

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

**REMOÇÃO DE CORANTES EM EFLUENTE  
TÊXTIL UTILIZANDO BIOCARVÃO DE FOLHAS  
DE *Persea americana Mill.*: ESTUDO  
ISOTÉRMICO E COLUNA DE ADSORÇÃO**

\*Fabíola Tomassoni<sup>1</sup>  
Elisângela Edila Schneider<sup>2</sup>  
Cristiane Lisboa Giroletti<sup>1</sup>  
Maria Eliza Nagel-Hassemer<sup>1</sup>

**DYES REMOVAL IN TEXTILE EFFLUENT USING BIOCHAR  
OF *Persea americana Mill.* LEAVES: ISOTHERMAL STUDY  
AND ADSORPTION COLUMN**

Recibido el 4 de octubre de 2022. Aceptado el 1 de febrero de 2023

## Abstract

The textile industry generates large volumes of effluents with a high concentration of dyes. The treatment of these effluents with alternative adsorbents has been investigated. Preliminary studies have shown that the biochar produced with leaves of *Persea americana Mill.* was efficient in removing dyes. Thus, in a complementary way, the present work evaluated the removal efficiency of the dyes *Levafix Brilliant Red* and *Remazol Preto B 133%* in synthetic textile effluent with the new adsorbent in two stages: a) isothermal studies and b) tests in adsorption column with continuous flow. Five isothermal models were studied. The Langmuir model was the best fit for the data, with an  $R_L$  of 0.001, indicating that the adsorption is favorable. In the adsorption columns, the adsorption capacity of the dyes was  $8.71 \text{ mg.g}^{-1}$  of adsorbent. Therefore, the study demonstrated that the alternative adsorbent could be used to efficiently remove dyes in a continuous process and with reduced costs.

**Keywords:** alternative adsorbent, continuous flow adsorption column, isothermal study, *Persea americana Mill.*, synthetic textile effluent.

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil.

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil.

\*Autor correspondente: Laboratório de Reuso de Águas (LaRA), Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil. Email: [fabiola\\_tomassoni@hotmail.com](mailto:fabiola_tomassoni@hotmail.com)

## Resumo

A indústria têxtil gera grandes volumes de efluentes com alta concentração de corantes. O tratamento destes efluentes com adsorventes alternativos têm sido investigado. Estudos preliminares demonstraram que o biocarvão produzido com folhas de *Persea americana Mill.* foi eficiente na remoção de corantes. Assim, de forma complementar, o presente trabalho avaliou a eficiência de remoção dos corantes *Levafix Brilliant Red* e *Remazol Preto B* em efluente têxtil sintético com o adsorvente em duas etapas: a) estudos isotérmicos e b) ensaios em coluna de adsorção com fluxo contínuo. Cinco modelos isotérmicos foram estudados. O modelo de Langmuir foi o que melhor se ajustou aos dados, com  $R_L$  de 0.001, indicando que a adsorção é favorável. Nas colunas de adsorção, a capacidade máxima de adsorção dos corantes foi de  $8.71 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  de adsorvente. Logo, o estudo demonstrou que o adsorvente alternativo pode ser utilizado para remoção eficiente dos corantes em processo contínuo.

**Palavras-chave:** adsorvente alternativo, coluna de adsorção em fluxo contínuo, estudo isotérmico, *Persea americana Mill.*, efluente têxtil sintético.

---

## Introdução

As indústrias têxteis são uma das principais contribuintes para a economia brasileira e global. Forte gerador de empregos e grande volume de produção e exportação, o valor da produção da cadeia têxtil em 2020 foi cerca de R\$ 161 bilhões, sendo o segundo maior gerador do primeiro emprego no país (ABIT, 2022). No entanto, a contaminação das águas devido à incapacidade das indústrias têxteis de tratar adequadamente seus efluentes é um dos grandes desafios deste setor (Al-Tohamy *et al.*, 2022). Quando descartado no meio ambiente sem o devido tratamento, o efluente da indústria têxtil torna-se um poderoso poluidor representando séria ameaça à saúde humana e à segurança ambiental (Kavitha *et al.*, 2022).

Devido aos insumos químicos utilizados na fabricação, os efluentes têxteis são ricos em poluentes, principalmente os corantes, pois parte deles não se fixam na fibra durante o processo de tingimento, deixando o efluente com aspecto fortemente colorido e de difícil tratamento. Estes efluentes são bastante complexos e variam com o tipo de atividade e processo industrial (Ramos *et al.*, 2021). Efeitos deletérios causados pelas moléculas orgânicas dos corantes e seus insumos provocam poluição visual, alterações em ciclos biológicos, afetando principalmente processos de fotossíntese, penetração da radiação solar e, conseqüentemente, a solubilidade dos gases. Sua descarga nos corpos d'água potencializa os riscos à saúde das pessoas, os quais estão associados à entrada de componentes tóxicos nas cadeias alimentares de animais e seres humanos, podendo ser carcinogênicos e/ou mutagênicos (Lan *et al.*, 2022).

Em geral, os processos tradicionais de tratamento de águas residuais não podem degradar/remover a complexa estrutura molecular dos corantes, especialmente os corantes reativos, porque são muito estáveis e difíceis de biodegradar. Dependendo do processo utilizado,

seu descarte produz subprodutos mais nocivos que os poluentes originais, além de outros inconvenientes como grandes volumes de lodo poluído (Kavitha *et al.*, 2022). Portanto, a busca por tecnologias de tratamento eficazes, ecologicamente corretas e seguras, que possam remover eficientemente os poluentes e, conseqüentemente, os corantes dos efluentes têxteis, são de grande importância para a segurança ambiental (Govarthanan *et al.*, 2022).

