica (Êxodo Científica), na concentração de 100 mg L⁻¹ e quando necessário, o pH das soluções utilizadas nas análises foi ajustado com soluções 0,1 molL⁻¹ de NaOH e HNO₃.

4.2 VIDRARIAS E MATERIAIS

Todas as vidrarias e materiais (como pipeta Pasteur, frascos plásticos utilizados nos ensaios de adsorção, frascos utilizados para armazenamento das amostras) foram lavados com detergente, permaneceram em água destilada por 24 horas, em solução de ácido nítrico 10% v/v por 24 horas, foram enxaguadas com água Milli-Q e secas à temperatura ambiente.

4.3 MATERIAIS E CONSTRUÇÃO DA PLATAFORMA ANALÍTICA

Todos os componentes eletrônicos utilizados na construção da plataforma analítica foram obtidos da empresa Curto Circuito-Guarulhos (SP). Um diodo emissor de luz azul (LED) (emissão máxima a 464 nm) foi utilizado como Fonte de radiação. Para a aquisição do sinal analítico da plataforma foi utilizado um sensor de luz (TSL2561, TAOS), possuindo dois canais de detecção de luz: um canal de luz visível e um canal de luz no infravermelho. Os parâmetros avaliados na otimização da plataforma analítica foram: Canal do sensor, Corrente do LED e filtro de luz.

O sensor de luz foi conectado a um microcontrolador de placa única Arduino Nano V3 para a aquisição e manipulação de dados. Este sensor possui dois fotodiodos distintos, sendo o primeiro responsável pela captação do sinal do canal da luz visível e o segundo responsável pela captação da luz infravermelha, o que permite a captação do sinal separadamente. Esses fotodiodos convertem a luz incidente em corrente elétrica proporcional à intensidade da luz que está sendo detectada. Após a conversão da luz em corrente elétrica, o sensor TSL2561 utiliza circuitos eletrônicos para processar os sinais dos fotodiodos, convertendo-os em uma leitura digital que é interpretada pelo Arduino ao qual este está conectado, permitindo a obtenção de informações precisas sobre a iluminação ambiente.

A tensão de operação suportada pelo sensor TSL2561 é de 2,7-3,6V, e pode ser alimentada diretamente pelo Arduino através da porta 3.3V. A recepção dos dados é realizada utilizando as portas digitais do microcontrolador, que, por sua vez, é conectado ao computador via cabo USB (Universal Serial Bus) e controlado pelo software Arduino IDE. Os valores de luz são descritos em sinal de iluminância (lux) e são coletados para cada uma das medidas utilizando o software IDE e as bibliotecas disponibilizadas pela empresa Adafruit®. A partir destas bibliotecas, o usuário pode criar comandos (prompts) para o funcionamento do sensor. A biblioteca de dados utilizada foi a **sensorapi**, disponível no site da Adafruit®. O algoritmo (**Anexo A**) foi modificado para uma melhor aquisição dos dados. A **Figura 9** apresenta a tela do software IDE com o código utilizado para a aquisição das medidas de lux.

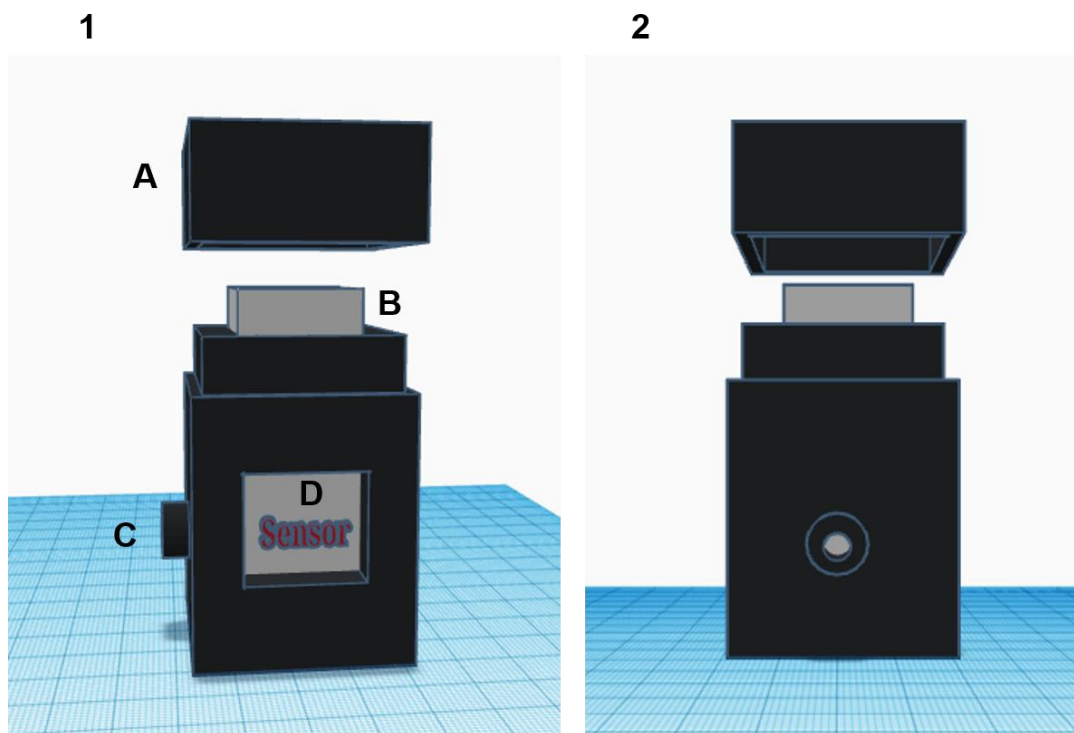
Figura 9: Captura de tela do software IDE utilizado para as medidas de LUX.

```
tsl2561.ino
1 #include <Wire.h>
2 #include <Adafruit_Sensor.h>
3 #include <Adafruit_TSL2561_U.h>
4
5 const int ledPin = 12; // Pino do LED
6 const int tslAddr = TSL2561_ADDR_FLOAT; // Endereço I2C do sensor TSL2561
7 const float fatorCorrecao = 0.89; // Seu fator de correção
8 const int janelaMediaMovel = 10; // Tamanho da janela para média móvel
9
10 Adafruit_TSL2561_Unified tsl = Adafruit_TSL2561_Unified(tslAddr, 12345);
11
12 void setup() {
13   Serial.begin(9600);
14
15   pinMode(ledPin, OUTPUT);
16
17   if (!tsl.begin()) {
18     Serial.println("Sensor TSL2561 não encontrado. Verifique as conexões!");
19     while (1);
20   }
21
22   // Configure o ganho e o tempo de integração do sensor (ajuste conforme necessário)
23   tsl.setGain(TSL2561_GAIN_16X); // Ganho: 1x
24   tsl.setIntegrationTime(TSL2561_INTEGRATIONTIME_402MS); // Tempo de Integração: 13.7ms
25 }
```

Fonte: O autor.

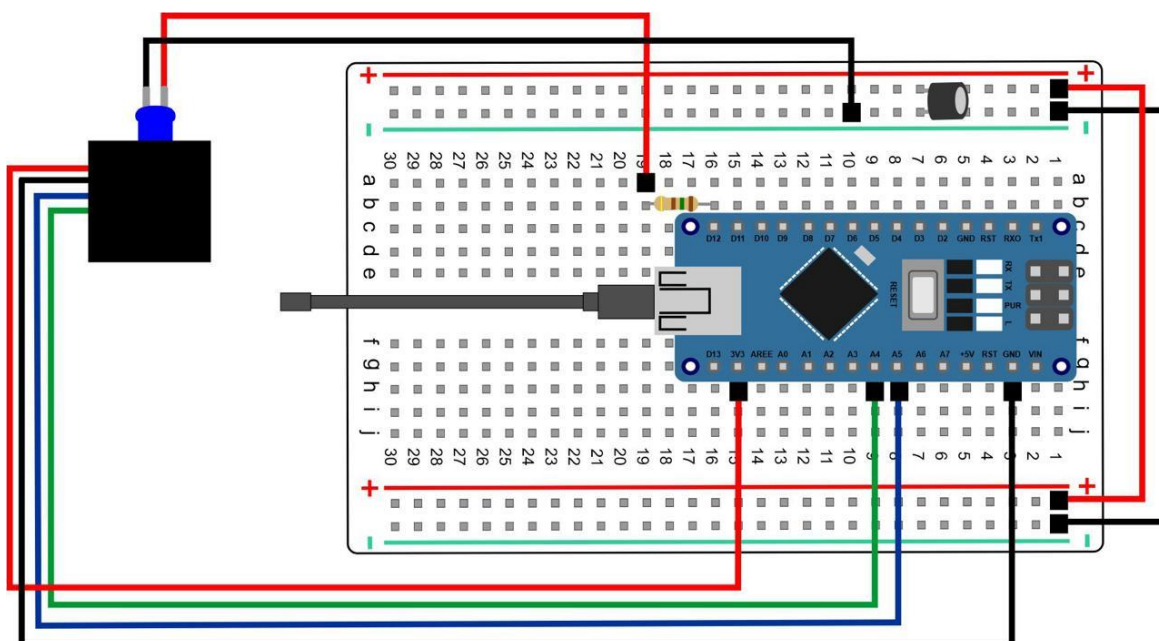
Um suporte para cubeta de quartzo foi projetado utilizando o software gratuito e online Tinkercad da Autodesk. Este suporte foi impresso em uma impressora 3D modelo Ender-3 Pro, da Creality, fabricada na China. Feito de ácido polilático resistente a altas temperaturas (PLA-HT), o suporte é composto por duas partes: uma base, que inclui o encaixe para a cubeta e o sensor, com entrada do LED a 90°C em relação à entrada do sensor (essa configuração foi utilizada pois o objetivo do sensor é captar a fluorescência emitida pela amostras); e uma tampa para cobrir a cubeta. A **Figura 10** apresenta a montagem do dispositivo e a **Figura 11** apresenta a esquemática do circuito e a **Figura 12** apresenta as conexões do sensor e do LED. Foi posicionado entre o sensor e a cubeta um filtro de luz na cor amarelo para tentar minimizar a interferência causado pelo alto brilho do LED no sinal do sensor.

Figura 10: Suporte para Cubeta: Em 1 (Vista frontal): A- tampa para a cubeta, B- Cubeta, C- entrada para o LED e em D- entrada para o sensor. 2 (Vista Lateral).



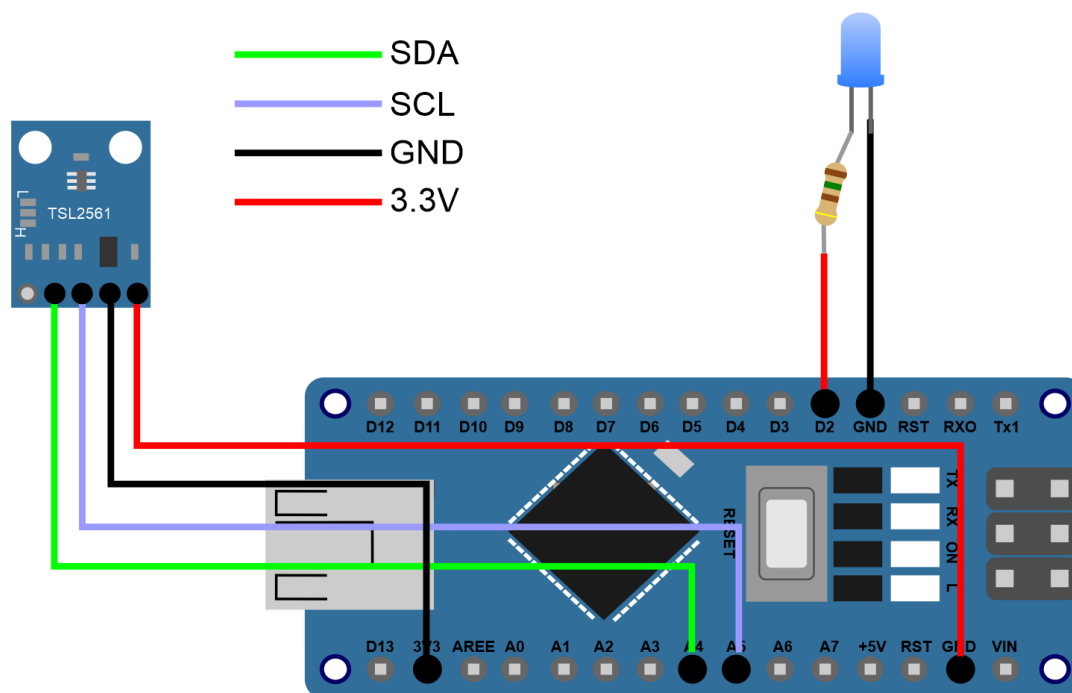
Fonte: O autor.

Figura 11: Diagrama 2D da plataforma desenvolvida para medidas de fluorescência.



Fonte: O Autor.

Figura 12: Conexões do sensor e do LED.



Fonte: O Autor.

Na **Tabela 4** é possível verificar os valores dos componentes utilizados para o desenvolvimento da plataforma analítica.

Tabela 4: Valores dos componentes utilizado para o desenvolvimento da plataforma analítica.

Componentes	Quantidade	Valor (R\$)
Arduíno nano	1un	36,90
Sensor TSL2561	1un	30,90
Jumpers macho-macho	4un	0,90
Jumpers macho-fêmea	6un	1,35
Filtro gelatina	1un	3,00
Protoboard 400 pontos	1un	8,50
PLA-HT	~51g	~7,60
TOTAL (R\$)		~89,15

4.4 PREPARO DO MATERIAL ADSORVENTE

As folhas de taboa (*Typha angustifolia L.*), foram obtidas na cidade de Catalão, GO. Após a coleta as folhas foram trituradas utilizando um moinho de facas e quando necessário um liquidificador doméstico. Peneirado em peneira doméstica, sem separação granulométrica, lavadas com água Milli-Q, e secas em estufa a 60° por 48h e posteriormente armazenadas em frascos plásticos.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ADSORVENTE

4.5.1 ANÁLISE POR ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO (IV)

O material vegetal com melhor potencial adsorativo para fluoresceína sódica foi submetido à análise por IV para a identificação dos grupos funcionais presentes, utilizando o espectrofotômetro Shimadzu FT-IR modelo IR Prestige 21, associado à Transformada de Fourier. As amostras foram preparadas na forma de pastilhas de KBr (brometo de potássio), na proporção de 100:1 (KBr:Amostra, respectivamente), irradiadas na região de 400 a 4000 cm^{-1} , com resolução de 2 cm^{-1} e 32 varreduras por amostra. As medidas foram realizadas no Laboratório de Instrumentação do Instituto de Química da Universidade Federal de Catalão.

4.5.2 pH NO PONTO DE CARGA ZERO (PH_{PCZ})

A metodologia empregada para a determinação do pH_{PCZ} foi realizada de acordo com (WANG; ZHANG; WANG, 2008), em que foram colocados em béqueres secos e limpos 100 mg do material adsorvente e 20 mL de água deionizada, cujo os valores de pH foram ajustados para valores de 1 a 12, através do gotejamento de HCl 0,1 mol L⁻¹ ou NaOH 0,1 mol L⁻¹. O pH inicial de cada solução foi medido cuidadosamente e a mistura foi deixada em repouso por um período de 24h. Logo após, as soluções foram filtradas e o pH foi novamente medido, sendo definido o pH final. A diferença entre os valores de pH inicial e pH final (ΔpH) foram plotados em função do pH inicial, sendo o

valor de pH_{PCZ} o ponto de intersecção da curva resultante com o eixo do pH inicial.

4.5.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A análise morfológica do material vegetal otimizado foi realizada pelo Laboratório Multiusuários de Microscopia de Alta Resolução (LabMic), da Universidade Federal de Goiás (UFG), Campus Samambaia. As micrografias dos materiais vegetais foram obtidas utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura, MEV, (modelo JSM – 6610, Jeol), equipado com EDS (NSS Spectral Imaging, Thermo Scientific). Antes das análises, as amostras foram previamente metalizadas com ouro em um aparelho com sistema de deposição de filmes de ouro (Desk V, Denton Vacuum).

4.6 DETERMINAÇÃO ANALÍTICA

A determinação da concentração do corante FS em solução aquosa bem como a otimização dos parâmetros de adsorção foram realizadas pelo espectrofluorômetro (FS5-Spectrofluorometer, Edinburgh Instruments). As análises foram realizadas nos Laboratórios de Instrumentação do Instituto de Química e no Laboratório de Biomoléculas do Instituto de Física, todos da Universidade Federal de Catalão (UFCAT). Durante as análises espectrofluorométricas, foram empregados os seguintes parâmetros: uma abertura de fenda de 1,0 nm para o monocromador de excitação e 0,8 nm para o monocromador de emissão. As medidas foram realizadas utilizando uma cubeta de quartzo de quatro faces polidas, com um caminho óptico de 1,0 cm.

4.7 ENSAIO DE ADSORÇÃO

Para os ensaios de adsorção foram utilizados 20 mg das folhas da taboa (*Typha angustifolia* L.) juntamente com 20 mL de solução aquosa contendo o corante FS, na concentração de 10 mg L^{-1} , no pH otimizado, em frascos plásticos, mesa agitadora a 150 RPM, durante o tempo requerido para cada ensaio. Em seguida utilizando-se um funil, a solução foi filtrada utilizando lã de vidro. O sobrenadante foi transferido para um frasco plástico de 50mL e a concentração restante em solução foi medida através do espectrofluorômetro. Os ensaios foram realizados em triplicata ($n=3$) e a temperatura ambiente. A

porcentagem de adsorção do material (%Ads) foi avaliada pela conforme a **(Equação 11)**.

$$\%Ads = \frac{c_0 - c_f}{c_0} \cdot 100 \quad (11)$$

Onde: C_0 é a concentração inicial de soluto na solução;

C_f é a concentração final de soluto na solução após a adsorção.

4.8 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO PH

O estudo do pH ideal de adsorção foi realizado para os seguintes valores de pH: 2, 5 e 9. A escolha desses valores de pH deu-se em função do diagrama das espécies apresentado no item 2.3 deste trabalho.

4.9 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CONTATO (CINÉTICA DE ADSORÇÃO)

Para esse estudo foram avaliados os tempos de contato de 5, 10, 15, 20, 30 e 50 minutos. Os ensaios foram realizados conforme descrito no item 4.7, no pH otimizado, à temperatura ambiente e em triplicata. A partir desse estudo foi possível avaliar o comportamento cinético do processo de adsorção.

4.10 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DO CORANTE FS (ISOTERMAS DE ADSORÇÃO)

A fim de se avaliar a capacidade máxima adsortiva do material vegetal pelo corante FS, fez-se o estudo das isotermas de adsorção, sendo posteriormente aplicados aos modelos de Langmuir, Freundlich e SIPS. Para a construção das isotermas, o experimento foi realizado em batelada colocando-se 20 mg das folhas de taboa em contato com 20 mL de solução aquosa do corante, e suas concentrações foram variadas de 0,05 à 70,0 mg L⁻¹. Essa mistura foi colocada sob agitação por 30 min em mesa agitadora a 150 rpm. O sobrenadante foi separado e analisado pelo espectrofluorômetro.