A adsorção provou ser um dos métodos físico-químicos mais eficazes para a remoção de poluentes, alcançando altos índices de eficiência, configuração simples, facilidade de operação, baixo custo e redução considerável da formação de lodo, já que o adsorvente pode ser regenerado ou estocado em um local seco após seu uso, sem contato direto com o ambiente (Adinata *et al.*, 2007; Al-Tohamy *et al.*, 2022). Em função disto, alguns pesquisadores tem se concentrado na utilização de adsorventes de resíduos agrícolas e resíduos de biomassa, como matéria-prima de baixo custo, biodegradável e renovável (Lan *et al.*, 2022). A produção desses biocarvões resulta em produtos com valor agregado que podem resolver problemas ambientais, como acúmulo de resíduos agrícolas, poluição de água e ar, além de serem eficazes na adsorção de diversos poluentes (Wu *et al.*, 2018).

As folhas de árvores vêm se tornando alvo desta temática e são consideradas matérias-primas potencialmente promissoras para a produção de biocarvão (Garba *et al.*, 2020; Priyantha *et al.*, 2021). As folhas são constituídas basicamente por três componentes: celulose, hemicelulose e lignina (Ross e Posseti, 2018; Priyantha *et al.*, 2021). Esses compostos possuem em sua composição vários grupos funcionais, como hidroxila, carboxila, carbonila, amino, nitro, que podem ser sítios de ligação nos processos de adsorção (Bulgariu *et al.*, 2019). Entretanto, a quantidade relativa destes compostos em cada folha, pode variar em função do tipo e da espécie vegetal avaliada.

O abacateiro (*Persea americana M.*) é uma espécie nativa da América Central e México, com produção anual de 166 mil toneladas no Brasil, situando o país em sexto lugar no ranking dos maiores produtores mundiais (Fao, 2017). Estudos preliminares demonstraram que as folhas da *Persea americana M.* (abacateiro) foram utilizadas para produção de biocarvão sendo eficiente na remoção de corantes em efluente têxtil sintético (Tomassoni *et al.*, 2022). Assim, em continuidade com os estudos anteriores, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência de remoção dos corantes *Levafix Brilliant Red* e *Remazol Preto B 133%* em efluente têxtil sintético utilizando biocarvão de folhas de *Persea americana M.* em duas etapas: a) estudos isotérmicos e b) ensaios em coluna de adsorção com fluxo contínuo, afim de determinar os mecanismo de adsorção e as taxas de remoção.

## Metodologia

### Efluente têxtil sintético

A Tabela 1 apresenta a composição do efluente sintético cuja composição foi de 25% da concentração original de Mo *et al.* (2007). Os corantes têxteis utilizados para o preparo das soluções foram o *Levafix Brilliant Red* e *Remazol Preto B 133%*, e suas concentrações basearam-se na quantidade média encontrada em efluente têxtil industrial (Mo *et al.*, 2007).

**Tabela 1.** Composição do efluente têxtil sintético.

Composto	Concentração (g.L <sup>-1</sup> )
<i>Levafix Brilliant Red</i>	0.020
<i>Remazol Preto B 133%</i>	0.020
Cloreto de sódio	2.000
Álcool Polivinílico	0.125
Sulfato de sódio	0.188

Muito utilizados pela indústria têxtil, tais corantes caracterizam-se por apresentarem grupos quimicamente ativos, com alta estabilidade hidrolítica em meio neutro. Resíduos destes corantes são altamente nocivos quando presentes em qualquer organismo vivo e apresentam tempo de vida de 50 anos em ambientes aquáticos (RAMOS *et al.*, 2021).

### Preparação do adsorvente proveniente das folhas de *Persea americana M.*

O adsorvente foi preparado com folhas de *Persea americana M.* (abacateiro) de acordo com a metodologia proposta por Tomassoni *et al.* (2022). As folhas foram recolhidas após a sua queda natural, lavadas com água destilada e secas a temperatura ambiente. Posteriormente, o material permaneceu em estufa à 60 °C por 48 horas, passando a seguir por trituração e incineração à 800 °C (taxa de aquecimento de 10 °C.min<sup>-1</sup> por 1 hora). O biocarvão foi produzido sem qualquer tratamento químico e armazenado em recipiente hermético para uso posterior.

### Determinação da concentração dos corantes

A concentração dos corantes no efluente foi determinada pela lei de Lambert-Beer entre a concentração dos corantes e a leitura da absorbância no comprimento de onda de maior absorção do efluente (548 nm) no espectrofotômetro. A eficiência de remoção dos corantes (RC%) foi determinada conforme a Equação 1.

$$RC (\%) = \frac{C_{cST} - C_{cT}}{C_{cST}} \times 100$$

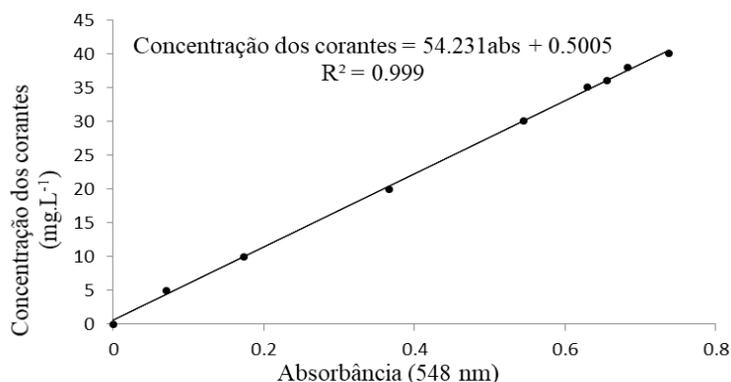
Equação (1)

Onde:

$C_{CST}$ : Valor da concentração dos corantes no comprimento de maior absorvância na região visível no efluente sem o tratamento;

$C_{CT}$ : Valor da concentração dos corantes no comprimento de maior absorvância na região visível do efluente tratado.

Através de diluições seriadas do efluente têxtil sintético, obteve-se a curva de calibração no comprimento de onda com maior absorvância (548 nm), determinada pela varredura do espectro de luz visível a fim de estipular as concentrações dos corantes no efluente. A Figura 1 apresenta a curva de calibração de Absorvância *versus* concentração dos corantes, com coeficiente de correlação de 0.999.



**Figura 1.** Curva de calibração da concentração dos corantes do efluente *versus* absorvância em 548 nm.

### Estudos das isotermas de adsorção

O estudo das isotermas de adsorção foi realizado utilizando 200 mL do efluente têxtil sintético e variação de diferentes dosagens do adsorvente produzido (2.5 a 12.5 g.L<sup>-1</sup>). Os ensaios foram efetuados com temperatura de 25 ± 1°C e velocidade de agitação de 100 rpm. O tempo de contato foi determinado pelos ensaios cinéticos de estudos anteriores com valor de 60 minutos (Tomassoni, 2019). Após, as amostras foram filtradas com membranas de acetato de celulose com porosidade de 0.45 µm. Os testes foram realizados em duplicata, totalizando 10 ensaios. Durante todo o experimento, utilizou-se um branco (amostra líquida sem o adsorvente) visando monitorar possíveis alterações intrínsecas às condições testadas.

O estudo dos dados experimentais das isotermas de adsorção é importante para a aplicação industrial do biocarvão produzido, pois fornece informações de comparação entre diferentes materiais sob a variação de volume e pressão em temperatura constante. Os modelos isotérmicos de Langmuir, Freundlich, Linear, Dubinin-Radushkevich e Temkin foram usados para estudar a adsorção dos corantes no biocarvão de folhas de *Persea americana M.*

A isoterma de Langmuir (Equação 2) assume os pressupostos de que: a adsorção ocorre em uma monocamada; e que cada sítio pode comportar apenas uma molécula adsorvida (Geremew e Zewde, 2022).

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{k_L q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

$C_e$ : Concentração final de adsorbato na solução após o equilíbrio no tempo  $t$  ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );

$q_e$ : Massa do adsorbato no adsorvente após o equilíbrio no tempo  $t$  ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ );

$k_L$ : Constante de equilíbrio de adsorção de Langmuir ( $\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$ );

$q_m$ : Capacidade máxima de adsorção ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ).

A isoterma de Freundlich (Equação 3) pode ser aplicado a sistemas não ideais, em superfícies heterogêneas e adsorção em multicamada (Febrianto, 2009; Nascimento *et al.*, 2014).

$$\log q_e = \log k_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

$k_f$ : Constante de adsorção de Freundlich ( $\text{L}\cdot\text{g}$ );

$1/n$ : Coeficiente empírico.

A Isoterma Linear (Equação 4) propõe que a massa de adsorbato retida por unidade de massa do adsorvente é proporcional à concentração de equilíbrio do adsorbato na fase líquida e está relacionado a mecanismos de fisiossorção e quimiossorção (Nascimento *et al.*, 2014).

$$q_e = k_d \cdot C_e \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

$k_d$ : Constante de distribuição ( $\text{L}\cdot\text{g}^{-1}$ ).

A isoterma de Dubinin-Radushkevich (Equação 5) é similar ao modelo de Langmuir, entretanto, não assume que a superfície é homogênea. Esse modelo considera a distribuição Gaussiana da energia e superfícies heterogêneas, aplicado para distinguir se o processo de adsorção é de natureza física ou química (Dabrowski, 2001; Fávere *et al.*, 2010; Foo e Hameed, 2010).

$$\ln q_e = \ln(q_m) - k_L \varepsilon^2 \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

$\varepsilon$ : Potencial Polanyi, obtido por  $\varepsilon = RT \ln \left( 1 + \frac{1}{C_e} \right)$ .

A isoterma de Temkin (Equação 6) leva em consideração interações adsorvente-adsorbato e a distribuição uniforme de energias de ligação, assumindo que a queda de calor de adsorção é linear com o aumento da cobertura do adsorvente e não logarítmica como demonstrado no modelo de isoterma de Freundlich (Liu *et al.*, 2014).

$$q_e = B_T \ln(A_T) + B_T \ln(C_e)$$

Ecuación (6)

Onde:

 $B_T$ : Calor de adsorção (K); $A_T$ : Constante de equilíbrio da ligação (L.mg<sup>-1</sup>).

### Ensaios de remoção em fluxo contínuo - Colunas de adsorção

Para os ensaios de adsorção foram utilizadas colunas de vidro de 80 cm de altura e 1.5 cm de diâmetro interno, preenchidas com diferentes quantidades do adsorvente em contato com água destilada por 24 horas. Para a alimentação do sistema utilizou-se uma bomba peristáltica (marca MILAN, modelo BP600/1). O empacotamento das colunas foi obtido utilizando 2 e 5 g de adsorvente. Alíquotas foram coletadas em intervalos de tempo de 10 minutos até saturação da coluna, a fim de se obter as curvas de ruptura.