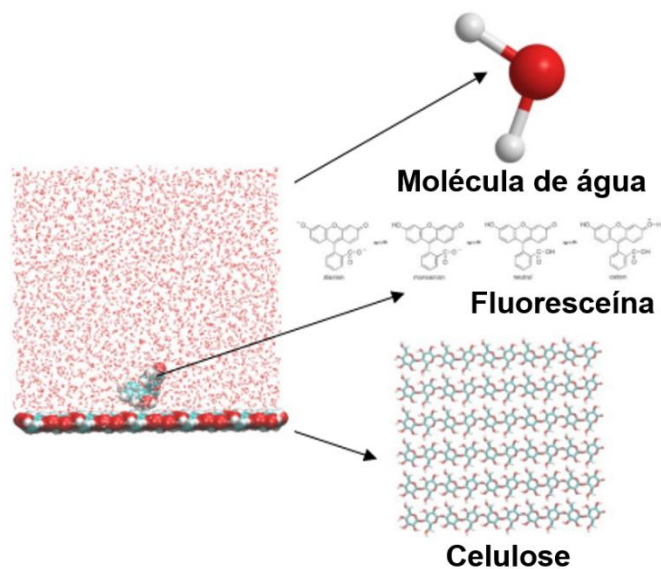
4.11 INVESTIGAÇÃO TEÓRICA DO PROCESSO DE ADSORÇÃO DA MOLÉCULA DE FLUORESCÉINA NA SUPERFÍCIE DA FIBRA DE CELULOSE

A simulação da dinâmica molecular clássica foi realizada para avaliar a interação das diferentes espécies da FS (monoânion, diânion, neutro e catiônica) com as folhas da taboa. Este experimento foi executado pelo Laboratório de Modelagem Molecular e Simulação Computacional de Nano-Bio Sistemas- LCQC do Instituto de Química da Universidade Federal de Uberlândia-UFU. Para este estudo foi utilizado o software NAMD 3.0, e todos os sistemas foram simulados utilizando o campo de força CHARMM27. Os passos de minimização, termalização e equilíbrio foram realizados previamente para obter a trajetória clássica final. Na minimização, contatos inadequados entre átomos foram ajustados utilizando a seguinte configuração: (i) passo de tempo de 2 fs (fentomsegundo); (ii) distância de corte de 12 Å; e (iii) formalismo de Ewald de partícula-rede (PME). Na termalização, a temperatura final foi de 298 K, começando de 0 e aumentando gradualmente em 0,1 K sob o conjunto NVT.

A temperatura e a pressão foram controladas pelo formalismo de Langevin. Em seguida, a equilíbrio foi utilizada para garantir que o sistema estivesse oscilando dentro de uma faixa que permite a obtenção das propriedades termodinâmicas do sistema. Uma coluna de água foi colocada acima da superfície usando o plugin de solvatação implementado no Visual Molecular Dynamics (VMD). O resultados gráficos da energia de interação e formação de ligações de hidrogênio

Para modelar a estrutura da fibra da celulose como arquivo de configuração inicial para a simulação de dinâmica molecular (MD), foi utilizado o programa Cellulose-builder. O software fornece diversas configurações adequadas de estruturas cristalinas de celulose, com diferentes tamanhos e geometrias. Moléculas de fluoresceína em diferentes estados de protonação foram posicionadas 5 Å acima da superfície. Em seguida, o sistema foi solvatado com moléculas de água para imitar as condições experimentais. Na **Figura 13** está a representação do sistema estudado neste experimento de dinâmica molecular.

Figura 13: Esquema visual do sistema simulado.



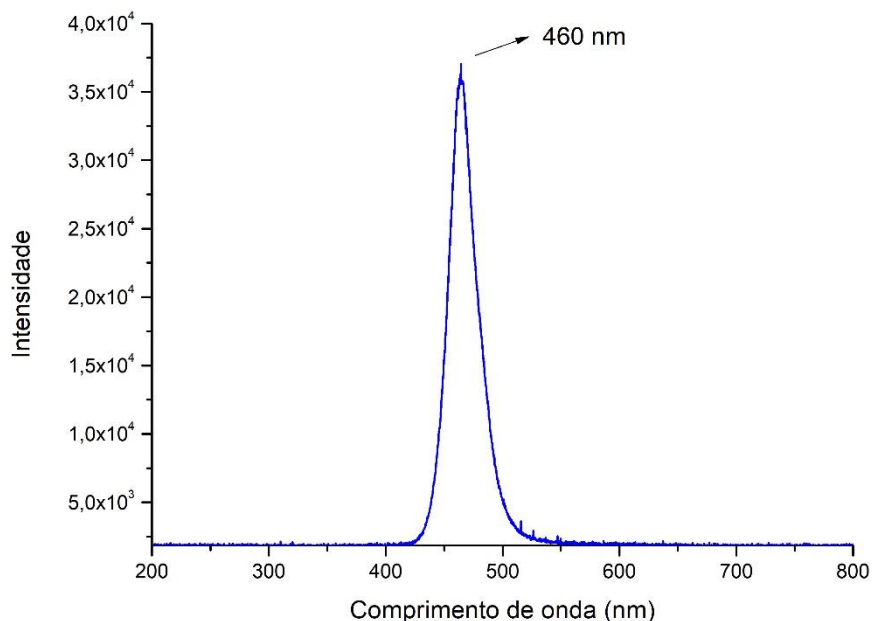
Fonte: O autor.

5 Resultados e discussões

5.1 OTIMIZAÇÃO DA PLATAFORMA ANALÍTICA

5.1.1 OTIMIZAÇÃO DO SINAL ANALÍTICO

O LED azul de alto brilho foi selecionado com base em sua capacidade de fornecer uma fonte de luz eficaz para excitar a fluoresceína. Embora o comprimento de onda do LED (460 nm) não corresponda exatamente ao pico de absorção da fluoresceína (436 nm), sua proximidade permitiu uma excitação eficiente da molécula. O pico de absorção da fluoresceína foi determinado por meio de análise de um espectrômetro UV-Vis da marca KASVI. Além disso, o LED azul oferece uma solução prática e acessível para a plataforma analítica, garantindo estabilidade e consistência nas medições ao longo do tempo. Portanto, a escolha desse LED é justificada pela sua capacidade de fornecer uma excitação adequada à fluoresceína, sua praticidade e sua acessibilidade, elementos essenciais para o desenvolvimento da plataforma analítica proposta.

Figura 14: Espectro de emissão LED azul.

Fonte: O autor

Outro parâmetro bastante importante quando o assunto é LED é que seu brilho é proporcional à corrente aplicada, o que se torna especialmente relevante no contexto da construção de dispositivos analíticos que medem a emissão de compostos. Essa característica permite um controle preciso e ajustável da intensidade luminosa emitida pelo LED, o que é fundamental para otimizar as condições de excitação em experimentos de análise química. Ao variar a corrente elétrica fornecida ao LED, é possível ajustar a intensidade da luz emitida, adaptando-a às características específicas do composto em estudo e às exigências da análise em questão. Isso proporciona uma flexibilidade significativa no projeto e na operação de dispositivos analíticos, permitindo a realização de medições precisas e sensíveis em uma variedade de amostras e condições experimentais.

Para este dispositivo, o controle da corrente do LED foi efetuado através de resistores. O LED utilizado suporta uma corrente máxima de 25 mA. Com o objetivo de avaliar a resposta analítica em função do brilho do LED, foram utilizados três resistores diferentes: 330 ohms, 680 ohms e 150 ohms. A

corrente fornecida por cada resistor pode ser calculada utilizando a Lei de Ohm **(Equação 11)**.

$$I = \frac{V}{R}$$

(11)

Onde: I é a corrente (A);

V é a tensão (V);

R é a resistência (Ω).

Calculando a corrente fornecida por cada resistor com base na tensão de alimentação utilizada de 3.3V, obtemos 10 mA para o resistor de 330 Ω , 4.85 mA para o resistor de 680 Ω e 22 mA para o resistor de 150 Ω . O desempenho analítico do dispositivo sob as diferentes condições foi avaliado com base no coeficiente de determinação (R^2) e a sensibilidade, obtido pela curva analítica e apresentados na **Tabela 5**.

Tabela 5: Análise Comparativa de Parâmetros Analíticos sob Variação de Resistores.

Resistor (Ω)	Corrente (mA)	R^2	Equação da reta
680	5	0,99884	$y=34,0906+17,765x$
330	10	0,99808	$y=80,3325+46,724x$
150	22	0,99854	$y=103,96+61,150x$

Com base nos dados da tabela, o resistor que obteve a melhor relação entre o coeficiente de determinação e o sinal analítico foi o resistor de 150 ohms. Apesar de o resistor de 680 Ω ter apresentado um coeficiente de determinação ligeiramente superior, o resistor de 150 Ω demonstrou uma sensibilidade maior em relação à variação do sinal analítico, resultando em uma melhor resposta global. Com uma corrente de 22 mA, o resistor de 150 Ω proporcionou uma amplificação mais significativa do sinal, levando a uma análise mais sensível.

5.1.2 AVALIAÇÃO DA RESPOSTA ANALÍTICA DO SENSOR TSL2561

No contexto deste estudo, é essencial compreender e explorar os parâmetros fundamentais do sensor TSL2561, os quais desempenham um papel crucial na obtenção de medições precisas e confiáveis de luminosidade. Entre esses parâmetros, destacam-se o ganho e as taxas de integração, os quais podem ser otimizados para atender às necessidades específicas da aplicação em questão. O ganho, com uma faixa ajustável entre 1x e 16x, determina a amplificação do sinal luminoso captado pelo sensor, enquanto as taxas de integração, disponíveis em 13, 101 e 402 ms, definem o período de tempo durante o qual a luz é coletada para formar uma leitura. A seleção cuidadosa desses parâmetros é crucial para garantir uma resposta sensível e precisa do sensor em uma variedade de condições de luminosidade.

Além disso, o sensor possui dois canais de leitura distintos, cada um responsável por captar uma parte específica do espectro eletromagnético. Um dos canais é dedicado à luz visível, enquanto o outro registra a luz infravermelha. Isso confere ao sensor a capacidade de fornecer três leituras diferentes: uma combinação dos sinais de luz visível e infravermelha, bem como leituras individuais para cada tipo de luz. Essa característica fundamental permite uma análise detalhada da composição espectral da luz ambiente, possibilitando uma interpretação mais precisa dos dados coletados.

Portanto, ao discutir os parâmetros de ganho e taxa de integração, bem como os canais de leitura do sensor TSL2561, neste trabalho, busca-se não apenas compreender a operação do sensor em sua totalidade, mas também otimizar sua configuração para garantir resultados precisos e confiáveis em diversas aplicações que requerem medições de luminosidade. Para este experimento, soluções de FS na faixa de concentração de 1 a 25 mgL⁻¹ foram preparadas e 3,0 µL de cada solução foram transferidos para uma cubeta de quartzo de quatro faces polidas. A intensidade de fluorescência foi medida variando-se os canais do sensor: luz visível (LV), luz infravermelha (LI) e a combinação dos canais visível e infravermelho (LVI). Para cada canal, foram ajustados o ganho do sensor, variando entre 1x e 16x, e a taxa de integração, com opções de 13, 101 e 402 ms. Após esses procedimentos, foram plotadas curvas analíticas e a resposta do sistema foi avaliada em

termos do coeficiente de determinação e da sensibilidade correspondente. Os resultados deste experimento seguem na **Tabela 6**.

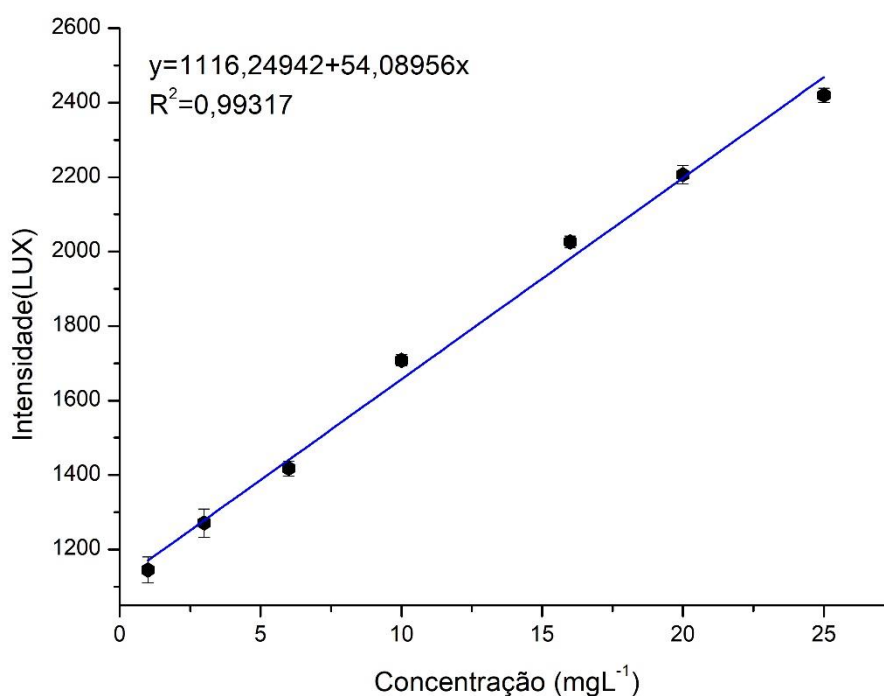
Tabela 6: Análise dos canais de leitura do sensor TSL2561 em diferentes Configurações de taxa de integração e ganho.

Canal	Configuração	Ganho	Taxa de integração (ms)	R ²	Equação da reta
LVI	1x13ms	1x	13	0,99128	$y=32,22135+1,51803x$
LVI	1x101ms	1x	101	0,81448	$y=37,28326+1,39527x$
LVI	1x402ms	1x	402	0,9916	$y=32,02412+1,52319x$
LVI	16x13ms	16x	13	0,99467	$y=30,07322+1,63565x$
LVI	16x101ms	16x	101	0,99307	$y=38,16698+1,23748x$
LVI	16x402ms	16x	402	0,99096	$y=33,06709+1,45099x$
LV	1x13ms	1x	13	0,99293	$y=36,3231+1,89325x$
LV	1x101ms	1x	101	0,82086	$y=323,46645+12,7745x$
LV	1x402ms	1x	402	0,99211	$y=1079,76798+55,86703x$
LV	16x13ms	16x	13	0,99466	$y=35,15286+2,03617x$
LV	16x101ms	16x	101	0,99906	$y=317,58752+12,04138x$
LV	16x402ms	16x	402	0,99317	$y=1116,24942+54,08956x$
LI	1x13ms	1x	13	0,96744	$y=1,19451+0,24702x$
LI	1x101ms	1x	101	0,86717	$y=16,81068+1,43611x$
LI	1x402ms	1x	402	0,99268	$y=45,47681+6,18924x$
LI	16x13ms	16x	13	0,99059	$y=1,56865+0,21985x$
LI	16x101ms	16x	101	0,99289	$y=13,82931+1,4128x$
LI	16x402ms	16x	402	0,99104	$y=42,18466+6,28034x$

Fonte: O autor.

O canal que teve a melhor relação entre o valor do coeficiente de determinação (R^2) e sensibilidade foi o de luz visível (LV) com taxa de ganho de 16x e 402ms de taxa de integração. Apesar de não ter registrado o coeficiente de determinação mais alto, essa configuração destacou-se devido a uma combinação favorável de um R^2 considerável (0,99317) e uma sensibilidade superior em relação aos demais, medida em 54,08956. Esses resultados enfatizam a confiabilidade e a eficácia dessa configuração para o desenvolvimento da plataforma analítica proposta neste estudo. A curva analítica para essa configuração é apresentado na figura abaixo **Figura 15**.

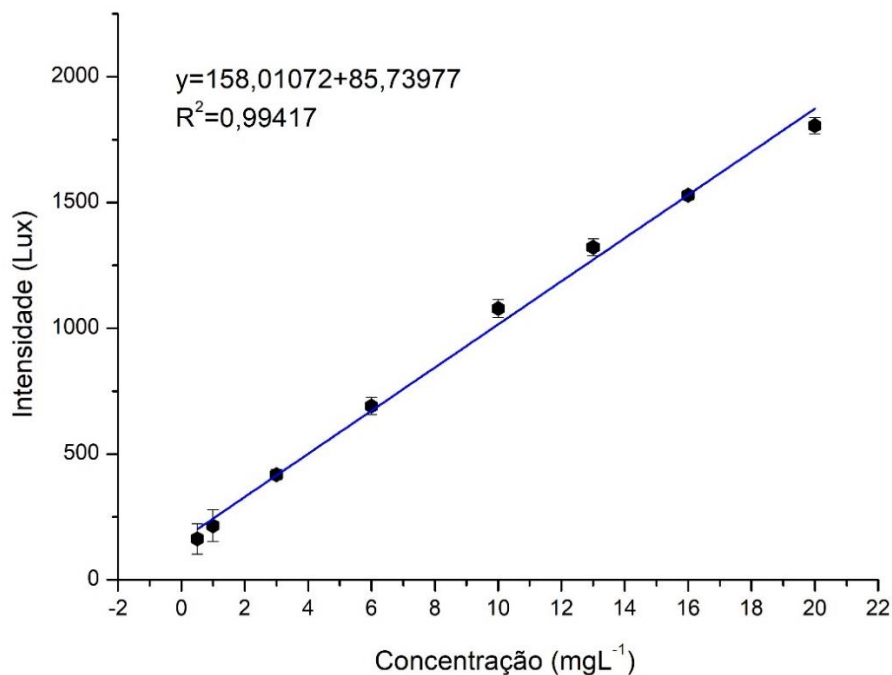
Figura 15: Curva Analítica para Configuração de 16x e 402ms no Canal de Luz Visível.



Fonte: O autor.

Outro aspecto avaliado foi a influência da radiação do LED no sinal obtido pelo sensor, pois devido a fatores de emissão e absorção, a intensidade e a qualidade da luz emitida pelo LED podem afetar diretamente a resposta do sensor. Portanto, para minimizar esse efeito, foi empregado um filtro de gelatina na cor amarela (**Figura 16**).

Figura 16: Curva analítica para a configuração de 16x 402ms com filtro de luz no canal de luz visível.



Fonte: O autor.

Como pode ser observado na figura acima, a sensibilidade da curva e o valor de R^2 teve um aumento com a utilização do filtro de luz. A utilização de filtros é uma prática comum em dispositivos analíticos para controlar a radiação incidente e garantir uma excitação mais consistente e controlada dos materiais em análise. Esses filtros têm a capacidade de absorver seletivamente certos comprimentos de onda da luz, reduzindo assim a influência de radiações indesejadas e mantendo a integridade do sinal analítico.