Esta curva de ruptura é traçada em termos da variação da concentração relativa  $C/C_0$ , isto é, da variação da razão entre a concentração de saída do adsorbato  $C$  (mg.L<sup>-1</sup>) e a concentração de entrada do adsorbato  $C_0$  (mg.L<sup>-1</sup>) em função do tempo (Guirardello *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2003). A quantidade máxima adsorvida ( $q$ ) dos corantes para o adsorvente produzido pode ser calculada com a Equação 7 (Zhou *et al.*, 2004).

$$q = \frac{(t_e - \int_{t_b}^{t_e} f(t) dt) Q C_0}{w}$$

Ecuación (7)

Onde:

 $Q$ : Vazão (mL.min<sup>-1</sup>); $C_0$ : Concentração dos corantes do efluente na alimentação (mg.mL<sup>-1</sup>); $W$ : Dose do adsorvente (g); $t_e - \int_{t_b}^{t_e} f(t) dt$ : Área acima da curva de ruptura até  $C/C_0$  igual a 1; $t_b$ : Tempo de avanço (min); $t_e$ : Tempo de saturação (min).

O tempo de avanço é definido como o ponto na curva em que a concentração de sorbato no efluente que sai da coluna é aproximadamente 3-5% da concentração de sorbato no afluente. A partir daí, a concentração de adsorbato no efluente aumenta gradativamente até atingir um ponto de saturação, ponto em que a concentração do efluente se iguala à concentração do afluente. (CHENY *et al.*, 2003).

### Estudo das isotermas de adsorção

A partir da curva de calibração (Figura 1), as concentrações dos corantes do efluente inicial e de equilíbrio foram determinadas para o cálculo da capacidade de adsorção no equilíbrio, conforme a Equação 8.

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{w}$$

**Equação (8)**

Onde:

$Q_e$ : Quantidade adsorvida dos corantes do efluente (mg de corantes adsorvido por g de adsorvente);

$C_o$ : Concentração inicial dos corantes ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$C_e$ : Concentração dos corantes em equilíbrio ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$w$ : Massa do adsorvente (g);

$V$ : Volume de solução (L).

## Resultados discussão

### Estudos das isotermas de adsorção

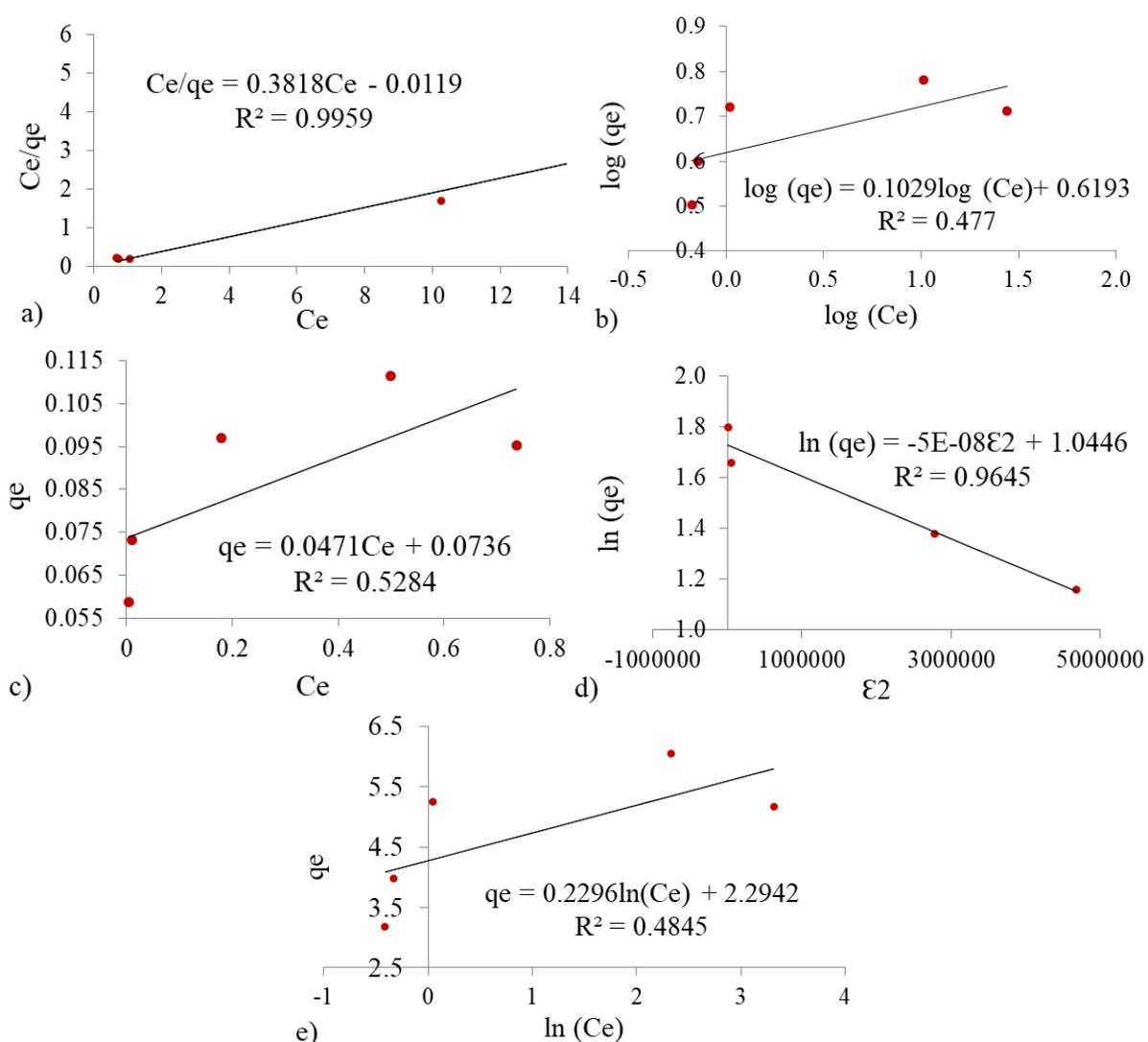
Os parâmetros isotérmicos de adsorção do adsorvente produzido,  $q_e$  e  $C_e$ , estão apresentados na Tabela 2 e foram realizados com as dosagens de adsorvente baseadas em estudos cinéticos anteriores (Tomassoni, 2019). Tais testes descrevem a relação entre a quantidade de substância adsorvida por unidade de massa do adsorvente e a concentração da substância em solução de equilíbrio, Equação 8 (Léon *et al.*, 2020). Esses dados são importantes para identificar qual a capacidade de adsorção do adsorvente, sendo útil para considerações de aumento de escala.