5.2 OTIMIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ADSORÇÃO

5.2.1 AVALIAÇÃO DA ADSORÇÃO DA FLUORESCÉINA

A avaliação da adsorção da FS pelas folhas da taboa (*Typha angustifolia*) emerge como uma estratégia essencial na mitigação dos impactos negativos associados ao descarte de corantes. A escolha criteriosa deste material, neste caso de origem renovável, busca não apenas a eficiência na

remoção da FS, mas também a promoção de práticas ambientalmente sustentáveis. Além das folhas de taboa outros materiais foram testados, estes foram: bucha vegetal (*Luffa cylindrica*); MT aglomerado (madeira processada, comumente utilizada na fabricação de compensados); casca do amendoim comum (*Arachis hypogaea*); casca da Moringa (*Moringa Oleífera*), semente e carvão da moringa (*Moringa oleífera*). Dentre os materiais estudados somente as folhas da taboa obtiveram uma boa eficiência na remoção do corante FS. A partir deste resultado, todos os ensaios de adsorção e caracterização foram direcionados para as folhas de taboa (*Typha angustifolia*).

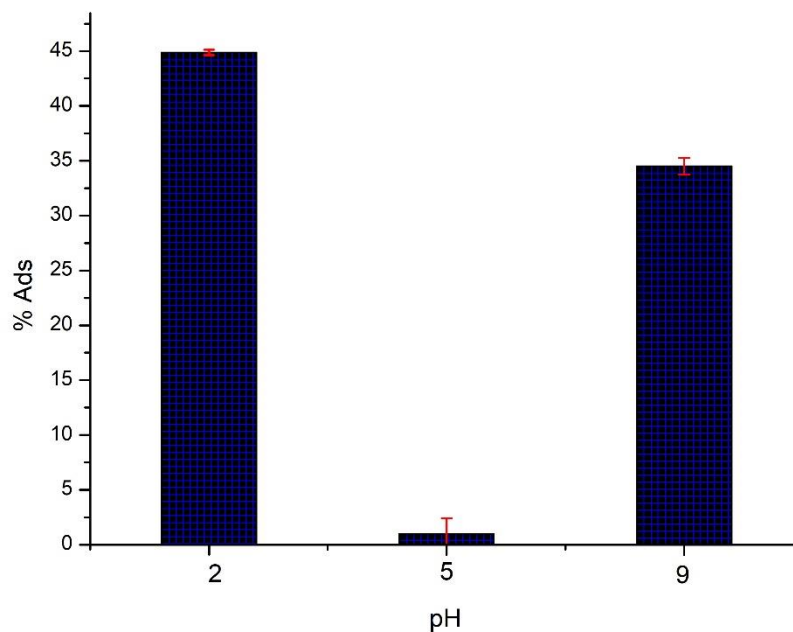
5.2.2 INFLUÊNCIA do pH NAS ESPÉCIES DA FLUORESCÉINA

O controle das espécies da fluoresceína no contexto de adsorção é fundamental, pois é um fator determinante para compreender a interação entre essa molécula e o material adsorvente. A fluoresceína, conhecida amplamente pela propriedade fluorescente, responde de maneira distinta as variações de pH, influenciando diretamente no seu comportamento de adsorção. Em ambientes ácidos, a fluoresceína prevalece na forma ácida (FS^+), com seus grupos funcionais protonados, enquanto em meio alcalino, assume predominantemente a forma diânion (FS^{2-}) (BATISTELA et al., 2010; KLONIS; SAWYER, 1996). O entendimento detalhado dessas espécies é essencial para a concepção e interpretação precisa do experimento de adsorção, destacando a necessidade de um controle rigoroso do pH para assegurar resultados robustos e confiáveis. Este experimento serviu para confirmar os dados presentes na literatura. Na **Figura 17** é apresentado o percentual de adsorção (%Ads) em função do pH do meio, as medidas foram efetuadas no espectrofluorômetro.

Os resultados do experimento revelam uma relação significativa entre a porcentagem de adsorção e o pH da solução. Em pH=2, a porcentagem de adsorção observada foi em torno de 44,87%, refletindo uma alta afinidade de adsorção em condições ácidas. Em contrapartida, à medida que o pH aumentou para 5, a porcentagem de adsorção diminuiu significativamente, indicando uma ausência notável de adsorção neste pH (molécula de FS neutra). Sob condições alcalinas, pH=9, foi registrada uma porcentagem de adsorção de 34,51%, evidenciando uma adsorção substancial, porém menor

que em pH=2. No próximo item será abordado um estudo computacional de dinâmica molecular que auxiliou no entendimento dessa adsorção.

Figura 17: Porcentagem de adsorção em função do pH.



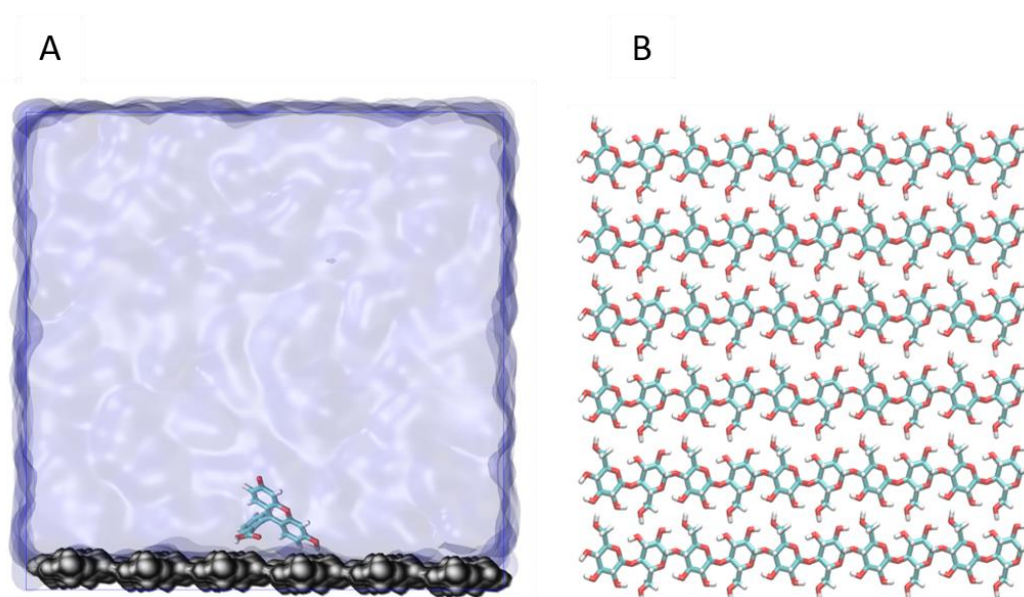
Fonte: O autor.

5.2.3 ESTUDO DA DINÂMICA MOLECULAR

O estudo da dinâmica molecular foi realizado com o objetivo de avaliar as interações da fluoresceína com o material adsorvente. O procedimento deste estudo está explicado no item 4.11 deste trabalho. Na **Tabela 7** é apresentado o sistema utilizado na simulação. A taboa apresenta em sua composição diversos constituintes, sendo os principais: celulose, lignina e hemicelulose (KAMALI MOGHADDAM, 2022). Neste estudo de dinâmica molecular realizado para investigar a interação do corante fluoresceína com as folhas de taboa, optou-se por focar exclusivamente nas fibras de celulose da planta, simplificando assim o sistema (**Figura 18**).

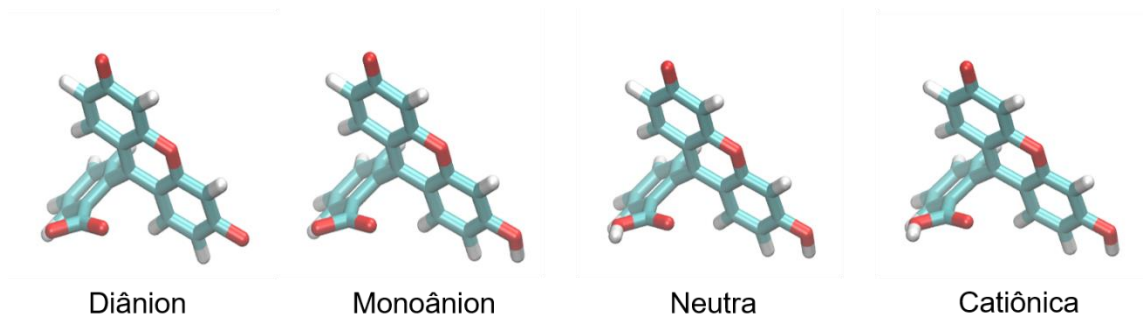
Tabela 7: Descrição do sistema simulado.

Sistema	Tamanho do sistema	Número de átomos de celulose	Número de átomos de Fluoresceína	Número de átomos do solvente
Diânion	13928	1278	35	12615
Monoânion	13929	1278	36	12615
Neutra	13930	1278	37	12615
Cátion	13930	1278	37	12615

Figura 18: A: Modelo de simulação com celulose, fluoresceína e água; B: Modelo de fibra de celulose.

Fonte: O autor.

Foram avaliadas quatro espécies de fluoresceína: diânion, monoânion, neutra e catiônica (**Figura 19**). Através dessas análises, puderam-se observar e comparar os padrões de interação entre essas diferentes formas de fluoresceína e as fibras de celulose da taboa. A variação no estado de carga dessas espécies demonstrou influenciar significativamente sua afinidade e comportamento em relação às fibras de celulose.

Figura 19: Espécies de fluoresceína.

Fonte: O autor.

Os parâmetros utilizados para avaliar a interação das espécies de FS com as fibras de celulose foram: número médio de formação de ligações de hidrogênio, interação celulose-fluoresceína, celulose-água e fluoresceína-água. Foram obtidas as energias de Van der Waals, e eletrostática total a partir dos grupos de átomos selecionados. Outro parâmetro importante foi função de distribuição radial (RDF, do inglês Radial Distribution Function), que por sua vez calcula a probabilidade de encontrar uma partícula a uma distância r de outra partícula. Esta função foi utilizada para investigar qual parte da molécula da FS estava interagindo com a superfície da celulose. A RDF pode ser calculada pela seguinte equação:

$$g(r) = \frac{dn_r}{4\pi r^2 dr \cdot \rho} \quad (12)$$

Onde: $g(r)$ é a distância radial entre as partículas (função de distribuição de probabilidade normalizada);

dn_r é o número de pares de partículas contidos em uma casca esférica de espessura " dr " e raio " r " (é o número de partículas dentro de um intervalo de distância r a $r + dr$, adimensional) (Å);

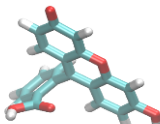
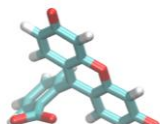

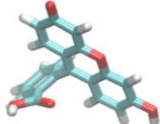
dr é a espessura da casca esférica (Å);

ρ é a densidade do sistema (g/cm^3).

Após a simulação observou-se que a molécula que apresentou maior interação em comparação as outras espécies foi a FS em sua forma diânion. Tanto a energia de interação **Tabela 8** quanto a formação de ligações de hidrogênio (**Figura 20**) foram resultados indicativos que a FS-diânion foi

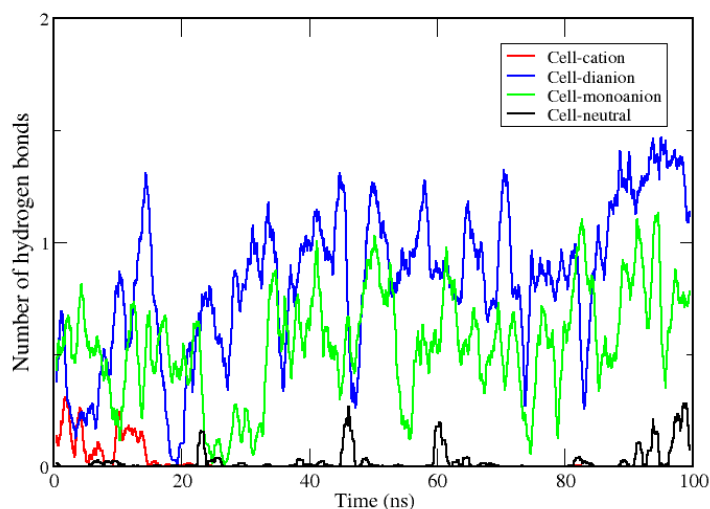
mais interativa com a superfície da celulose. Os átomos responsáveis pela estabilização da FS foram principalmente O₂, O₃ e O₄ (**Figura 21**).

Tabela 8: Energia de interação das espécies presentes na configuração do sistema

	Espécie /Conjunto	Energia de Interação (kcal/mol)
 cátion	Celulose-fluoresceína	-26.34
	Celulose -água	-1551.22
	Fluoresceína- água	-65.56
 diânion	Celulose - fluoresceína	-72.72
	Celulose - água	-1485.24
	Fluoresceína - água	-180.52
 monoânion	Celulose - fluoresceína	-46.61
	Celulose - água	-1476.45
	Fluoresceína - água	-73.53
 neutra	Celulose - fluoresceína	-26.51
	Celulose - água	-1336.25
	Fluoresceína- água	-81.37

Fonte: O autor.

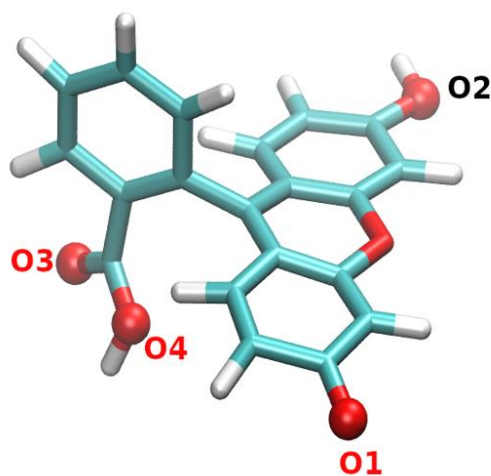
Figura 20: Número de ligações de hidrogênio.



Fonte: O autor.

Figura 21: Em vermelho os átomos de oxigênio responsável pela estabilização da interação celulose-fluoresceína.

Fluoresceína



Fonte: O autor.

O número médio de ligações de hidrogênio formadas foi de 0,83 e a energia total de interação foi de -72,72 kcal/mol. A segunda espécie mais interativa foi o monoânion, na qual a formação de ligações de hidrogênio foi de 0,54 e a energia de interação foi de -46,61 kcal/mol. As demais espécies não foram capazes de estabelecer interação com a superfície. Esse estudo comprovou o resultado experimental de que a espécie diânion (FS em pH=2) é

a que apresenta a melhor interação entre o adsorbato e o adsorvente, consequentemente levando a uma maior adsorção.

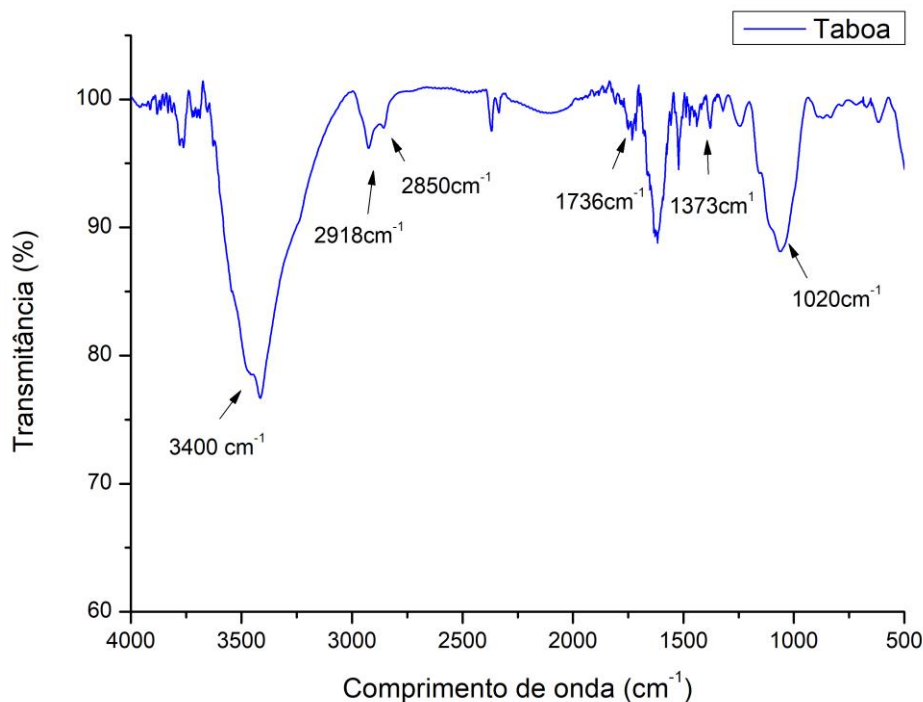
Entretanto, o estudo de dinâmica molecular não explicou totalmente as interações do sistema, uma vez que os resultados experimentais demonstram uma interação significativa em pH=9 (FS em sua forma catiônica). Como observado no item 5.2.2, o estudo experimental revelou uma adsorção significativa em pH=9, o que não foi previsto no estudo teórico. Essa discrepância pode ser atribuída à possível ausência de consideração de outras substâncias presentes na estrutura da taboa, como a lignina e a hemicelulose, por exemplo. Nesse sentido, é necessário realizar outros estudos de caracterização desses componentes para obter uma compreensão completa de sua estrutura. Esses dados serão essenciais para uma nova simulação, possibilitando a obtenção de informações mais detalhadas sobre os mecanismos de adsorção das folhas de taboa.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ADSORVENTE

5.3.1 ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO (IR)

A Espectroscopia na Região do Infravermelho (IR) é uma importante técnica que auxilia na identificação de grupos funcionais, fornecendo informações sobre mudanças estruturais que podem ocorrer durante o processo de adsorção. A análise de IR é eficaz na identificação de grupos funcionais presentes nas moléculas. Durante o processo de adsorção, os grupos funcionais nas moléculas do adsorbato podem interagir com os sítios ativos do adsorvente (**Figura 22**).

Figura 22: Espectroscopia na região do infravermelho (IR) folhas de taboa (*Typha angustifolia*)



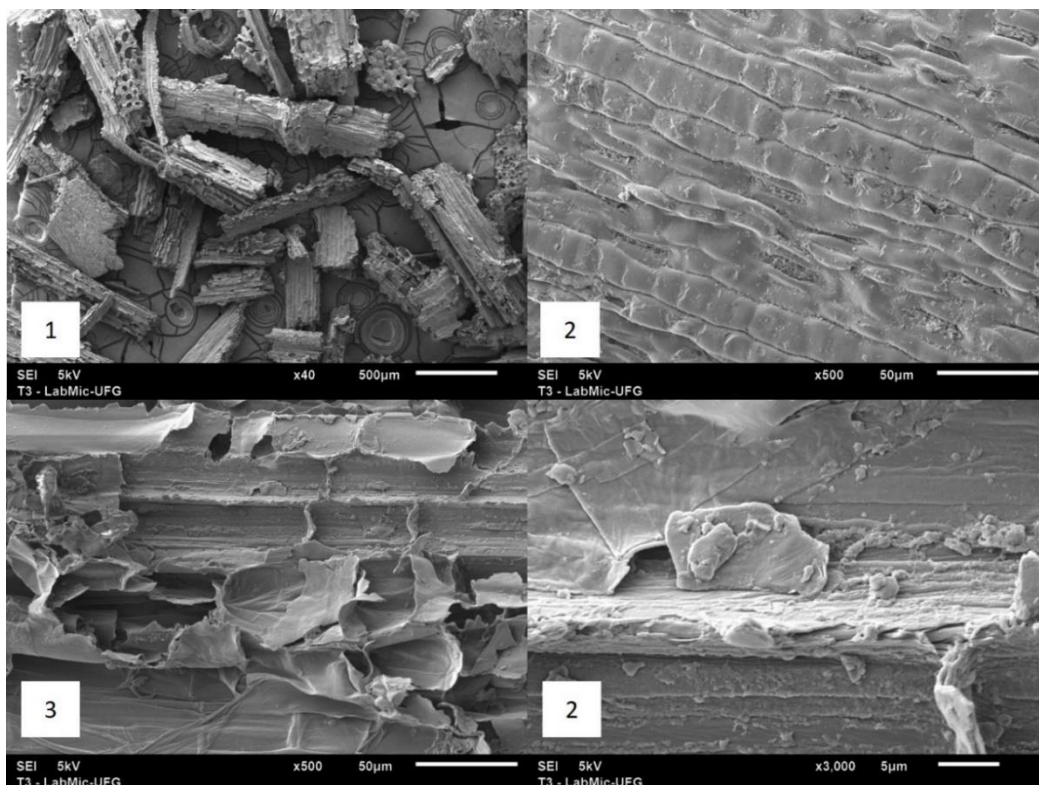
Observa-se bandas de absorção em 1733 cm^{-1} , correspondente a vibração C=O possivelmente presente nos constituintes da lignina e da hemicelulose (GAO et al., 2020; YANG et al., 2023). Por volta de 3400 cm^{-1} confirma-se a presença de grupos hidroxilas referentes a constituição da celulose e a possíveis moléculas de água presentes na estrutura do material. Nota-se também alongamentos C-H dos grupos $-\text{CH}_3$ e $-\text{CH}_2$ na faixa de 2850 cm^{-1} e 218 cm^{-1} (LIU et al., 2023). O pico em 1373 cm^{-1} pode ser atribuído a deformação angular dos grupos $-\text{CH}$ (PAVIA et al., 2010). O pico 1020 cm^{-1} é atribuído a vibração de alongamentos simétricos ou assimétricos do CO (anel presente na celulose) (ALDOSARI; JABLI; MORAD, 2023).

Os dados obtidos do IR da taboa estão em conformidade com os dados fornecidos na literatura, (WU et al., 2021), que apontam uma composição média das fibras da taboa de aproximadamente: 22,4% de celulose, 21,08% hemicelulose, 20,06 % lignina, 11,5% ceras, dentre outros constituintes. Nota-se que os estiramentos destes constituintes foram observado no espectro aqui relatado.

5.3.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A análise de MEV é uma técnica avançada de microscopia que utiliza um feixe de elétrons para obter imagens de alta resolução de amostras. No MEV, elétrons são acelerados através de uma coluna eletrônica e focalizados na amostra. O feixe de elétrons interage com a superfície da amostra, resultando em diferentes sinais. Esses sinais são detectados e utilizados para gerar imagens de alta resolução da superfície da amostra (ZHOU et al., 2007). As micrografias (MEV) das fibras das folhas da Taboa são apresentadas na **Figura 23**.

Figura 23: Micrografias (MEV) de folhas de Taboa (*Typha angustifolia L.*): 1 e 2 apresentam cortes longitudinais, ampliados 40x e 500x, respectivamente; 3 e 4 exibem cortes transversais, ampliados 500x e 3000x, respectivamente.



Fonte: SILVA, 2019.

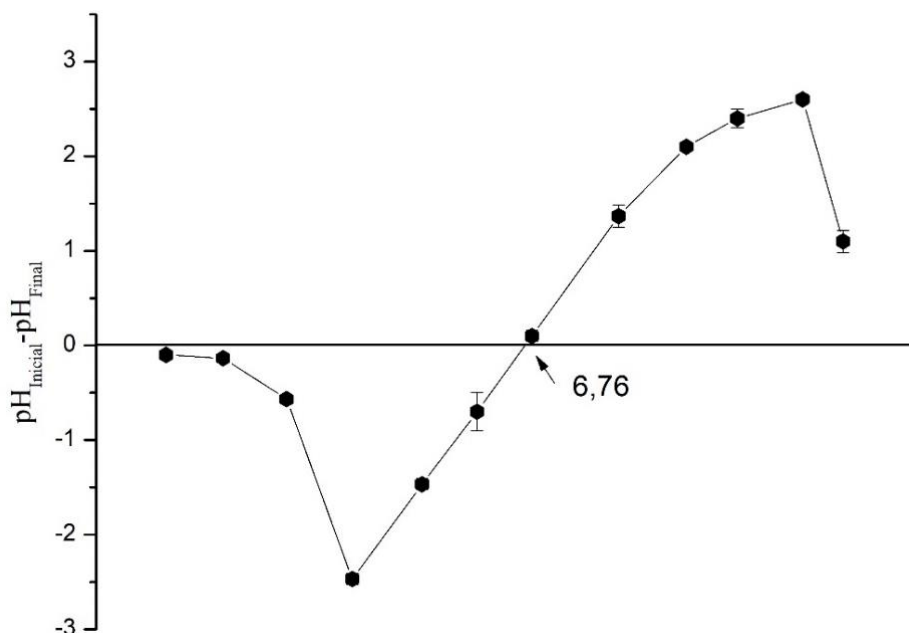
As micrografias apresentam características de superfícies irregulares, com múltiplas camadas superficiais indicando uma boa porosidade, além de cavidades tubulares. Wu e colaboradores WU et al., (2021) explicam que as cavidades tubulares presentes nas fibras da Taboa são características

de células do tipo parênquima. Essas células apresentam uma parede constituída por celulose, hemicelulose e substâncias pécticas, que constituem a parede celular primária. Essas estruturas, por sua vez, são chamadas de “semi-favo de mel”, como evidenciado pelas formações em alto relevo observadas na figura 23, micrografia 3, conferindo características mecânicas às fibras da Taboa. As múltiplas cavidades na superfície da taboa podem ser indicativo da presença de substâncias oleosas, tais como ceras, que podem também influenciar no mecanismo de adsorção (INDRAN; RAJ, 2015).

5.3.3 DETERMINAÇÃO DO pH NO PONTO DE CARGA ZERO (pH_{PCZ})

O pH no ponto de carga zero (pH_{PCZ}) refere-se ao valor de pH no qual a quantidade de cargas positivas e negativas em uma superfície atinge equilíbrio, resultando em uma carga líquida igual a zero. Em situações em que o pH é inferior ao pH_{PCZ} , a carga superficial do adsorvente torna-se positiva, promovendo a preferência pela adsorção de ânions. Por outro lado, quando o pH excede o pH_{PCZ} , a carga superficial se torna negativa, facilitando a adsorção de cátions (KOSMULSKI, 2009; SPOSITO, 1998). Essa dinâmica é fundamental para compreender como as interações superficiais são influenciadas pelas condições de pH e desempenha um papel significativo em processos de adsorção. Na **Figura 24**, é mostrado o gráfico da determinação do pH_{PCZ} para a Taboa, tendo sido o valor determinado em 6,76.

Figura 24: pH no ponto de carga zero (pH_{PCZ}) para as folhas de taboa (*Typha angustifolia* L.)



Fonte: O autor.

Com base no valor calculado, se o adsorvente em questão fosse colocado em uma solução de pH inferior a 6,76, a carga superficial será predominantemente positiva. Isso ocorre porque, em soluções ácidas, onde o pH é menor do que 6,76, os grupos funcionais na superfície do adsorvente estarão principalmente protonados, resultando em uma carga líquida positiva na superfície. Essa carga positiva pode ter implicações significativas nos processos de adsorção, influenciando a interação entre o adsorvente e os solutos presentes na solução. Portanto, em soluções ácidas, pode-se esperar uma maior afinidade do adsorvente por espécies iônicas carregadas negativamente, o que pode afetar a eficácia do processo de adsorção.

5.4 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CONTATO (CINÉTICA DE ADSORÇÃO)

Os estudos da cinética de adsorção auxiliam a compreensão da velocidade de remoção do adsorvato (FS), proporcionando um melhor entendimento sobre a dinâmica do processo de adsorção em função do tempo. A cinética de adsorção analisa como a concentração do adsorvato na interface adsorvente-adsorvato modifica-se ao longo do tempo, permitindo a quantificação da eficiência e da rapidez da adsorção (OBRADOVIĆ, 2020).

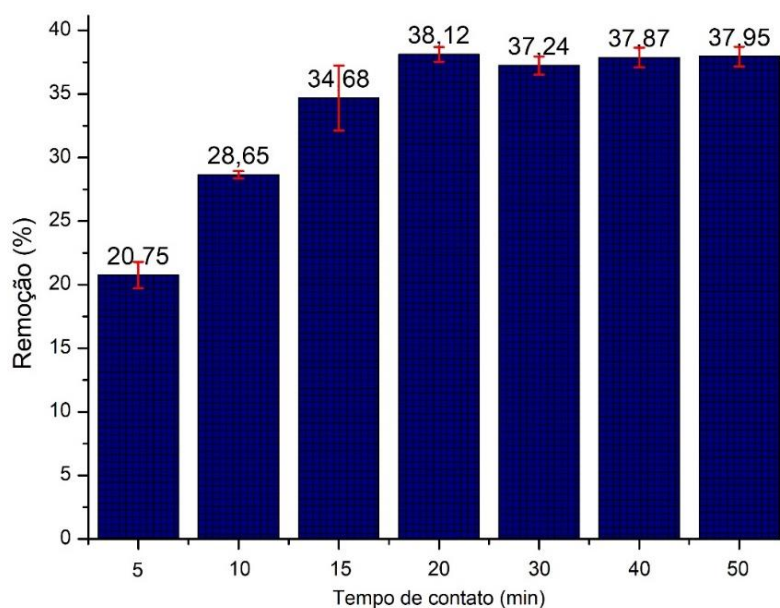
Os modelos cinéticos auxiliam na compreensão do mecanismo de adsorção, permitindo determinar a velocidade da adsorção em diferentes estágios (QIU et al., 2009). Além disso, esses modelos não apenas facilitam a interpretação dos resultados experimentais, mas também abrem caminho para a otimização de condições operacionais (MUSAH et al., 2022). Para a determinação do tempo de equilíbrio, procedeu-se a avaliação nos seguintes tempos de contato: 5, 10, 15, 20, 30, 50 minutos. Os resultados estão expressos na **Tabela 9** e graficamente na **Figura 25**

Tabela 9: Dados de porcentagem de adsorção (Ads%) e desvio padrão (DP) do estudo do tempo de adsorção.

Tempo (min)	Ads(%) \pm DP
5	20,75 \pm 1,01
10	28,65 \pm 0,27
15	34,67 \pm 2,55
20	38,1 \pm 0,58
30	37,20 \pm 0,72
40	37,86 \pm 0,78
50	37,95 \pm 0,77

Fonte: O autor.

Figura 25: Estudo do tempo de equilíbrio de adsorção para o corante FS. Massa do adsorvente: 20 mg; vol. da solução: 20mL; concentração: 10 mg L⁻¹; pH: 2; agitação: 150 RPM; n = 3.

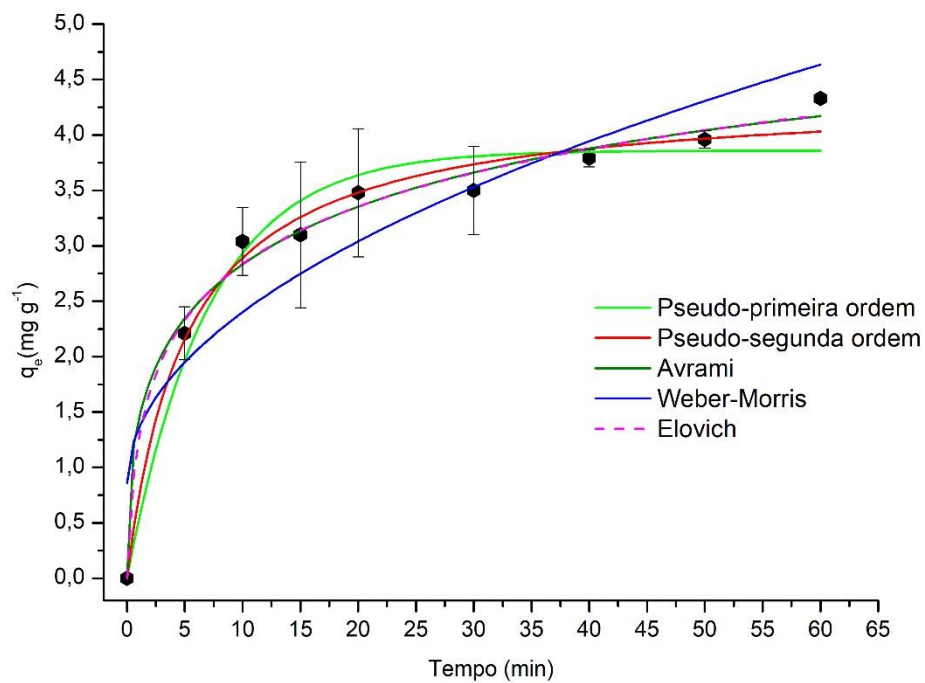


Fonte: O autor.

Os resultados da cinética de adsorção apresentam um aumento gradual na porcentagem de adsorção ao longo do tempo, atingindo um valor relativamente estável a partir de 30 minutos. Importante ressaltar que a concentração final em solução parece estabilizar após esse tempo ($37,24 \pm 0,78$), indicando que o equilíbrio foi alcançado nesse ponto. A variação na concentração entre 30 e 60 minutos é relativamente pequena, sugerindo uma desaceleração na taxa de adsorção após o período inicial. Esses dados indicam que, para o sistema em estudo, o tempo de equilíbrio em torno de 30 minutos pode ser suficiente para atingir uma eficiente remoção ou adsorção do componente em questão.

Além destas constatações iniciais, modelos cinéticos foram utilizados para um melhor entendimento do processo adsorptivo sendo eles: pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem, Avrami, Weber Morris e Elovich. Cada modelo desempenha um papel fundamental na análise da cinética de adsorção, oferecendo uma perspectiva única sobre os mecanismos subjacentes. Os dados obtidos através destes modelos estão representados na **Tabela 10** e na **Figura 6**.

Figura 26: Modelo Cinético não linear para o corante FS. Massa do adsorvente: 20 mg; vol. da solução: 20mL; concentração: 10 mg L⁻¹; pH: 2; agitação: 150 RPM; n = 3.



Fonte: O autor.

Tabela 10: Dados obtidos a partir dos modelos cinéticos não lineares de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem, Avrami, Weber Morris e Elovich.

	pseudo-primeira ordem	
$q_e \pm DP (mg\ g^{-1})$	$3,8699 \pm 0,13515$	
$k_1 \pm DP (min^{-1})$	$0,1427 \pm 0,22070$	
R^2	$0,95590$	$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 \cdot t})$
χ^2	$0,07393$	
	pseudo-segunda Ordem	
$q_e \pm DP (mg\ g^{-1})$	$4,37514 \pm 0,14380$	
$k_2 (g\ mg^{-1}min^{-1})$	$0,04445 \pm 0,00839$	
R^2	$0,98266$	$q_t = \frac{K_2 \cdot q_e^2 \cdot t}{1 + K_2 \cdot q_e \cdot t}$
χ^2	$0,02906$	
	Avrami	
$q_e \pm DP (mg\ g^{-1})$	$5,39805 \pm 2,24338$	
$k (min^{-1})$	$0,30671 \pm 2,24338$	
n_{AV}	$0,38456 \pm 0,16481$	$q_t = q_e \cdot (1 - e^{-K_{AV} \cdot t})^n$
R^2	$0,98562$	
χ^2	$0,02410$	
	Weber Morris (intra-particula)	
$K_{dif} (mg\ g^{-1} min^{-1/2})$	$0,4874 \pm 0,07186$	
$C_t (mg\ g^{-1})$	$0,8593 \pm 0,36260$	
R^2	$0,84912$	$q_t = K_{dif} \sqrt{t} + C_t$
χ^2	$0,025295$	
	Elovich	
$\alpha (mg\ g^{-1})$	$3,139 \pm 1,02763$	
$\beta (mg\ g^{-1})$	$1,321 \pm 0,11772$	
R^2	$0,98857$	$q_t = \frac{1}{\alpha} \ln(\beta \cdot t + 1)$
χ^2	$0,01917$	

Fonte: O autor.

Os resultados apresentados na tabela 10 revelam que estes modelos cinéticos demonstram ajustes significativos aos dados experimentais. Cada modelo - pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem, Avrami, Weber Morris (intra-partícula) e Elovich. Exibindo valores de coeficiente de determinação (R^2) consideravelmente altos, indicando uma boa capacidade de descrever o comportamento da adsorção em relação ao tempo. Além disso, os valores de qui-quadrado (X^2) associados a cada modelo são relativamente baixos, o que sugere que os modelos são capazes de descrever adequadamente a variabilidade nos dados experimentais.

À medida que o valor de X^2 diminui, a discrepância entre os valores experimentais de q_t e os valores calculados pelos modelos diminui. Em relação ao valor de R^2 para que um determinado modelo matemático seja considerado um bom ajuste, é necessário que ele seja maior que 0,85 (PASSOS et al., 2006; SILVA, 2019).

No modelo de Elovich os valores de α e β desempenham um papel crucial na interpretação do processo de adsorção para esse modelo. O valor de α , está relacionado à eficiência inicial de adsorção, ou seja, valores de α maiores sugerem uma maior eficiência inicial na adsorção da FS, já o valor de β está associado à taxa de adsorção, indicando o quão rapidamente ou lentamente a adsorção diminui à medida que o tempo de contato aumenta (CHIEN; CLAYTON, 1980; INYANG; ONWAWOMA; BAE, 2016).

Apesar dos notáveis resultados obtidos com o modelo de Elovich, evidenciados pelos elevados valores de R^2 e pela baixa magnitude de x^2 , a determinação precisa do mecanismo subjacente à cinética de adsorção nesse sistema permanece desafiadora, uma vez que todos os modelos aqui testados obtiveram bons ajustes dentro daquilo que cada modelo propõe **Figura 26**. Esse comportamento sugere que o mecanismo cinético ocorre por múltiplos fatores. A complexidade da interação entre a FS e o adsorvente, aliada à natureza complexa da adsorção, indica que a dinâmica do processo não é regida por um único mecanismo específico.