**Tabela 2.** Dosagem de adsorvente e parâmetros obtidos dos estudos isotérmicos, onde a concentração inicial foi de  $40 \text{ mg.L}^{-1}$  para todas as dosagens de adsorvente.

Dosagem do adsorvente ( $\text{g.L}^{-1}$ )	$C_e$ ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	$q_e$ ( $\text{mg.g}^{-1}$ )
2.5	27.56	5.16
5.0	10.26	6.04
7.5	1.04	5.25
10.0	0.71	3.97
12.5	0.66	3.18

Conforme observado na Tabela 2, a maior capacidade adsorptiva para remoção dos corantes do efluente têxtil estudado foi obtida na dosagem de  $5 \text{ g.L}^{-1}$ , com capacidade de adsorção de  $6.04 \text{ mg.g}^{-1}$ . Vários estudos têm sido realizados para a remoção de diferentes classes de corantes utilizando biomassa à base de folhas como adsorvente e resultados muito promissores têm sido obtidos. Por exemplo, folhas de *Azadirachta indica* (Neem) foram utilizadas na adsorção do corante *Violeta de Coomassie*, no qual obteve remoção de 93% do poluente (Divya *et al.*, 2020). O pó de folhas de *Posidonia oceanica* (L.) teve remoção de 33% do corante *Azul de Metileno* (Cavas *et al.*, 2011). Estes resultados comprovam à forte interação dos corantes com os grupos funcionais presentes nas folhas (Bulgariu *et al.*, 2019).

Os dados da Tabela 2 foram utilizados para verificar a adequação aos modelos de isoterma de adsorção, cujos resultados estão apresentados na Figura 2 para os seguintes modelos: a) Langmuir, b) Freundlich, c) Linear, d) Dubinin-Radushkevich e e) Temkin, juntamente com as equações de ajustes e respectivos coeficientes de correlação ( $R^2$ ). A validade de cada modelo foi avaliada de acordo com o valor de  $R^2$ , sendo que quanto mais próximo de 1, melhor o ajuste dos valores ao modelo aplicado.



**Figura 2.** Ajuste dos dados experimentais aos modelos de isotermas de adsorção de: a) Langmuir, b) Freundlich, c) Linear, d) Dubinin-Radushkevich, e e) Temkin.

Conforme podemos observar pela Figura 2, o valor do coeficiente de correlação encontrado na isoterma de Langmuir foi de 0.995 (Figura 2 a), obtendo melhor ajuste se comparada aos outros modelos estudados. Desta forma, a isoterma de Langmuir permite supor que a superfície do adsorvente produzido possui sítios energéticos idênticos e que cada molécula do adsorbato ocupa um único sítio, formando uma monocamada de cobertura de adsorbato na superfície do adsorvente (Nascimento *et al.*, 2014; Geremew e Zewde, 2022). No modelo de Langmuir, o sistema é implicitamente considerado ideal, reversível, e a energia de uma entidade adsorvida é a mesma em todos os locais da superfície, independente da presença ou ausência de outras entidades adsorvidas em locais adjacentes, ou seja, o adsorvido sem interação entre as moléculas (Bharali e Bhattacharryya, 2015).

Por meio da constante de adsorção de Langmuir ( $K_L$ ) é possível calcular o fator de separação adimensional ( $R_L$ ), o qual indica o grau de desenvolvimento do processo de adsorção e é obtido através da Equação 9.

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_o}$$

Equação (9)

**Tabela 3.** Parâmetros isotérmicos característicos e coeficientes de correlação.

LANGMUIR	
$Ce/qe = 0.3818Ce - 0.0119$	
$R^2$	0.995
$K_L$ (L.mg <sup>-1</sup> )	-32.086
$q_m$ (mg.g <sup>-1</sup> )	2.619
FREUNDLICH	
$\log(qe) = 0.1029 \log(Ce) + 0.3492$	
$R^2$	0.477
$K_F$ (L.g)	2.234
$N$	9.718
LINEAR	
$qe = 0.0471Ce + 1.9847$	
$R^2$	0.528
$K_d$ (L.g <sup>-1</sup> )	0.047
DUBININ – RADUSHKEVICH	
$\ln(qe) = -5 \text{ EXP-08 } \epsilon^2 + 1.0446$	
$R^2$	0.937
$K_L \epsilon$	5 EXP-08
$q_m$ (mg.g <sup>-1</sup> )	2.842
TEMKIN	
$qe = -0.2296 \ln(Ce) + 2.2942$	
$R^2$	0.964
$B_T$ (L.mg <sup>-1</sup> )	-0.229
$A_T$ (L.mg <sup>-1</sup> )	4.45 EXP-05

Portanto, se o valor de RL estiver entre  $0 < RL < 1$ , o adsorvato irá preferir permanecer na fase sólida ao invés da fase líquida, então a adsorção é favorável. Quando  $RL > 1$ , o soluto irá preferir permanecer na fase líquida e a adsorção é desfavorável (Geremew e Zewde, 2022). O valor de RL encontrado neste estudo foi de 0,001, o que pode ser classificado como favorável, indicando que os corantes estudados preferem a fase sólida do sorvente à fase líquida.