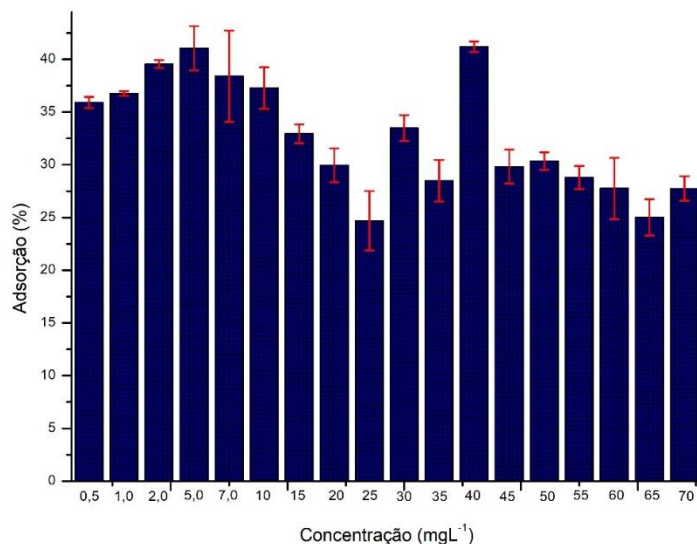
Entretanto, há evidências que sugerem que o mecanismo de adsorção não se dá por meio de interações físicas, como, por exemplo, interações eletrostáticas. Isso é evidenciado pelo desacordo entre os dados do Ponto de Carga Zero (pH_{PCZ}) e a carga da espécie de fluoresceína aqui

trabalhada (forma catiônica, $\text{pH}=2$). Abaixo do valor do pH (6,76), a carga na superfície da Taboa é predominantemente positiva, destacando a divergência entre a carga superficial do adsorvente e a natureza catiônica desta espécie da fluoresceína. Essa observação ressalta que outros mecanismos e interações, para além das eletrostáticas, podem estar desempenhando um papel significativo no processo de adsorção. Isso sublinha a importância de considerar uma série de outros fatores e interações para compreender adequadamente o complexo fenômeno de adsorção neste sistema. Por exemplo, nos modelos cinéticos de pseudo-primeira e segunda ordem, as constantes de taxa k_1 e k_2 refletem a velocidade das reações de adsorção, enquanto no modelo de Weber-Morris, a constante k_{dif} está relacionada ao coeficiente de difusão intrapartícula, enquanto no modelo de Avrami o parâmetro de taxa de reação k e o número de Avrami n_{av} desempenham papéis fundamentais na compreensão dos processos de transformação, como cristalização e nucleação.

5.5 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DA FS NA SOLUÇÃO (ISOTERMAS DE ADSORÇÃO)

A influência da concentração inicial da FS em função da adsorção foi avaliada para as seguintes concentrações de 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 7.0, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 e 70 mg L^{-1} . Seguindo as condições descritas no item 4.9. Este conjunto abrangente de dados oferece uma visão detalhada da resposta da Taboa à variação da concentração da FS, proporcionando informações valiosas sobre a eficácia da adsorção em diferentes condições. Na **Figura 27** são mostrados os valores percentuais de adsorção obtidos para o corante FS.

Figura 27: Porcentagem de adsorção em função da concentração da FS. Massa do adsorvente: 20 mg; vol. da solução: 20 mL; pH: 2; tempo: 30 min.; agitação: 150 RPM; n = 3



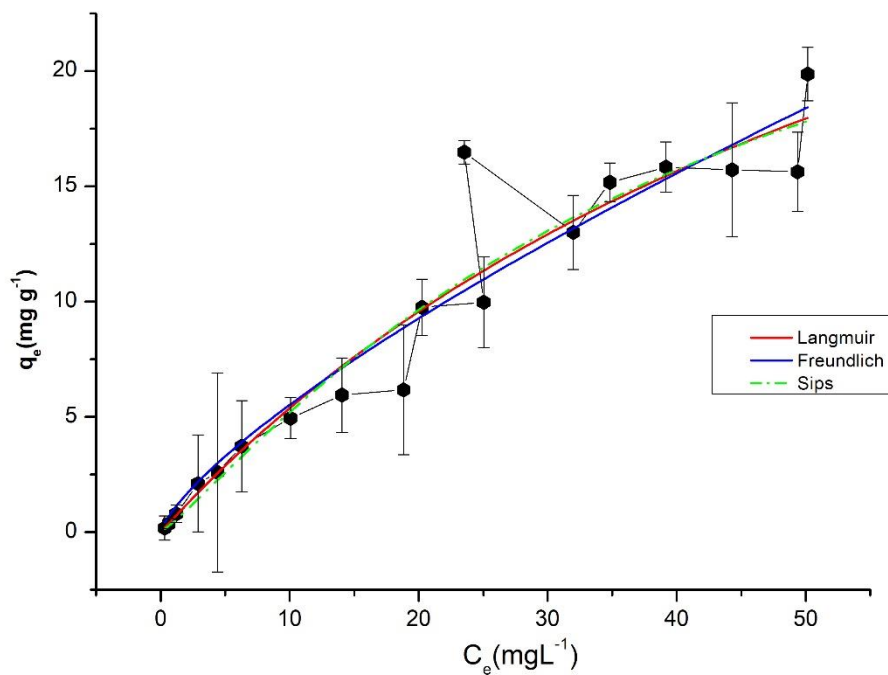
Fonte: O autor.

Os resultados provenientes da investigação acerca da influência da concentração de FS na capacidade de adsorção da Taboa indicam padrões discerníveis. Inicialmente, observa-se uma tendência ascendente na porcentagem de adsorção com o aumento da concentração de FS, atingindo valores notáveis em concentrações intermediárias, exemplificadas por 2 mgL⁻¹ (39,64%) e 5 mgL⁻¹ (41,05%). Contrariamente, em concentrações mais elevadas, como 20 mgL⁻¹ (30,17%), 30 mgL⁻¹ (32,50%), e 45 mgL⁻¹ (29,82%), verifica-se uma diminuição na eficácia de adsorção. Este fenômeno sugere a existência de um ponto de saturação, que prejudica a eficiência do processo em concentrações superiores.

A avaliação quantitativa para a determinação da capacidade máxima de adsorção (q_{max}) da Taboa foi realizada para os modelos de isotermas não lineares de Langmuir, Freundlich e Sips. A construção de isotermas desempenha um importante papel na análise do processo de adsorção, permitindo não apenas a determinação do q_{max} , mas também a investigação dos parâmetros associados ao equilíbrio. Esse estudo envolve a elaboração de gráficos que correlacionam q_e (quantidade de material adsorvido no equilíbrio) com C_e (concentração remanescente do adsorvato na solução

após o equilíbrio), fornecendo uma compreensão abrangente da dinâmica do processo de adsorção. O gráfico obtido é mostrado na **Figura 28**. Na **Tabela 11** são apresentados os dados obtidos através dos modelos de isotermas

Figura 28: Isotermas de equilíbrio para a FS. Massa do adsorvente: 20 mg; vol. da solução: 20 mL; pH: 2; tempo: 30 min.; agitação: 150 RPM; n = 3



Fonte: O autor.

Tabela 11: Dados obtidos a partir dos modelos isoterma não linear de Langmuir, Freundlich e Sips.

		Langmuir	
$q_{max} \pm DP (mg\ g^{-1})$		43,06323 ± 14,50451	$q = \frac{q_{max} \cdot b \cdot C_e}{1 + b \cdot C_e}$
$K_l \pm DP (min^{-1})$		0,01428 ± 0,00723	
R^2		0,9205	
χ^2		3,43311	
		Freundlich	
$K_f \pm DP (mg\ g^{-1})$		0,98747 ± 0,33038	$q = K_f \cdot C_e^{1/n}$
n		1,33777 ± 0,16942	
R^2		0,91568	
χ^2		3,64125	
		Sips	
$q_{max} \pm DP (mg\ g^{-1})$		32,92133 ± 21,67274	$q_e = \frac{q_{max} \cdot (K_s \cdot C_e^{1/ns})}{1 + K_s \cdot C_e^{1/ns}}$
$kS (mg\ L^{-1})^{-1/ns} \pm DP$		0,01356 ± 0,00742	
$ns \pm DP$		1,14117 ± 0,42157	
R^2		0,91578	
χ^2		3,63682	

Fonte: O autor.

Os três modelos de isotermas apresentados, Langmuir, Freundlich e Sips, revelaram uma excelente adequação aos dados experimentais da adsorção da FS pela Taboa. Essa consistência nos ajustes destes modelos fornece a premissa de que cada isoterma descreve de maneira eficaz diferentes aspectos do processo de adsorção.

A Isoterma de Langmuir, ao considerar a formação de uma monocamada uniforme, destaca a capacidade máxima de adsorção (q_{max}) e a taxa de adsorção (KI), proporcionando informações sobre a eficiência do material adsorvente em condições ideais (WANG et al., 2023). Por sua vez, a isoterma de Freundlich, ao incorporar a heterogeneidade da superfície do adsorvente, oferece uma abordagem flexível, especialmente em concentrações mais baixas, evidenciada pelos parâmetros Kf e n. onde kf indica a capacidade máxima de adsorção em baixas concentrações e o parâmetro n fornece um indicativo da heterogeneidade da superfície do adsorvente, quanto maior o valor de n maior essa heterogeneidade (SHAFQAT; PIERZYNSKI, 2014).

Já a isoterma de Sips, ao combinar elementos de Langmuir e Freundlich, sintetiza as vantagens de ambos, fornecendo uma visão mais abrangente e realista da dinâmica de adsorção, representada pelo parâmetro ns. O parâmetro ns na isoterma de Sips assim como o n na isoterma de Freundlich é um indicador da heterogeneidade superficial do adsorvente, quando mais próximo de 1, a isoterma de Sips se assemelha a de Langmuir sugerindo uma adsorção mais homogênea, com uma tendência para formação de monocamadas. Por outro lado, quando ns se aproxima de 0, a isoterma de Sips assume um comportamento semelhante à de Freundlich, indicando uma adsorção mais heterogênea, com maior variabilidade nos sítios de adsorção (FOO; HAMEED, 2010).

A capacidade máxima de adsorção (q_{max}) é um parâmetro bem importante avaliado nos modelos de isotermas e é um indicativo da eficiência do adsorvente. Para este trabalho o valor de q_{max} foi de 43,06 mg g⁻¹ de adsorvente. Esse valor nos fornece uma boa capacidade de remoção do corante FS pelas folhas de taboa, para efeito de comparação segue na **Tabela 12** outros valores de q_{max} reportado em outros trabalhos.

Tabela 12: Capacidade máxima de adsorção ($q_{\text{máx}}$) para diferentes materiais vegetais utilizados como adsorventes, reportados na literatura.

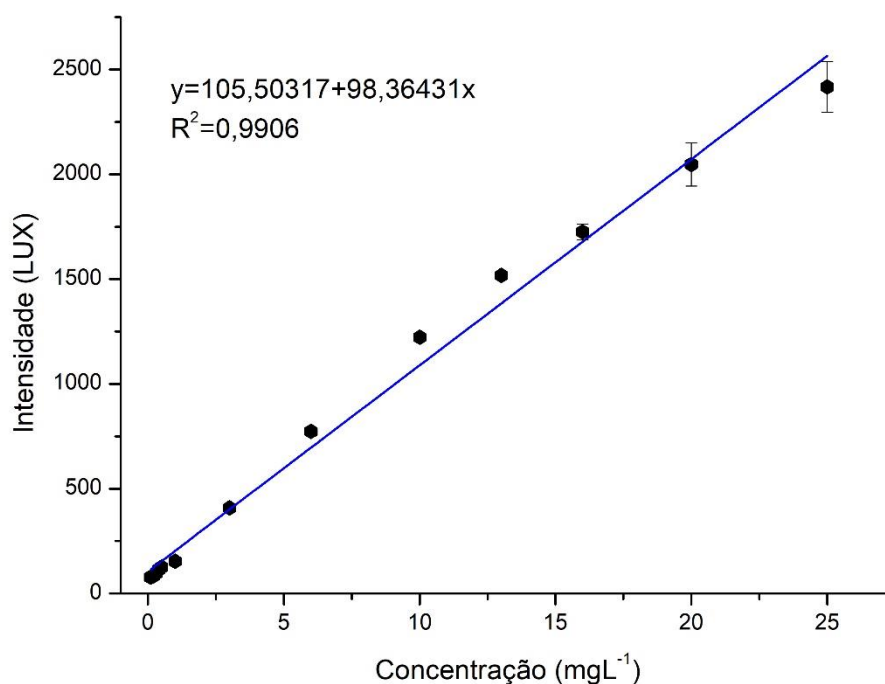
Composto	Material Vegetal	Q_{max}(mg g⁻¹)	Referência
Fluoresceína Sódica	Typha angustifolia (Taboa)	43,06	Este Trabalho
Azul de Metileno	Carvão da casca da Moringa oleífera	129,87	AZAD; AZHARI; HASSAN, 2020
Fenol	Casca do coco	205,80	DIN; HAMEED; AHMAD, 2009
Corante Brow R	Caule da Banana	1,12	HARSHANANDA et al., 2020
Corante Brow R	Casca do café	0,08	HARSHANANDA et al., 2020
Tebuconazol	Typha angustifolia (Taboa)	8,56	SILVA, 2019
Tebuconazol	Folhas de Taboa	13,64	SILVA, 2019
Azul de metileno	Typha Latifolia (Taboa)	23,26	HARSHANANDA et al., 2020

Fonte: O autor.

5.6 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ANALÍTICO ATRAVÉS DA PLATAFORMA DESENVOLVIDA

Após a otimização dos principais parâmetros relacionados a plataforma de detecção de fluorescência, para avaliar o seu construiu-se uma curva analítica em função da variação da concentração de 0,1 a 25 mgL⁻¹. Para tal 3,0 µL de cada solução foi transferida para uma cubeta de quartzo e submetido a leitura no dispositivo.

Figura 29: Curva de calibração da FS utilizando o a plataforma analítica desenvolvida.



Fonte: O autor.

O limite de detecção (LD) do método foi definido de forma experimental, como a menor concentração de FS capaz de fornecer uma resposta mensurável que pode ser distinguida de zero pelo sensor. Essa definição prática é crucial para determinar a capacidade do método analítico em identificar e quantificar a substância de interesse. Estabelecer o LD é fundamental para garantir que o método possa detectar concentrações

extremamente baixas da substância-alvo, fornecendo assim uma base confiável para análises quantitativas e qualitativas (ZORN; GIBBONS; SONZOGNI, 1999).

O Limite de Quantificação (LQ) é definido como a concentração mínima do analito em uma amostra que pode ser quantificada experimentalmente com precisão e exatidão aceitáveis. Isso significa que o LQ representa o ponto mais baixo em que o método analítico é capaz de detectar e quantificar com confiabilidade a presença do analito. Neste trabalho o LQ foi calculado pela equação 12.

$$LQ = 10x \frac{\sigma}{IC} \quad (12)$$

Onde σ é o desvio padrão (desvio padrão do intercepto com o eixo y);

IC é a inclinação da curva analítica.

Todos os resultados do desempenho analítico para a plataforma desenvolvida estão apresentados na **Tabela 13**.

Tabela 13: Desempenho analítico da plataforma desenvolvida neste trabalho.

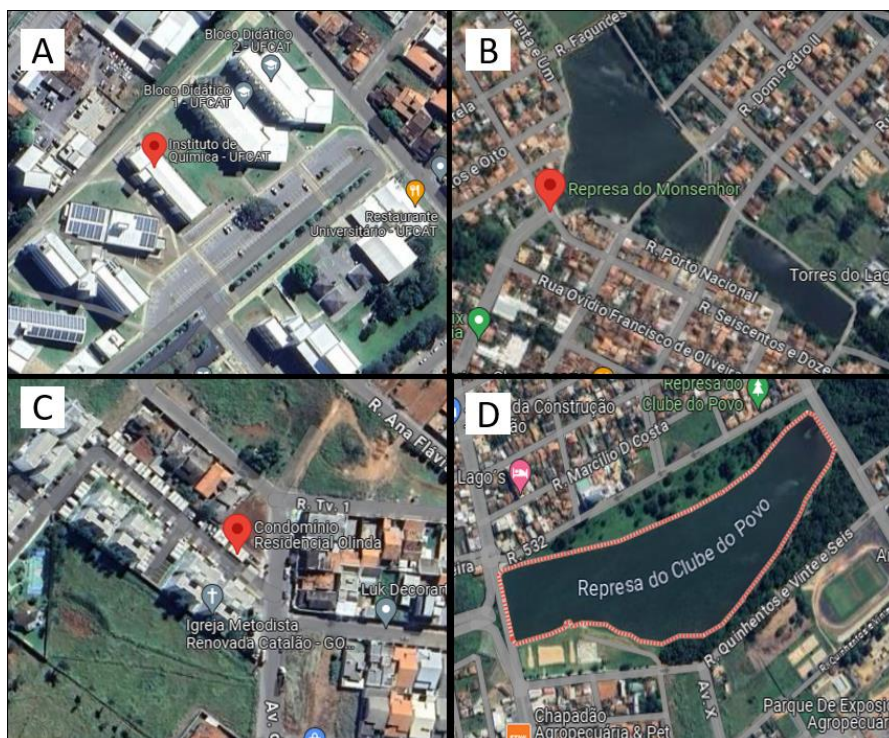
Parâmetro	Valor
Faixa Linear	0,1-25 mg L ⁻¹
Coefficiente de correlação	0,9906
Curva de calibração	y=105,50317+98,36431x
Tempo de análise	1 min.
Quantidade de solução por amostra	3,0 µL
LD	0,025 mg L ⁻¹
LQ	0,1 mg L ⁻¹
Desvio padrão intra dia	9,71%

Fonte: O autor.

5.7 DETERMINAÇÃO DA ADSORÇÃO DA FLUORESCÉINA PELA PLATAFORMA DESENVOLVIDA

Todos os experimentos a partir desta sessão foram aplicados a plataforma analítica desenvolvida neste trabalho. O desempenho da plataforma foi avaliado por meio de experimentos de recuperação e de adsorção em amostras de água naturais. As amostras de água foram recolhidas em diversos pontos da cidade de Catalão, Goiás. A Amostra 1 foi coletada na Universidade Federal de Catalão (UFCAT) (-18.15448184348917, -47.93068951308627), a Amostra 2 coletada em um local da cidade conhecido como Três Represas (-18.16391467670822, -47.96218289596441), a Amostra 3 foi coletada em um condomínio residencial abastecido por poço artesiano (-18.14992360031013, -47.93950433297026), e a Amostra 4 foi coletada na represa Clube do Povo (-18.166512754336786, -47.928858708922576) (**Figura 30**).

Figura 30: Imagem área dos pontos de coleta das amostras de água natural. (A)-Amostra 1-Universidade Federal de Catalão, bairro setor universitário; (B)-Amostra 2-Três represas-Loteamento parque das mangueiras; (C)-Amostra 3-Condominio residencial; (D)-Amostra 4-Represa clube do povo-loteamento santa cruz.