Na Tabela 3 estão sumarizados os parâmetros isotérmicos de adsorção dos cinco modelos avaliados. No estudo de Divya *et al.* (2020), a remoção de corante *Violeta de Coomassie* pelo adsorvente proveniente da folha de *Azadirachta indica* (Neem) também se adequou ao modelo de Langmuir. O mesmo foi observado nos estudos de Meghana *et al.* (2020) utilizando adsorvente proveniente de folhas de *Nelumbo nucifera* (Lótus) na remoção do corante *Vermelho do Congo*.

#### Ensaio de remoção em contínuo - Colunas de adsorção

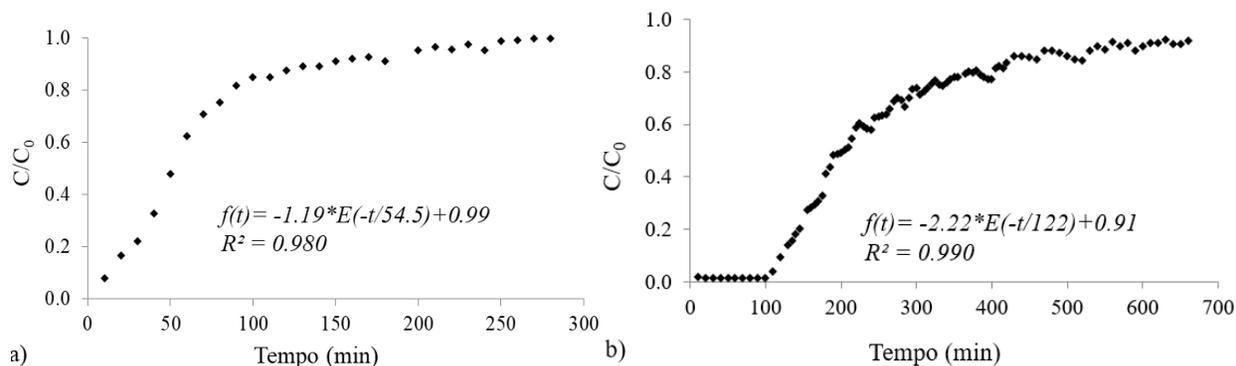
Dois experimentos de remoção de corante foram realizados sob fluxo contínuo através de uma coluna contendo o sorvente compactado. O tempo de retenção hidráulica (TDH) de 20 minutos para o primeiro teste foi escolhido com base nos resultados de um estudo cinético em lote realizado anteriormente (Tomassoni, 2019). Com base neste valor, calcula-se que o TDH na coluna deve ser menor ou igual ao valor medido. As colunas para o sorvente produzido foram então empacotadas de acordo com os parâmetros experimentais mostrados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Parâmetros calculados para o experimento de adsorção em coluna de fluxo contínuo para o adsorvente produzido

	Coluna 1	Coluna 2
Massa do adsorvente (g)	2.0	5.0
Taxa ( $m^3.m^{-2}.h^{-1}$ )	1.6	1.5
Vazão ( $mL.min^{-1}$ )	4.6	4.4
TDH (min)	2.0	5.0
Volume do adsorvente ( $cm^3$ )	7.8	22.3
f(t)	$-1.19*EXP(-t/54.5)+0.99$	$-2,22*EXP(-t/122)+0.91$
$t_b$ (min)	10	110
$t_e$ (min)	280	660
q ( $mg.g^{-1}$ )	5.80	8.71

Observa-se na Tabela 4 que a quantidade máxima adsorvida (q) pelo adsorvente proveniente das folhas de *Persea americana M.*, calculada pela Equação 2 através da integral da função f(t), foi de  $5.80 mg.g^{-1}$  e de  $8.71 mg.g^{-1}$ , para as doses de adsorvente de 2 g e 5 g, respectivamente. A partir dos dados obtidos experimentalmente, foi possível traçar as curvas de ruptura para o sorvente dosado em 2 g e 5 g (Fig. 3). (Figura 3). O tempo de contato para cada ensaio foi obtido até que

as curvas de rupturas da concentração de adsorbato na saída da coluna atingissem a mesma concentração de entrada ( $C/C_0 = 1$ ), ou seja, ocorre-se a saturação total do adsorvente presente na coluna.



**Figura 3.** Curvas de ruptura do adsorvente proveniente das folhas de *Persea americana M.* nas doses de adsorvente de A) 2 g; e B) 5 g.

Nas condições estudadas, os corantes foram completamente removidos durante os primeiros 10 e 110 minutos nas dosagens de adsorvente de 2 e 5 g, respectivamente. Posteriormente, a remoção dos corantes foi reduzida gradativamente até a coluna ficar saturada ( $t_e$ ) com tempo de contato de 280 minutos com dose de 2 g e em tempo de 660 minutos com dose de 5 g. Na Resolução nº 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama (2005) é estabelecido o valor do enquadramento de corpos receptores para cor verdadeira em até  $75 \text{ mg Pt.L}^{-1}$  (águas doces – classes 2 e 3). O atingimento desse parâmetro em uma coluna de adsorção com o adsorvente produzido seria garantido por um tempo de 120 minutos com 2 g de adsorvente e de 420 minutos com 5 g de adsorvente.