Fonte: O autor.

As amostras 1 e 4 foram coletadas diretamente da torneira e de um poço artesiano respectivamente e denominadas como sendo: Água da torneira (T), água do poço artesiano (P); As demais foram coletadas nas respectivas represas: três represas (3R) e represa clube do povo (CP). Para os ensaios de adsorção as amostras foram fortificadas com 5, 10 e 15 mg L⁻¹ de fluoresceína (n=3), a metodologia seguida é descrita no item 4.7 deste trabalho.

O teste de recuperação tem como objetivo avaliar a eficiência do método de análise na recuperação da substância de interesse a partir de uma amostra real. Durante o teste de recuperação, uma quantidade conhecida da FS foi adicionada às amostras, simulando uma condição de contaminação controlada. Em seguida, a amostra foi analisada e a quantidade recuperada da substância é comparada com a quantidade adicionada inicialmente. Essa comparação permite determinar a porcentagem de recuperação do analito, fornecendo informações importantes sobre a precisão e exatidão do método analítico. Os resultados de recuperação são apresentados na **Tabela 15**.

Tabela 14: Teste de recuperação para amostras de água naturais.

Amostras	Concentração adicionada (mg L ⁻¹)	Concentração encontrada (mg L ⁻¹)	% de recuperação
T	0,5	0,45	90,92
	10	10,15	101,54
	20	19,85	99,27
3R	0,5	0,41	82,97
	10	10,07	100,77
	20	19,57	97,84
P	0,5	0,35	71,28
	10	10,11	101,18
	20	19,45	97,25
CP	0,5	0,06	12,43
	10	10,30	103,01
	20	19,37	96,89

Fonte: O autor.

Para demonstrar a aplicabilidade da plataforma desenvolvida, a quantidade de FS adsorvida em amostras de águas naturais foi determinada empregando o método desenvolvido com medidas pelo sensor TSL2561, e os resultados foram comparados com os do espectrofluorômetro. Essas foram fortificadas com 5, 10 e 15 mg L⁻¹ de fluoresceína (n=3), seguindo a metodologia descrita no item 4.7 deste trabalho. As águas utilizadas foram as mesmas no teste de recuperação. Os resultados obtidos estão apresentados na **Tabela 15**.

Tabela 15: Determinação da porcentagem da fluoresceína; T (amostra 1), 3R (amostra 2), P (amostra 3) e CP (amostra 4).

Amostras	Sensor TSL2561	Espectrofluorômetro	t	f
Fluoresceína 5 mg L⁻¹			$T_{\text{tab}}=2,44$	$F_{\text{tab}}=9,28$
T	22,10 ± 1,67	29,04±1,66	0,93	3,63
3R	25,83±1,05	36,90±1,87		
P	35,50±0,96	31,25±1,11		
CP	33,94±1,19	33,65±0,87		
Fluoresceína 10 mg L⁻¹			2,31	0,29
T	30,70±0,92	35,70±0,01		
3R	26,44±1,85	33,12±0,53		
P	29,36±1,15	32,04±0,50		
CP	33,33±1,30	34,05±1,07		
Fluoresceína 15 mg L⁻¹			0,38	0,27
T	32,70±0,97	33,92±0,58		
3R	36,05±0,84	35,75±0,03		
P	25,20±1,77	31,55±0,09		
CP	33,48±347	30,29±2,51		

O teste F (nível de confiança 95%) indica que não há diferença significativa entre as variâncias dos métodos, indicando que os dois são comparáveis. Estes resultados foram submetidos ao teste t pareado, indicando que as porcentagens de adsorção para os dois métodos são estatisticamente semelhantes com o nível de 95% de confiança.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi desenvolvida uma plataforma analítica de baixo custo (~80 reais) para determinar a adsorção da FS na superfície da taboa. A plataforma foi desenvolvida utilizando um sensor TSL2561 como detector e um LED azul (464 nm) como fonte de excitação. A construção do dispositivo foi realizada por meio de impressão 3D, permitindo um arranjo simples e eficiente, especificamente adaptado aos módulos empregados em sua fabricação.

Para a adsorção da fluoresceína, foram empregadas as folhas *in natura* de taboa (*Thipha Angustifolia L.*), que demonstraram ser um material eficiente na remoção do corante FS em meio aquoso. A cinética de adsorção apontou que o equilíbrio foi atingido após 30 minutos, com uma remoção superior a 35% ao empregar 20 mg do material adsorvente em 20 mL de uma solução de FS com concentração de 10 mg L⁻¹. Os modelos cinéticos apresentaram uma boa conformidade com os dados experimentais, auxiliando na compressão do processo de adsorção.

Os estudos de isotermas de adsorção (Langmuir, Freundlich e Sips) demonstraram um excelente ajuste aos dados experimentais (R² superior a 0,95), com a capacidade máxima (q_{max}) de 43,06323 mg g⁻¹ para as folhas de taboa. A influência da concentração de FS sugere um aumento inicial na porcentagem de adsorção à medida que a concentração do corante é elevada, indicando uma possível saturação dos sítios ativos do adsorvente em concentrações acima de 20 mg L⁻¹.

Os experimentos de pH_{PCZ}, juntamente com o estudo de dinâmica molecular, sugerem que o mecanismo de adsorção majoritário não é de fisiossorção, uma vez que a carga do material adsorvente e do adsorvato é do tipo catiônica no pH de trabalho (pH=2). O teste de adsorção em amostra real utilizando a plataforma desenvolvida mostrou resultados promissores em comparação com o espectrofluorômetro, não apresentando diferença estatística (teste t e f com 95% de confiança).

Dessa forma, conclui-se que o objetivo desse trabalho foi alcançado. A plataforma desenvolvida foi capaz de avaliar a capacidade das folhas de taboa na adsorção da fluoresceína, sendo uma técnica simples e de fácil confecção, com o uso de materiais de baixo custo.

7 Química Verde

Uma das principais preocupações no desenvolvimento de novas metodologias ou processos que envolvem a utilização de produtos e reagentes químicos é o seu potencial impacto ambiental. À medida que avançamos em direção a um futuro mais sustentável, é crucial considerar não apenas a eficácia e a eficiência dessas abordagens, mas também os efeitos que podem ter nos ecossistemas naturais e na saúde humana (GAŁUSZKA; MIGASZEWSKI; NAMIEŚNIK, 2013). Sabendo disso esse trabalho teve como princípio estabelecer uma metodologia o mais “verde” possível, minimizando a utilização de reagentes e materiais que possuem potencial impactos ambientais. Para tal foi empregado uma ferramenta métrica para avaliar o desempenho ambiental de cada etapa do processo, essa ferramenta foi desenvolvida por WOJNOWSKI et al., (2022) e denominada de AGREEprep (Métrica analítica de verdura para Preparação de amostra, do inglês: Analytical Greenness Metric for Sample Preparation).

Esta por sua vez considera não apenas a eficácia analítica, mas também o impacto ambiental dos procedimentos de preparação de amostras; priorizar métodos que minimizem o consumo de recursos naturais, como solventes e energia; promover a redução da geração de resíduos e o uso de materiais recicláveis ou biodegradáveis sempre que possível; e incentivar a implementação de práticas mais sustentáveis em laboratórios analíticos. Ao adotar essa abordagem, a Analytical Greenness Metric for Sample Preparation oferece uma estrutura para avaliar e comparar a sustentabilidade de diferentes métodos de preparação de amostras, auxiliando os laboratórios na tomada de decisões mais conscientes e ecologicamente responsáveis. O resultado desta ferramenta é representado em um pictograma redondo com um número no centro, a cor do círculo interno e a pontuação atribuída indicam o desempenho geral de sustentabilidade da preparação da amostra. As pontuações possíveis variam de 0 a 1, sendo que uma pontuação de 0 reflete o pior desempenho em todos os critérios, enquanto uma pontuação de 1 representa o melhor desempenho possível (WOJNOWSKI et al., 2022). O pictograma obtido para este trabalho é representado na **Figura 31**.

Figura 31: Pictograma AGREEprep obtido para este trabalho.



Fonte: AGREEprep. Disponível em: <<https://agreeprep.anvil.app/>>. Acesso em: 29 fev. 2024.

Com uma pontuação de 0,91, fica evidente que a metodologia empregada obteve um desempenho altamente favorável em termos de sustentabilidade ambiental. Isso sugere que foram adotadas práticas eficazes para minimizar o impacto ambiental durante o processo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALJUMAILI, M. M. N.; ABDUL-AZIZ, Y. I. High surface area peat moss biochar and its potential for Chromium metal adsorption from aqueous solutions. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 46, p. 22–34, 1 out. 2023.

ATVARS, T. D. Z.; MARTELLI, C. Espectroscopia de luminescência. **Revista Chemkeys**, n. 2, p. 1–9, 17 set. 2018.

BALSAM, J. et al. Image stacking approach to increase sensitivity of fluorescence detection using a low cost complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) webcam. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 171-172, p. 141–147, ago. 2012.

SALIM BOUMAZA et al. Application of *Typha angustifolia* (L.) Dead Leaves Waste as Biomaterial for the Removal of Cationic Dye from Aqueous Solution. v. 12, n. 5, p. 561–573, 27 jun. 2018.

BUI, D. A.; HAUSER, P. C. Analytical devices based on light-emitting diodes – a review of the state-of-the-art. **Analytica Chimica Acta**, v. 853, p. 46–58, 1 jan. 2015.

CARDOSO, R. M. et al. Additive-manufactured (3D-printed) electrochemical sensors: A critical review. **Analytica Chimica Acta**, v. 1118, p. 73–91, 29 jun. 2020.

CHAKRABORTY, J.; DAS, S. Application of spectroscopic techniques for monitoring microbial diversity and bioremediation. **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 52, n. 1, p. 1–38, 8 jun. 2016.

CHEN, X. et al. Isotherm models for adsorption of heavy metals from water - A review. **Chemosphere**, v. 307, p. 135545, nov. 2022.

CROCOMBE, R. A. Portable Spectroscopy. **Applied Spectroscopy**, v. 72, n. 12, p. 1701–1751, 18 out. 2018.

DANTAS, H. V. et al. An inexpensive NIR LED Webcam photometer for detection of adulterations in hydrated ethyl alcohol fuel. **Microchemical Journal**, v. 135, p. 148–152, nov. 2017.

DAS, S. et al. Molecular Fluorescence, Phosphorescence, and Chemiluminescence Spectrometry. **Analytical Chemistry**, v. 84, n. 2, p. 597–625, 13 dez. 2011.

DE CARVALHO OLIVEIRA, G. et al. RGB color sensor for colorimetric determinations: Evaluation and quantitative analysis of colored liquid samples. **Talanta**, v. 241, p. 123244, maio 2022.

DINCER, C. et al. Disposable Sensors in Diagnostics, Food, and Environmental Monitoring. **Advanced Materials**, v. 31, n. 30, p. 1806739, 15 maio 2019.

DO, D. D. Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics. **Series on Chemical Engineering**, set. 1998.

DUMAN, F.; UREY, E.; KOCA, F. D. Temporal variation of heavy metal accumulation and translocation characteristics of narrow-leaved cattail (*Typha angustifolia* L.). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 22, p. 17886–17896, 12 jul. 2015.

FAHMIDEH, M.; ZOWGHI, D. An exploration of IoT platform development. **Information Systems**, v. 87, p. 101409, jan. 2020.

SERGIO L.C. FERREIRA et al. Emerging contaminants – general aspects: sources, substances involved, and quantification. **Applied Spectroscopy Reviews**, p. 1–20, 19 jun. 2023.

H. FLASCHKA; MCKEITHAN, C.; BARNES, R. Light Emitting Diodes and Phototransistors in Photometric Modules. **Analytical Letters**, v. 6, n. 7, p. 585–594, 1 jul. 1973.

FOLARON, M. et al. Elucidating the kinetics of sodium fluorescein for fluorescence-guided surgery of glioma. **Journal of Neurosurgery**, v. 131, n. 3, p. 724–734, set. 2019.

GEDDES, C. D.; LAKOWICZ, J. R.; SPRINGERLINK (ONLINE SERVICE). **Reviews in Fluorescence 2006**. New York, Ny: Springer Us, 2006.

GHAREDAGHLOO, B.; PRICE, J. S. Assessing benzene and toluene adsorption with peat depth: Implications on their fate and transport. **Environmental Pollution**, v. 274, p. 116477, abr. 2021.

GÖRÖG, S. **Ultraviolet-Visible Spectrophotometry in Pharmaceutical Analysis**. [s.l.] CRC Press, 2018.

GROSS, B.; LOCKWOOD, S. Y.; SPENCE, D. M. Recent Advances in Analytical Chemistry by 3D Printing. **Analytical Chemistry**, v. 89, n. 1, p. 57–70, 30 nov. 2016.

GUO, L. et al. Using an inexpensive RGB color sensor for field quantitative assessment of soil accessible Cu(II). **Environmental Pollution**, v. 344, p. 123348–123348, 1 mar. 2024.

HOSSAIN, A. et al. Lab-in-a-Phone: Smartphone-Based Portable Fluorometer for pH Measurements of Environmental Water. **IEEE Sensors Journal**, v. 15, n. 9, p. 5095–5102, set. 2015.

JEMUTAI-KIMOSOP, S. et al. Synthesis of mesoporous akaganeite functionalized maize cob biochar for adsorptive abatement of carbamazepine: Kinetics, isotherms, and thermodynamics. **Cleaner Materials**, v. 5, p. 100104, set. 2022.

JO, W.-K.; TAYADE, R. J. New Generation Energy-Efficient Light Source for Photocatalysis: LEDs for Environmental Applications. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 6, p. 2073–2084, 30 jan. 2014.

KAMALI MOGHADDAM, M. Typha Leaves Fiber and Its Composites: A Review. **Journal of Natural Fibers**, p. 1–15, 19 jan. 2021.

LALA, M. A. et al. Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solution using cationic modified rice husk: Parametric optimization via Taguchi design approach. **Scientific African**, v. 20, p. e01633–e01633, 1 jul. 2023.

LALL, R. et al. Low cost, high temporal resolution optical fiber-based γ -photon sensor for real-time pre-clinical evaluation of cancer-targeting radiopharmaceuticals. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 247, p. 115956–115956, 1 mar. 2024.

LAU, K. Novel fused-LEDs devices as optical sensors for colorimetric analysis. **Talanta**, v. 63, n. 1, p. 167–173, 10 maio 2004.

LAU, K.-T. et al. A low-cost optical sensing device based on paired emitter–detector light emitting diodes. **Analytica Chimica Acta**, v. 557, n. 1-2, p. 111–116, jan. 2006.

VANDERLI GARCIA LEAL et al. AirQuality Lab-on-a-Drone: A Low-Cost 3D-Printed Analytical IoT Platform for Vertical Monitoring of Gaseous H₂S. **Analytical Chemistry**, v. 95, n. 38, p. 14350–14356, 6 set. 2023.

LECH, K.; KATARZYNA POŁEĆ-PAWLAK; JAROSZ, M. Characterization of Organic Natural Dyes by Electrospray Mass Spectrometry Coupled with HPLC and/or Capillary Electrophoresis. p. 363–388, 21 ago. 2009.

LIU, J. et al. Experimental study and numerical simulation on the structural and mechanical properties of Typha leaves through multimodal microscopy approaches. v. 104, p. 37–44, 1 jan. 2018.

MANZANARES PALENZUELA, C. L.; PUMERA, M. (Bio)Analytical chemistry enabled by 3D printing: Sensors and biosensors. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 103, p. 110–118, jun. 2018.

PAVLA MARTINKOVA; MIROSLAV POHANKA. Colorimetric sensor based on bubble wrap and camera phone for glucose determination. **Journal of Applied Biomedicine**, v. 14, n. 4, p. 315–319, 1 nov. 2016.

PASSOS, C. G. et al. Use of statistical design of experiments to evaluate the sorption capacity of 7-amine-4-azaheptylsilica and 10-amine-4-azadecylsilica for Cu(II), Pb(II), and Fe(III) adsorption. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 302, n. 2, p. 396–407, 1 out. 2006.

MAYER, M.; BAEUMNER, A. J. A Megatrend Challenging Analytical Chemistry: Biosensor and Chemosensor Concepts Ready for the Internet of Things. **Chemical Reviews**, v. 119, n. 13, p. 7996–8027, 9 maio 2019.

MENTELE, M. M. et al. Microfluidic Paper-Based Analytical Device for Particulate Metals. **Analytical Chemistry**, v. 84, n. 10, p. 4474–4480, 26 abr. 2012.

MORAES, E. P. et al. Low-Cost Method for Quantifying Sodium in Coconut Water and Seawater for the Undergraduate Analytical Chemistry Laboratory: Flame Test, a Mobile Phone Camera, and Image Processing. **Journal of Chemical Education**, v. 91, n. 11, p. 1958–1960, 24 jul. 2014.

MORBIOLI, G. G. et al. Technical aspects and challenges of colorimetric detection with microfluidic paper-based analytical devices (μ PADs) - A review. **Analytica Chimica Acta**, v. 970, p. 1–22, jun. 2017.

MURPHY, O. P. et al. A Review on the Adsorption Isotherms and Design Calculations for the Optimization of Adsorbent Mass and Contact Time. v. 8, n. 20, p. 17407–17430, 24 abr. 2023.

NIELSEN, A. V. et al. 3D Printed Microfluidics. **Annual Review of Analytical Chemistry**, v. 13, n. 1, p. 45–65, 12 jun. 2020.

SHIN ICHI OHIRA et al. A fiber optic sensor with a metal organic framework as a sensing material for trace levels of water in industrial gases. **Analytica Chimica Acta**, v. 886, p. 188–193, 1 jul. 2015.

PARKER, C. A.; REES, W. T. Fluorescence spectrometry. A review. **The Analyst**, v. 87, n. 1031, p. 83, 1962.

QIN, F.; SUN, H.-X. Immunosuppressive activity of Pollen Typhae ethanol extract on the immune responses in mice. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 102, n. 3, p. 424–429, 1 dez. 2005.

RAHIMI, F. et al. A Review of Portable High-Performance Liquid Chromatography: the Future of the Field? **Chromatographia**, v. 83, n. 10, p. 1165–1195, 15 ago. 2020.

RAJASULOCHANA, P. et al. Paper-based microfluidic colorimetric sensor on a 3D printed support for quantitative detection of nitrite in aquatic environments. **Environmental Research**, v. 208, p. 112745, maio 2022.

SANA, R. et al. Flexural properties of typha natural fiber-reinforced polyester composites. **Fibers and Polymers**, v. 16, n. 11, p. 2451–2457, nov. 2015.

SCHREIBER, U.; GROBERMAN, L.; VIDAVER, W. Portable, solid-state fluorometer for the measurement of chlorophyll fluorescence induction in plants. **Review of Scientific Instruments**, v. 46, n. 5, p. 538–542, maio 1975.

SENESI, N.; D’ORAZIO, V. FLUORESCENCE SPECTROSCOPY. **Encyclopedia of Soils in the Environment**, p. 35–52, 2005.

SHIN, Y.-H.; TERESA GUTIERREZ-WING, M.; CHOI, J.-W. Review—Recent Progress in Portable Fluorescence Sensors. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 168, n. 1, p. 017502, 1 jan. 2021.

SMITH, G. D. et al. Forensic dye analysis in cultural heritage: Unraveling the authenticity of the earliest Persian knotted-pile silk carpet. **Forensic Science International: Synergy**, v. 3, p. 100130, 2021.

SOUZA, D. L. DE et al. A perspectiva dos pesquisadores sobre os desafios da pesquisa no Brasil. **Educação e Pesquisa**, v. 46, 2020.

TAUFIKURAHMAN, T. et al. Phytoremediation of chromium (Cr) using *Typha angustifolia* L., *Canna indica* L. and *Hydrocotyle umbellata* L. in surface flow

system of constructed wetland. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 308, p. 012020, 4 set. 2019.

TEDETTI, M.; JOFFRE, P.; GOUTX, M. Development of a field-portable fluorometer based on deep ultraviolet LEDs for the detection of phenanthrene- and tryptophan-like compounds in natural waters. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 182, p. 416–423, jun. 2013.

THI HUONG PHAM et al. Adsorption and photodegradation of micropollutant in wastewater by photocatalyst TiO₂/rice husk biochar. **Environmental Research**, v. 236, p. 116789–116789, 1 nov. 2023.

VETTUMPERUMAL, R. et al. Fluorescence analysis of natural dyes from *Plumeria rubra* (red and white) flowers. **Optik**, v. 159, p. 108–114, abr. 2018.

WANG, J.; GUO, X. Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method. **Chemosphere**, v. 258, p. 127279, nov. 2020.

WANG, J. et al. Adsorption Process Optimization and Adsorbent Evaluation Based on Langmuir Isotherm Model. **Langmuir**, v. 39, n. 46, p. 16404–16414, 8 nov. 2023.

WANG, K. et al. Convenient preparation of activated carbon modified phosphoric acid-activated geopolymer microspheres (C@PAAGMs) for the efficient adsorption of ReO₄⁻: Implications for TcO₄⁻ elimination. **Composites Part B: Engineering**, v. 247, p. 110296–110296, 1 dez. 2022.

WEI, K. et al. High adsorption of methyl orange by nitrogen-doped activated carbon derived from kraft lignin via self-activation. **Surfaces and Interfaces**, v. 42, p. 103484–103484, 1 nov. 2023.

WOZNIAK, M. M. et al. Textile dyeing in Medieval Sudan evidenced by HPLC-MS analyses: Material traces of a disappeared activity. **Journal of Archaeological Science: Reports**, v. 38, p. 103098, ago. 2021.

YAMJALA, K.; NAINAR, M. S.; RAMISETTI, N. R. Methods for the analysis of azo dyes employed in food industry – A review. **Food Chemistry**, v. 192, p. 813–824, fev. 2016.

Y, L. et al. A Comprehensive Review of Fluorescence Correlation Spectroscopy. **Frontiers in Physics**, v. 9, 12 abr. 2021.

ZHANG, X. et al. A simple, fast and low-cost turn-on fluorescence method for dopamine detection using in situ reaction. **Analytica Chimica Acta**, v. 944, p. 51–56, 1 nov. 2016.

ZORN, M. E.; GIBBONS, R. D.; SONZOGNI, W. C. Evaluation of Approximate Methods for Calculating the Limit of Detection and Limit of Quantification. **Environmental Science & Technology**, v. 33, n. 13, p. 2291–2295, 22 maio 1999.

The history of dyes and pigments: From natural dyes to high performance pigments. **Colour Design**, p. 557–587, 1 jan. 2012.

ALAQARBEH, M. Adsorption Phenomena: Definition, Mechanisms, and Adsorption Types: Short Review. **RHAZES: Green and Applied Chemistry**, v. 13, n. 0, p. 43–51, 22 set. 2021.

ALDOSARI, O. F.; MAHJOUR JABLI; MORAD, M. H. Chemical extraction of cellulose from Ligno-cellulosic Astragalus armatus pods: Characterization, and application to the biosorption of methylene blue. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 16, n. 8, p. 105019–105019, 1 ago. 2023.

AL-GHEETHI, A. A. et al. Sustainable approaches for removing Rhodamine B dye using agricultural waste adsorbents: A review. **Chemosphere**, v. 287, p. 132080, jan. 2022.

ALI, I.; GUPTA, V. K. Advances in water treatment by adsorption technology. **Nature protocols**, v. 1, n. 6, p. 2661–7, 2006.

ALJUMAILI, M. M. N.; ABDUL-AZIZ, Y. I. High surface area peat moss biochar and its potential for Chromium metal adsorption from aqueous solutions. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 46, p. 22–34, 1 out. 2023.

AL-TOHAMY, R. et al. A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 231, p. 113160, fev. 2022.

ARDILA-LEAL, L. D. et al. A Brief History of Colour, the Environmental Impact of Synthetic Dyes and Removal by Using Laccases. **Molecules**, v. 26, n. 13, p. 3813, 22 jun. 2021.

ARORA, J.; AGARWAL, P.; GUPTA, G. Rainbow of Natural Dyes on Textiles Using Plants Extracts: Sustainable and Eco-Friendly Processes. **Green and Sustainable Chemistry**, v. 07, n. 01, p. 35–47, 2017.

ATVARIS, T. D. Z.; MARTELLI, C. Espectroscopia de luminescência. **Revista Chemkeys**, n. 2, p. 1–9, 17 set. 2018.

MILLER, M. D. et al. Potential impacts of synthetic food dyes on activity and attention in children: a review of the human and animal evidence. **Environmental Health**, v. 21, n. 1, 29 abr. 2022.

BABU, R. S.; PRASANNA, K.; KUMAR, P. S. A censorious review on the role of natural lignocellulosic fiber waste as a low-cost adsorbent for removal of diverse textile industrial pollutants. **Environmental Research**, v. 215, p. 114183, dez. 2022.

EMMERSON BADARO et al. Vital Dyes in Ophthalmology: a Chemical Perspective. **Current Eye Research**, v. 39, n. 7, p. 649–658, 8 jan. 2014.

BADDAM, D. O. et al. Ophthalmic Fluorescein Angiography. **Methods in Molecular Biology**, p. 153–160, 9 dez. 2022.

BALÁŽ, P.; ALÁČOVÁ, A.; JAROSLAV BRIANČIN. Sensitivity of Freundlich equation constant $1/n$ for zinc sorption on changes induced in calcite by

mechanical activation. **Chemical Engineering Journal**, v. 114, n. 1-3, p. 115–121, 1 nov. 2005.

BARCIELA, P.; PEREZ-VAZQUEZ, A.; PRIETO, M. A. Azo dyes in the food industry: Features, classification, toxicity, alternatives, and regulation. **Food and Chemical Toxicology**, v. 178, p. 113935, 1 ago. 2023.

BATISTELA, V. R. et al. Protolytic fluorescein species evaluated using chemometry and DFT studies. **Dyes and Pigments**, v. 86, n. 1, p. 15–24, jun. 2010.

BENKHAYA, S.; M' RABET, S.; EL HARFI, A. A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 115, p. 107891, maio 2020.

DAVID; CHEN, Y.; ROLINSKI, O. J. Fluorescence. **Photonics**, p. 1–58, 23 fev. 2015.

BULLEN, J. C. et al. A Revised Pseudo-Second-Order Kinetic Model for Adsorption, Sensitive to Changes in Adsorbate and Adsorbent Concentrations. **Langmuir**, v. 37, n. 10, p. 3189–3201, 4 mar. 2021.

CARNEIRO, P. A. et al. Assessment of water contamination caused by a mutagenic textile effluent/dyehouse effluent bearing disperse dyes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 174, n. 1-3, p. 694–699, fev. 2010.

CARVALHO, A. S. DE et al. β -Carotene colouring systems based on solid lipid particles produced by hot melt dispersion. **Food Control**, v. 129, p. 108262, nov. 2021.

CHAINANI-WU, N. Safety and Anti-Inflammatory Activity of Curcumin: A Component of Tumeric (*Curcuma longa*). **The Journal of Alternative and Complementary Medicine**, v. 9, n. 1, p. 161–168, fev. 2003.

CHEN, X. et al. Isotherm models for adsorption of heavy metals from water - A review. **Chemosphere**, v. 307, p. 135545, nov. 2022.

CHENGAIHAH, B. et al. Medicinal importance of natural dyes-a review. **International Journal of PharmTech Research**, v. 2, n. 1, p. 144-154, 2010.

CHIEN, S. H.; CLAYTON, W. R. Application of Elovich Equation to the Kinetics of Phosphate Release and Sorption in Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 2, p. 265–268, mar. 1980.

CISNEIROS, D.; TAVARES, B.; COSTA, H. A utilização do ocre na pré-história da Serra da Capivara, Piauí, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, v. 17, n. 3, 2022.

CLARK, M. **Principles, processes and types of dyes**. Philadelphia: Woodhead Pub, 2011.

COOKSEY, C. J. Hematoxylin in the 21st century. **Biotechnic & Histochemistry**, v. 96, n. 3, p. 242–249, 10 jul. 2020.

J.-C. CORTÉS et al. Statistical analysis of randomized pseudo-first/second order kinetic models. Application to study the adsorption on cadmium ions onto tree fern. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 240, p. 104910–104910, 1 set. 2023.

CZECH-ZAŁUBSKA, K. et al. Dyes Used in Processed Meat Products in the Polish Market, and Their Possible Risks and Benefits for Consumer Health. **Foods**, v. 12, n. 13, p. 2610, 1 jan. 2023.

PARISA DARAEI et al. Preparation of pH-sensitive composite polyethersulfone membranes embedded by Ag(I) coordination polymer for the removal of cationic and anionic dyes. **Journal of Environmental Management**, v. 347, p. 119083–119083, 1 dez. 2023.

DAS, S. et al. Molecular Fluorescence, Phosphorescence, and Chemiluminescence Spectrometry. **Analytical Chemistry**, v. 84, n. 2, p. 597–625, 13 dez. 2011.

DE HAAN, K. et al. Deep learning-based transformation of H&E stained tissues into special stains. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, 12 ago. 2021.

DEBORD, J. et al. Yesterday, Today, and Tomorrow. Evolution of a Sleeping Beauty: The Freundlich Isotherm. **Langmuir**, v. 39, n. 8, p. 3062–3071, 16 fev. 2023.

DO, D. D. **Adsorption Analysis: Equilibria And Kinetics (With Cd Containing Computer Matlab Programs)**. [s.l.] World Scientific, 1998.

DOTTO, G. L.; MCKAY, G. Current scenario and challenges in adsorption for water treatment. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 4, p. 103988, ago. 2020.

TARUN KUMAR DUA; PAUL, P. Naturally Occurring Coloring and Flavoring Agents. **Springer eBooks**, p. 549–569, 1 jan. 2020.

DUBEY, S. K. et al. Contamination of Ground Water as a Consequence of Land Disposal of Dye Waste Mixed Sewage Effluents: A Case Study of Panipat District of Haryana, India. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 85, n. 3, p. 295–300, 28 jul. 2010.

DURAZZO, A. et al. Food dyes and health: Literature quantitative research analysis. **Measurement: Food**, v. 7, p. 100050, set. 2022.

ECHEGARAY, N. et al. Recent advancements in natural colorants and their application as coloring in food and in intelligent food packaging. **Food Chemistry**, v. 404, p. 134453, 15 mar. 2023.

HUSSAM E O. ELRASHIDY; GHADA SAMIR. Optical coherence tomography angiography in comparison with fluorescein angiography in diabetic retinopathy. **Journal of Medicine in Scientific Research**, v. 5, n. 2, p. 187–187, 1 jan. 2022.

EL-SIKAILY, Amany et al. Textile dyes xenobiotic and their harmful effect. **Nonconventional textile waste water treatment (A. El Nemr Ed.)**, Nova Science Publishers Inc., New York, USA, p. 31-64, 2012.

FADHILAH, L. et al. Water Purification Process Uses Adsorbents From Natural. **Indonesian Journal of Chemical Science and Technology (IJCST)**, v. 4, n. 1, p. 42, 30 jan. 2021.

FALCO, J. et al. Fluorescein Application in Cranial and Spinal Tumors Enhancing at Preoperative MRI and Operated With a Dedicated Filter on the Surgical Microscope: Preliminary Results in 279 Patients Enrolled in the FLUOCERTUM Prospective Study. **Frontiers in Surgery**, v. 6, 13 ago. 2019.

FOLARON, M. et al. Elucidating the kinetics of sodium fluorescein for fluorescence-guided surgery of glioma. **Journal of Neurosurgery**, v. 131, n. 3, p. 724–734, set. 2019.

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

FOO, Keng Yuen; HAMEED, Bassim H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. **Chemical engineering journal**, v. 156, n. 1, p. 2-10, 2010.

FRANZINI, A. et al. Fluorescein sodium-guided resection of a cerebellar lymphoma: case report and literature review. **British Journal of Neurosurgery**, v. 37, n. 4, p. 671–674, 25 jan. 2019.

SHABBIR, M. (ED.). **Textiles and Clothing**. [s.l.] Wiley, 2019.

GAO, A. et al. Efficient extraction of cellulose nanocrystals from waste *Calotropis gigantea* fiber by SO₄²⁻/TiO₂ nano-solid superacid catalyst combined with ball milling exfoliation. **Industrial Crops and Products**, v. 152, p. 112524–112524, 1 set. 2020.

GHAREDAGHLOO, B.; PRICE, J. S. Assessing benzene and toluene adsorption with peat depth: Implications on their fate and transport. **Environmental Pollution**, v. 274, p. 116477, abr. 2021.

GIRISH, C. R. Various isotherm models for multicomponent adsorption: a review. **Int. J. Civ. Eng. Technol**, v. 8, n. 10, p. 80-86, 2017.

GOMES, H. et al. Pinturas Rupestres: matérias-primas, técnicas e gestão do território Hugo Gomes, Pierluigi Rosina, Andrea Martins, Luiz Oosterbeek. **Estudos do Quaternário / Quaternary Studies**, n. 9, p. 45–55, 22 jun. 2013.

GORDEEVA, A. E. et al. Application of the Miles Assay to Study Microvascular Permeability in Ischemia–Reperfusion Injury of the Small Intestine. **Biophysics**, v. 64, n. 3, p. 474–479, 1 maio 2019.

GUAGLIANO, R. et al. Fluorescein Angiography–Based Diagnosis for Retinopathy of Prematurity: Expert-non Expert Comparison. **European Journal of Ophthalmology**, v. 23, n. 6, p. 881–886, 1 nov. 2013.

COSTA, R.; PAULO RANGEL RIOS; LUIZ, A. An Alternative to Avrami Equation. **Materials Research-ibero-american Journal of Materials**, v. 22, n. 5, 1 jan. 2019.

GAŁUSZKA, A.; MIGASZEWSKI, Z.; NAMIEŚNIK, J. The 12 principles of green analytical chemistry and the SIGNIFICANCE mnemonic of green analytical practices. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 50, p. 78–84, out. 2013.

HAWE, A.; SUTTER, M.; JISKOOT, W. Extrinsic Fluorescent Dyes as Tools for Protein Characterization. **Pharmaceutical Research**, v. 25, n. 7, p. 1487–1499, 3 jan. 2008.

HERRERA, M.; VIERA, I.; ROCA, M. Study of the authentic composition of the novel green foods: Food colorants and coloring foods. **Food Research International**, v. 170, p. 112974, 1 ago. 2023.

HEYNE, B.; MAUREL, V.; SCAIANO, J. C. Mechanism of action of sensors for reactive oxygen species based on fluorescein–phenol coupling: the case of 2-[6-(4'-hydroxy)phenoxy-3H-xanthen-3-on-9-yl]benzoic acid. **Organic and Biomolecular Chemistry**, v. 4, n. 5, p. 802–802, 1 jan. 2006.

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

HUNGER, K. **Industrial Dyes**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2007.

INYANG, H. I.; ONWAWOMA, A.; BAE, S. The Elovich equation as a predictor of lead and cadmium sorption rates on contaminant barrier minerals. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 124–132, 1 jan. 2016.

ISLER, E. et al. Trapeamento de LNAPL observado por meio da técnica de fluorescência induzida por laser (LIF). **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 3, p. 315–324, 18 set. 2018.

ISMAIL, M. et al. Pollution, Toxicity and Carcinogenicity of Organic Dyes and their Catalytic Bio-Remediation. **Current Pharmaceutical Design**, v. 25, n. 34, p. 3645–3663, 19 nov. 2019.

JEMUTAI-KIMOSOP, S. et al. Synthesis of mesoporous akaganeite functionalized maize cob biochar for adsorptive abatement of carbamazepine: Kinetics, isotherms, and thermodynamics. **Cleaner Materials**, v. 5, p. 100104, set. 2022.

JIA, F.; DAI, M.; YANG, B. Adsorption of Anions on Minerals. **Engineering materials**, p. 145–197, 11 out. 2020.

JIANG, M. et al. Hybrid lignin particles via ion-crosslinked for selective removal of anionic dyes from water. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 238, p. 124080–124080, 1 maio 2023.

JUNG, S. et al. pH-sensitive cellulose/chitin nanofibrillar hydrogel for dye pollutant removal. **Carbohydrate Polymers**, v. 317, p. 121090–121090, 1 out. 2023.

KARAMAN, O. et al. Xanthene dyes for cancer imaging and treatment: A material odyssey. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 475, p. 214841, 15 jan. 2023.

KHAN, M. D. et al. Current perspectives, recent advancements, and efficiencies of various dye-containing wastewater treatment technologies. **Journal of Water Process Engineering**, v. 53, p. 103579, 1 jul. 2023.

KLONIS, N.; SAWYER, W. H. Spectral properties of the prototropic forms of fluorescein in aqueous solution. **Journal of Fluorescence**, v. 6, n. 3, p. 147–157, set. 1996.

KOSMULSKI, M. pH-dependent surface charging and points of zero charge. IV. Update and new approach. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 337, n. 2, p. 439–448, set. 2009.

KUMAR, N. et al. A review on sustainable mesoporous activated carbon as adsorbent for efficient removal of hazardous dyes from industrial wastewater. **Journal of water process engineering**, v. 54, p. 104054–104054, 1 ago. 2023.

KURNIAWAN, W. et al. Utilization of first-order mass action kinetic models to elucidate the mechanism of methane fermentation of glycerol. **Biochemical Engineering Journal**, v. 200, p. 109099–109099, 1 nov. 2023.

LANDIM NEVES, M. I.; SILVA, E. K.; MEIRELES, M. A. A. Natural blue food colorants: Consumer acceptance, current alternatives, trends, challenges, and future strategies. **Trends in Food Science & Technology**, mar. 2021.

LARSEN, Michael. Ocular fluorometry methodological improvements and clinical studies--with special reference to the blood-retina barrier permeability to fluorescein and fluorescein glucuronide. **Acta ophthalmologica. Supplement**, n. 211, p. 1-52, 1993.