Alguns biocarvões produzidos com folhas de *Azadirachta indica* (Neem), folhas de *Posidonia oceanica* (L.) e folhas de *Palmyra* na adsorção de corantes, tiveram melhor desempenho em termos de capacidade de adsorção do que o biocarvão produzido neste estudo. Contudo, esses biocarvões exigiam etapas extras de preparação, utilizando de energia e custos de material mais altos (Cavas *et al.*, 2011; Divya *et al.*, 2020; Muniyandi; Govindaraj; Balji, 2021). A superioridade do biocarvão de *Persea americana M.* em relação a outros adsorventes se deve ao uso de biomassa de resíduos agrícolas facilmente acessível, além da produção simples e barata. Portanto, pelos resultados dos experimentos em fluxo contínuo pode-se concluir que houve boa capacidade de remoção dos corantes do efluente pelo adsorvente produzido, viabilizando a sua utilização em sistemas em escala industrial.

## Conclusão

A adsorção com o biocarvão de folhas de *Persea americana M.* se demonstrou um processo eficiente para descoloração de efluentes têxteis pelas altas eficiências de remoção observadas. O modelo que melhor descreveu os dados experimentais nos ensaios isotérmicos foi a isoterma de Langmuir, em que considera implicitamente que o sistema é ideal, reversível, homogêneo, não havendo interação entre as moléculas adsorvidas em cada sítio ativo da superfície.

Os resultados dos ensaios em coluna de fluxo contínuo demonstraram o potencial do biocarvão produzido como adsorvente alternativo para remoção dos corantes avaliados neste trabalho. As colunas de adsorção operaram durante 120 e 420 minutos atingindo os valores máximos permitidos na legislação para enquadramento de águas doces de classes 2 e 3 em relação à cor verdadeira (Resolução Conama 357/2005). O tempo máximo atingido até a saturação do adsorvente presente na coluna foi de 280 minutos, na dosagem de 2 g e 660 minutos, na dosagem de 5 g, com capacidade máxima de adsorção de 5.80 mg.g<sup>-1</sup> e de 8.71 mg.g<sup>-1</sup>, respectivamente.

Conclui-se que o adsorvente produzido com folhas de *Persea americana M.* pode ser utilizado para remoção eficiente dos corantes *Levafix Brilliant Red* e *Remazol Preto B 133%* em efluente têxtil, viabilizando a sua utilização em sistemas em escala industrial, além de diminuir os custos do processo de adsorção com a utilização de um resíduo como matéria-prima do adsorvente.

## Referências bibliográficas

- Adinata, D., Daud, W.M.A.W., Aroua, M.K. (2007) Preparation and characterization of activated carbon from palm shell by chemical activation with K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, *Bioresource Technology*, **98**, 145-149. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.006>
- Ahmed, M. (2017) Application of raw and activated *Phragmites australis* as potential adsorbents for wastewater treatments, *Ecological Engineering*, **102**, 262-269. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.047>
- ABIT, Associação Brasileira da Indústria Têxtil e Confecção (2022) *Perfil do Setor – Dados Gerais do setor referentes a 2022*. São Paulo. ABIT, 2022.
- Al-Tohamy, R., S.Ali, S., Li, F., Okasha, K.M., Mahmoud, Y.A.G., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., Sun, J. (2022) 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*, **231**, 113-160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>
- Bharali, R.K., Bhattacharyya, K.G. (2015) Biosorption of fluoride on Neem (*Azadirachta indica*) leaf powder, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **3**, 662-669. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.02.007>
- Bulgariu, L., Escudero, L.B., Bello, O.S., Iqbal, M., Nisar, J., Adegoke, K.A., Alakhras, F., Kornaros, M., Anastopoulos, L. (2019) The utilization of leaf-based adsorbents for dyes removal: A review, *Journal of Molecular Liquids*, **276**, 728-747. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.12.001>
- Cavas, L., Karabay, Z., Alyuruk, H., Dogan, H., Demir, G. (2011) Thomas and artificial neural network models for the fixed-bed adsorption of methylene blue by a beach waste *Posidonia oceanica* (L.) dead leaves, *Chemical Engineering Journal*, **171**, 557-562. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.04.030>