LEI, S. et al. Recent Advances in Croconaine Dyes for Bioimaging and Theranostics. **Bioconjugate Chemistry**, v. 31, n. 9, p. 2072–2084, 30 jul. 2020.

LICHA, K. et al. Cyanine Dyes as Contrast Agents in Biomedical Optical Imaging. **Academic Radiology**, v. 9, n. 2, p. S320–S322, 1 fev. 2002.

LIMA, É. C.; ADEBAYO, M. A.; MACHADO, F. M. Kinetic and Equilibrium Models of Adsorption. **Carbon Nanostructures**, p. 33–69, 2015.

LIMA, E. C. et al. Is one performing the treatment data of adsorption kinetics correctly? **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 2, p. 104813, 1 abr. 2021.

LIN, S.-H.; JUANG, R.-S. Adsorption of phenol and its derivatives from water using synthetic resins and low-cost natural adsorbents: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 3, p. 1336–1349, mar. 2009.

LIU, Y. Some consideration on the Langmuir isotherm equation. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 274, n. 1-3, p. 34–36, fev. 2006.

LUO, F. et al. Self-assembled TiO₂/MOF on corrugated paper as a recyclable and efficient composite for dual-channel dye removal. **Journal of Cleaner Production**, v. 422, p. 138679–138679, 1 out. 2023.

MABUZA, L.; SONNENBERG, N.; MARX-PIENAAR, N. Natural versus synthetic dyes: Consumers' understanding of apparel coloration and their willingness to adopt sustainable alternatives. **Resources, Conservation & Recycling Advances**, v. 18, p. 200146, out. 2023.

MAHMOOD, S. et al. Detoxification of azo dyes by bacterial oxidoreductase enzymes. **Critical Reviews in Biotechnology**, p. 1–13, 10 fev. 2015.

MANTON, R. N. et al. A retrospective analysis of rates of allergic reaction to Patent V blue dye used in sentinel lymph node biopsies for melanoma. 1 nov. 2021.

MARCZEWSKI, A. W. Analysis of Kinetic Langmuir Model. Part I: Integrated Kinetic Langmuir Equation (IKL): A New Complete Analytical Solution of the Langmuir Rate Equation. **Langmuir**, v. 26, n. 19, p. 15229–15238, 31 ago. 2010.

MARMOR, M. F. Fluorescein Angiography. **Archives of Ophthalmology**, v. 129, n. 7, p. 943, 1 jul. 2011.

MARTINS, G. B. C.; SUCUPIRA, R. R.; SUAREZ, P. A. Z. Chemistry and Colors. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 4, p. 1508–1534, 2015.

MCHEDLOV-PETROSSYAN, N. O. et al. New fluorescein dyes with unusual properties: Tetra- and pentanitrofluoresceins. **Journal of Molecular Liquids**, v. 367, p. 120541–120541, 1 dez. 2022.

MILLER, M. D. et al. Potential impacts of synthetic food dyes on activity and attention in children: a review of the human and animal evidence. **Environmental Health**, v. 21, n. 1, 29 abr. 2022.

MOENO-CASTILLA, C. Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials. **Carbon**, v. 42, n. 1, p. 83–94, 2004.

MURPHY, O. P. et al. A Review on the Adsorption Isotherms and Design Calculations for the Optimization of Adsorbent Mass and Contact Time. v. 8, n. 20, p. 17407–17430, 24 abr. 2023.

MUSAH, M. et al. Adsorption Kinetics and Isotherm Models: A Review. **Caliphate Journal of Science and Technology**, v. 4, n. 1, p. 20–26, 10 fev. 2022.

SOLMAZ NADIRI et al. Development of comprehensive kinetic models of ammonia/methanol ignition using Reaction Mechanism Generator (RMG). **Combustion and Flame**, v. 251, p. 112710–112710, 1 maio 2023.

NAGY, Boldizsar et al. Cadmium (II) Ions Removal from Aqueous Solutions Using Romanian Untreated fir Tree Sawdust--a Green Biosorbent. **Acta Chimica Slovenica**, v. 60, n. 2, 2013.

NARIMATSU, B. M. G. et al. CORANTES NATURAIS COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL NA INDÚSTRIA TÊXTIL. **Revista Valore**, v. 5, n. 0, p. 5030–5030, 2020.

NIKFAR, S.; JABERIDOOST, M. Dyes and Colorants. **Encyclopedia of Toxicology**, p. 252–261, 2014.

NOVAIS, C. et al. Natural Food Colorants and Preservatives: A Review, a Demand, and a Challenge. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 70, n. 9, p. 2789–2805, 24 fev. 2022.

NWOBA, E. G. et al. Microalgal Pigments: A Source of Natural Food Colors. **Microalgae Biotechnology for Food, Health and High Value Products**, p. 81–123, 2020.

OBRADOVIC, B. Guidelines for general adsorption kinetics modeling. **Chemical Industry**, v. 74, n. 1, p. 65–70, 2020.

OLIVEIRA, J. R. DE. utilização dos pigmentos naturais no ensino de artes visuais. **Revista Thema**, v. 21, n. 4, p. 1089–1096, 3 jan. 2023.

PARKER, C. A.; REES, W. T. Fluorescence spectrometry. A review. **The Analyst**, v. 87, n. 1031, p. 83, 1962.

PAVIA, D. L. et al. **Introduction to spectroscopy**. Taipei: Cengage Learning Asia Pte. Ltd, 2015.

PEREIRA, S. K. et al. A simplified modeling procedure for adsorption at varying pH conditions using the modified Langmuir–Freundlich isotherm. v. 13, n. 1, 17 dez. 2022.

PÉREZ-IBARBIA, L. et al. Safety and regulatory review of dyes commonly used as excipients in pharmaceutical and nutraceutical applications. **European Journal of Pharmaceutical Sciences: Official Journal of the European Federation for Pharmaceutical Sciences**, v. 93, p. 264–273, 10 out. 2016.

HEINZ-HELMUT PERKAMPUS. **Uv-vis spectroscopy and its applications**. [s.l.] Springer-Verlag Berlin An, 2012.

PICOLLO, M.; ACETO, M.; VITORINO, T. UV-Vis spectroscopy. **Physical Sciences Reviews**, v. 4, n. 4, 14 nov. 2018.

PLATER, M. J. The Synthesis of Mauveine a and Mauveine B from *N-tert-butyl-p-toluidine*. **Journal of Chemical Research**, v. 38, n. 3, p. 163–168, mar. 2014.

POURHAKKAK, P. et al. Fundamentals of adsorption technology. **Interface Science and Technology**, p. 1–70, 2021.

QIU, H. et al. Critical review in adsorption kinetic models. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE A**, v. 10, n. 5, p. 716–724, maio 2009.

RAHMAN, H. UTILIZATION OF EOSIN DYE AS AN ION PAIRING AGENT FOR DETERMINATION OF PHARMACEUTICALS: A BRIEF REVIEW. **International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences**, v. 9, n. 12, p. 1, 1 dez. 2017.

RAKIĆ, V. et al. The adsorption of salicylic acid, acetylsalicylic acid and atenolol from aqueous solutions onto natural zeolites and clays: Clinoptilolite, bentonite and kaolin. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 166, p. 185–194, jan. 2013.

R RODRÍGUEZ-MENA, A. et al. Coloring potential of anthocyanins from purple sweet potato paste: Ultrasound-assisted extraction, enzymatic activity, color and its application in ice pops. **Food Chemistry Advances**, v. 3, p. 100358, 1 dez. 2023.

RUDZINSKI, W.; PLAZINSKI, W. Theoretical description of the kinetics of solute adsorption at heterogeneous solid/solution interfaces. **Applied Surface Science**, v. 253, n. 13, p. 5827–5840, abr. 2007.

SAADI, R. et al. Monolayer and multilayer adsorption isotherm models for sorption from aqueous media. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 32, n. 5, p. 787–799, 28 abr. 2015.

SABNIS, R. W. Manufacture of Dye Intermediates, Dyes, and Their Industrial Applications. **Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology**, p. 581–676, 2017.

NEGAR SADEGH et al. Synthesis of graphene@Fe₃O₄@polyaniline nanocomposite for simultaneous removal of a binary mixture of Malachite Green cationic dye and Acid Red 1 anionic dye from aqueous solutions. **Polyhedron**, v. 248, p. 116671–116671, 1 jan. 2024.

ASHIS KUMAR SAMANTA; AWWAD, N. S.; HAMED MAJDOOA ALGARNI. **Chemistry and technology of natural and synthetic dyes and pigments**. London: Intechopen, 2020.

SAMBU, S. et al. Toxicological and Teratogenic Effect of Various Food Additives: An Updated Review. **BioMed Research International**, v. 2022, p. e6829409, 24 jun. 2022.

SANTOS, M. S. V. et al. Prospecção tecnológica em bases de patentes com foco em corantes e pigmentos alimentícios obtidos de Fontes naturais. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, p. e53810313603, 26 mar. 2021.

SENESI, N.; D'ORAZIO, V. FLUORESCENCE SPECTROSCOPY. **Encyclopedia of Soils in the Environment**, p. 35–52, 2005.

SHAFQAT, M. N.; PIERZYNSKI, G. M. The Freundlich adsorption isotherm constants and prediction of phosphorus bioavailability as affected by different phosphorus sources in two Kansas soils. **Chemosphere**, v. 99, p. 72–80, mar. 2014.

SHARMA, J.; SHARMA, S.; SONI, V. Classification and impact of synthetic textile dyes on Aquatic Flora: A review. **Regional Studies in Marine Science**, v. 45, p. 101802, jun. 2021.

SHI, Y. et al. A review on selective dye adsorption by different mechanisms. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 6, p. 108639, dez. 2022.

SHIRZAD, K.; VINEY, C. A critical review on applications of the Avrami equation beyond materials science. **Journal of the Royal Society Interface**, v. 20, n. 203, 1 jun. 2023.

SILVA, T. F. Avaliação da fibra da bucha vegetal (*Luffa cylindrica*) e das folhas de taboa (*Typha angustifolia* L.) como materiais adsorventes para a remoção do agrotóxico tebuconazol de água contaminada. 18 mar. 2019.

SINGH, T. et al. Natural bio-colorant and pigments: Sources and applications in food processing. **Natural bio-colorant and pigments: Sources and applications in food processing**, v. 12, p. 100628–100628, 1 jun. 2023.

SJÖBACK, R.; NYGREN, J.; KUBISTA, M. Absorption and fluorescence properties of fluorescein. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 51, n. 6, p. L7–L21, jun. 1995.

SOHN, S.; KIM, D. Modification of Langmuir isotherm in solution systems—definition and utilization of concentration dependent factor. **Chemosphere**, v. 58, n. 1, p. 115–123, jan. 2005.

SONG, N. et al. Ferritin: A Multifunctional Nanoplatfrom for Biological Detection, Imaging Diagnosis, and Drug Delivery. **Accounts of Chemical Research**, v. 54, n. 17, p. 3313–3325, 20 ago. 2021.

SPOSITO, G. On Points of Zero Charge. **Environmental Science & Technology**, v. 32, n. 19, p. 2815–2819, 14 ago. 1998.

STICH, E. Food Color and Coloring Food. **Handbook on Natural Pigments in Food and Beverages**, p. 3–27, 2016.

ŠULEKOVÁ, M. et al. Organic Colouring Agents in the Pharmaceutical Industry. **Folia Veterinaria**, v. 61, n. 3, p. 32–46, 1 set. 2017.

W. JOHN THOMAS; CRITTENDEN, B. The development of adsorption technology. **Elsevier eBooks**, p. 1–7, 1 jan. 1998.

THI HUONG PHAM et al. Adsorption and photodegradation of micropollutant in wastewater by photocatalyst TiO₂/rice husk biochar. **Environmental Research**, v. 236, p. 116789–116789, 1 nov. 2023.

TIWARI, K. A Potential Application of Microbial Pigment: An Alternative to Synthetic Dye & Colourants. **International Journal of Current Science Research and Review**, v. 05, n. 09, 5 set. 2022.

TKACZYK, A.; MITROWSKA, K.; POSYNIAK, A. Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review. **Science of The Total Environment**, v. 717, p. 137222, maio 2020.

TONAZIO, Letícia et al. Reações adversas dos adjuvantes farmacêuticos presentes em medicamentos para uso pediátrico. **HU Revista**, v. 37, n. 1, 2011.

HAI NGUYEN TRAN et al. Critical Review and Discussion of the Nonlinear Form of Radke–Prausnitz Model in Adsorption Solid–Liquid Phases. **Journal of Environmental Engineering**, v. 149, n. 3, 1 mar. 2023.

TSANG, S. H.; SHARMA, T. Fluorescein Angiography. **Advances in Experimental Medicine and Biology**, p. 7–10, 2018.

VALENTE, J. P. S. et al. Hidrogeneofalato de potássio como molécula modelo para estudos de adsorção sobre TiO₂. **Eclética Química**, v. 27, n. 0, 2002.

VANKAR, P. S.; SHUKLA, D. Medicinal Properties of Natural Dye Plants. **Elsevier eBooks**, p. 283–347, 1 jan. 2019.

VOLLONO, L. et al. Potential of Curcumin in Skin Disorders. **Nutrients**, v. 11, n. 9, 10 set. 2019.

WAINWRIGHT, M. Dyes in the development of drugs and pharmaceuticals. **Dyes and Pigments**, v. 76, n. 3, p. 582–589, jan. 2008.

WANG, J. et al. Adsorption Process Optimization and Adsorbent Evaluation Based on Langmuir Isotherm Model. **Langmuir**, v. 39, n. 46, p. 16404–16414, 8 nov. 2023.

WANG, K. et al. Convenient preparation of activated carbon modified phosphoric acid-activated geopolymer microspheres (C@PAAGMs) for the efficient adsorption of ReO_4^- : Implications for TcO_4^- elimination. **Composites Part B: Engineering**, v. 247, p. 110296–110296, 1 dez. 2022.

WANG, L.; ZHANG, J.; WANG, A. Removal of methylene blue from aqueous solution using chitosan-g-poly(acrylic acid)/montmorillonite superadsorbent nanocomposite. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 322, n. 1-3, p. 47–53, jun. 2008.

WANG, S.; PENG, Y. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. **Chemical Engineering Journal**, v. 156, n. 1, p. 11–24, 1 jan. 2010.

AQAS, Muhammad; SHAMIM, Muhammad Shahzad. Sodium fluorescein guided resection of malignant glioma. **JPMA. The Journal of the Pakistan Medical Association**, v. 68, n. 6, p. 968-970, 2018.

WEI, K. et al. High adsorption of methyl orange by nitrogen-doped activated carbon derived from kraft lignin via self-activation. **Surfaces and Interfaces**, v. 42, p. 103484–103484, 1 nov. 2023.

WOJNOWSKI, W. et al. AGREEprep – Analytical greenness metric for sample preparation. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 149, p. 116553, abr. 2022.

WU, S. et al. Characterization of potential cellulose fiber from cattail fiber: A study on micro/nano structure and other properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 193, p. 27–37, 1 dez. 2021.

XIA, W. et al. Sustainable recycling of café waste as natural bio resource and its value adding applications in green and effective dyeing/bio finishing of textile. **Separation and Purification Technology**, v. 309, p. 123091, mar. 2023.

YAMAOKA, S. et al. Utility of Oral Fluorescein Angiography with Ultra-wide-field Imaging System for Evaluation of Various Retinal Disorders. **Retina**, v. Publish Ahead of Print, 3 nov. 2020.

YANG, F. et al. Interactions between cellulose and lignin during hydrolysis in subcritical water. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 199, p. 105943–105943, 1 ago. 2023.

YU, L. et al. A Comprehensive Review of Fluorescence Correlation Spectroscopy. **Frontiers in Physics**, v. 9, 12 abr. 2021.

ZANONI, MARIA V. BOLDRIN; YAMANAKA, HIDEKO. **Caracterização química, toxicológica, métodos de detecção e tratamento**. 2016.

O.O. ZHOKH; A.I. TRYPOLSKYI; P.E. STRIZHAK. Discrimination of a chemical kinetic mechanism for heterogeneously catalyzed reactions using intraparticle diffusion. **Chemical Engineering Journal**, v. 474, p. 145729–145729, 1 out. 2023.

ZHOU, W. et al. Fundamentals of Scanning Electron Microscopy (SEM). **Scanning Microscopy for Nanotechnology**, p. 1–40, 2006.

ZHU, S. et al. Near-infrared-II molecular dyes for cancer imaging and surgery. **Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)**, v. 31, n. 24, p. e1900321, 1 jun. 2019.

Anexo A

Código utilizado para as medidas de fluorescência utilizando o TS2561

```

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_TSL2561_U.h>

const int ledPin = 2; // Pino do LED
const int tslAddr = TSL2561_ADDR_FLOAT; // Endereço I2C do sensor
TSL2561
const float fatorCorrecao = 0.89; // Seu fator de correção
const int janelaMediaMovel = 10; // Tamanho da janela para média móvel

Adafruit_TSL2561_Unified tsl = Adafruit_TSL2561_Unified(tslAddr, 12345);

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  pinMode(ledPin, OUTPUT);

  if (!tsl.begin()) {
    Serial.println("Sensor TSL2561 não encontrado. Verifique as conexões!");
    while (1);
  }

  // Configure o ganho e o tempo de integração do sensor (ajuste conforme
  necessário)
  tsl.setGain(TSL2561_GAIN_16X); // Ganho: 16x
  tsl.setIntegrationTime(TSL2561_INTEGRATIONTIME_402MS); // Tempo de
  Integração: 402ms
}

void loop() {
  tsl.enableAutoRange(true);

  unsigned long startTime = millis();
  unsigned long elapsedTime = 0;
  float somaLuz = 0;
  int leiturasCount = 0;

```

```
// Ligue o LED enquanto as leituras estão sendo feitas
digitalWrite(ledPin, HIGH);

// Realiza leituras durante 1 minuto
while (elapsedTime < 60000) {
  // Leia apenas o valor da luz visível
  uint16_t visible, infrared;
  tsl.getLuminosity(&visible, &infrared);

  // Aplica o fator de correção
  float luzCorrigida = visible * fatorCorrecao;

  // Acumula os valores da luz para a média móvel
  somaLuz += luzCorrigida;

  // Aguarde 1000 milissegundos (1 segundo) antes de fazer a próxima leitura
  delay(1000);

  // Atualize o tempo decorrido
  elapsedTime = millis() - startTime;
  leiturasCount++;
}

// Desligue o LED após as leituras
digitalWrite(ledPin, LOW);

// Calcule a média dos valores lidos
float mediaLuz = somaLuz / leiturasCount;

// Imprima a média no monitor serial
Serial.print("Média da Luz Visível Corrigida em 1 minuto: ");
Serial.println(mediaLuz);

// Aguarde 5000 milissegundos (5 segundos) antes de iniciar a próxima
medição
delay(5000);
}
```