- Chen, J.P., Yoon, J.T., Yiacoumi, S. (2003) Effects of chemical and physical properties of influent on copper sorption onto activated carbon fixed-bed columns, *Carbon*, **41**, 1635-1644. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(03\)00117-9](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(03)00117-9)
- CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente (2005) *Resoluções do CONAMA: Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências, n.357, de 17/08/2005*, Brasília, SEMA.
- Dabrowski, A. (2001) Adsorption — from theory to practice, *Advances in Colloid and Interface Science*, **93**, 135-224. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(00\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00082-8)
- Divya, J.M., Palak, K., Vairavel, P. (2020) Optimization, kinetics, equilibrium isotherms, and thermodynamics studies of Coomassie violet dye adsorption using *Azadirachta indica* (Neem) leaf adsorbent, *Desalination and Water Treatment*, **190**, 353-382. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25706>
- Fávere, V.T., Riella, H.G., Rosa, S. (2010) Cloreto de n-(2-hidroxil) propil-3-trimetil amônio quitosana como adsorvente de corantes reativos em solução aquosa, *Química Nova*, **33**, 1476–1481. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000700010>
- Febrianto, J., Kosasih, A.N., Sunarso, J., Ju, Y., Indraswati, N., Ismadji, S. (2009) Equilibrium and kinetic studies in adsorption of heavy metals using biosorbent: a summary of recent studies, *Journal of Hazardous Materials*, **162**, 616-645. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.042>
- Foo, K., Hameed, B.H. (2010) Insights into the modeling of adsorption isotherm systems, *Chemical Engineering Journal*, **156**, 2-10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- FAO, Food and Agriculture Organization of The United Nations (2017) *Faostat. Statistics database*, 2017.
- Garba, Z.N., Lawan, I., Zhou, W., Zhang, M., Wang, L., Yuan, Z. (2020) Microcrystalline cellulose (MCC) based materials as emerging adsorbents for the removal of dyes and heavy metals – A review, *Science of The Total Environment*, **717**. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135070>
- Geremew, B., Zewde, D. (2022) *Hagenia abyssinica* leaf powder as a novel low-cost adsorbent for removal of methyl violet from aqueous solution: Optimization, isotherms, kinetics, and thermodynamic studies, *Environmental Technology & Innovation*, **28**. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102577>
- Govarthanan, M., Liang, Y., Kamala-Kannan, S., Kim, W. (2022) Eco-friendly and sustainable green nano-technologies for the mitigation of emerging environmental pollutants, *Chemosphere*, **287**. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132234>
- Guirardello, R. (2006) Removal of nickel (II) ions from aqueous solution by biosorption in a fixed bed column: Experimental and theoretical breakthrough curves, *Biochemical Engineering Journal*, **30**, 184-191. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2006.04.001>
- Kavitha, G., Kumar, J.V., Devanesan, S., Asemi, N.N., Manikandam, V., Arulmozhi, R., Abirami, N. (2022) Ceria nanoparticles anchored on graphitic oxide sheets (CeO<sub>2</sub>-GOS) as an efficient catalyst for degradation of dyes and textile effluents, *Environmental Research*, **209**. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112750>
- Lan, D., Zhu, H., Zhang, J., Li, S., Chen, Q., Wang, C., Wu, T., Xu, M. (2022) Adsorptive removal of organic dyes via porous materials for wastewater treatment in recent decades: A review on species, mechanisms and perspectives, *Chemosphere*, **293**, 133-464. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133464>
- León, V.B., Negreiros, B.A.F., Brusamarello, C.Z., Petroli, G., Domenico, M.D., Souza, F.B. (2020) Artificial neural network for prediction of color adsorption from an industrial textile effluent using modified sugarcane bagasse: Characterization, kinetics and isotherm studies, *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, **14**, 100-387. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100387>
- Liu, Y., Kang, Y., Mu, B., Wang, A. (2014) Attapulgit/bentonite interactions for methylene blue adsorption characteristics from aqueous solution, *Chemical Engineering Journal*, **237**, 403-410. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.10.048>

- Meghana, C., Juhi, B., Rampal, N., Vairavel, P. (2020) Isotherm, kinetics, process optimization and thermodynamics studies for removal of Congo red dye from aqueous solutions using *Nelumbo nucifera* (Lótus) leaf adsorbent, *Desalination and Water Treatment*, **207**, 373-397. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26389>
- Mo, J., Hwang, J.E., Jegal, J., Kim, J. Pretreatment of a dyeing wastewater using chemical coagulants. *Dyes and Pigments*, **72**, 240-245. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2005.08.022>
- Muniyandi, M., Govindaraj, P., Balji, G.B. (2021) Potential removal of Methylene Blue dye from synthetic textile effluent using activated carbon derived from Palmyra (Palm) shell, *Materialstoday: Proceedings*, **47**, 299-311. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.468>
- Nascimento, R.F., Lima, A.C.A., Vidal, C.B., Melo, D.Q., Raulino, G.S.C. (2014) *Adsorção aspectos teóricos e aplicações ambientais*. 1 ed. Fortaleza: Imprensa Universitária, 256p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4340.1041>
- Priyantha, N., Romzi, A.A., Chan, C.M., Lim, L.B.L. (2021) Enhancing adsorption of crystal violet dye through simple base modification of leaf adsorbent: isotherm, kinetics, and regeneration, *Desalination and Water Treatment*, **215**, 194-205. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26758>
- Ramos, M.D.N., Santana, C.S., Velloso, C.C.V., Silva, A.H.M., Magalhães, F., Aguiar, A. (2021) A review on the treatment of textile industry effluents through Fenton processes, *Process Safety and Environmental Protection*, **155**, 366-386. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.09.029>
- Ross, B.Z.L., Posseti, G.R.C. (2018) *Tecnologias potenciais para o saneamento: remoção de metais de águas de abastecimento público*. Curitiba: Sanepar. Disponível em: [https://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/publicacoes/livro\\_tecnologias\\_potenciais\\_vol2.pdf](https://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/publicacoes/livro_tecnologias_potenciais_vol2.pdf)
- Tomassoni, F., Schneider, E.E., Giroletti, C. L., Lobo-Recio, M.A., Nagel-Hassemer, M. E., Lapolli, F. R. (2022) A new adsorbent from avocado leaves: production, characterization, and optimization of its use, *Environmental Engineering and Management Journal*, **21**, 1835-1845. <http://doi.org/10.30638/eemj.2022.163>
- Tomassoni, F. (2019) *Remoção de cor de efluente têxtil sintético por processos de eletrocoagulação e adsorção com carvões ativados produzidos a partir de folhas de Persea americana Mill. e de Cassia fistula L.* Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 176 pp.
- Wu, L., Li, B., Liu, M. (2018) Influence of aromatic structure and substitution of carboxyl groups of aromatic acids on their sorption to biochars, *Chemosphere*, **210**, 239-246. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.003>
- Zhou, D., Zhang, L., Zhou, J., Guo, S. (2004) Development of a Fixed-Bed Column with Cellulose/Chitin Beads to Remove Heavy-Metal Ions, *Journal of Applied Polymer Science*, **94**, 684-691. <https://doi.org/10.1002/app.20946>