

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO NA REMOÇÃO DE PARACETAMOL DE ÁGUAS CONTAMINADAS COM ZEÓLITAS E CARVÃO ATIVADO DE SEMENTES DE *Moringa oleifera*

P. H. P. da Silva¹, M. R. M. Costa¹, L. F. Cusioli¹

¹Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil (pedropazim@hotmail.com)

Resumo: Este trabalho avalia a eficiência do carvão ativado de *Moringa oleifera* e zeólitas naturais na remoção de paracetamol por adsorção em batelada. Com um potencial de remoção maior (97,67%) foram realizados estudos específicos sobre o carvão, como o modelo cinético de pseudo-segunda ordem que teve melhor ajuste aos dados com um tempo de 15h para o equilíbrio, e ainda observou-se que as maiores capacidades adsorptivas ocorreram na temperatura de 45°C. Destacando o carvão como alternativa promissora para o tratamento de efluentes.

Palavras-chave: Adsorção, Carvão ativado, remoção, tratamento de efluentes e Zeólitas.

INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial à manutenção da vida e ao desenvolvimento sustentável das sociedades. Contudo, a escassez de água potável tem se intensificado nas últimas décadas, impulsionada pelo crescimento populacional, pela urbanização acelerada e pela crescente poluição dos corpos hídricos (Von Sperling, 2014). Embora cerca de 75% da superfície terrestre seja coberta por água, apenas 2,87% corresponde à água doce, sendo a maior parte dessa fração inacessível por estar presente em geleiras (78,05%) e no subsolo (21,32%) (Benedetti, 2013).

Dentre os diversos fatores que contribuem para a degradação da qualidade da água, destaca-se a presença de fármacos, considerados poluentes emergentes. Esses compostos têm sido detectados em concentrações em diferentes matrizes ambientais, como águas superficiais, subterrâneas e até mesmo em água potável. A origem predominante desses contaminantes está associada a atividades humanas, especialmente ao descarte inadequado de medicamentos e à ineficiência de estações de tratamento de esgoto (ETE) em removê-los de forma eficaz (Reis Filho et al., 2007).

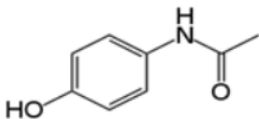
Os impactos ambientais decorrentes da presença contínua de fármacos em ecossistemas aquáticos são diversos. Dentre eles, destacam-se alterações hormonais em organismos aquáticos, desenvolvimento de resistência microbiana, toxicidade crônica em diferentes espécies e bioacumulação ao longo da cadeia trófica, além de potenciais riscos à saúde humana. Essa situação torna-se ainda mais preocupante em regiões onde a

escassez de água potável e a precariedade dos sistemas de controle de qualidade agravam os riscos à população.

Os fármacos e seus metabólitos, devido a suas características (resistência química, baixa biodegradabilidade e sua resistência microbiana), geralmente não são completamente removidos por processos convencionais de tratamento que são baseados na degradação biológica dos contaminantes (Kyzas et al. 2015). Como as eficiências das técnicas convencionais são baixas, associadas à desvantagem de produzirem lodos que podem ainda conter fármacos ou os seus metabólitos de degradação, é necessário introduzir uma etapa adicional nas ETes que seja capaz de remover de forma efetiva esses poluentes. Neste contexto, os tratamentos terciários (que compreendem as tecnologias avançadas de tratamento como a adsorção e os processos oxidativos avançados) são alternativas viáveis uma vez que visam a eliminação completa de poluentes que apresentam toxicidade.

Nesse contexto se enquadra o contaminante estudado, paracetamol, que é um dos analgésicos e antipiréticos mais populares e comumente usados em todo o mundo, disponível sem receita médica, tanto em formulações monocomponentes quanto multicomponentes (DrugBank, 2026).

Tabela 1. Informações do Fármaco estudado.

Paracetamol	
	
Fórmula molecular	C ₈ H ₉ NO ₂
Massa molar	151,1
pKa	9,5
Registro CAS	103-90-2

Fonte: DrugBank, 2026.

Diante desse cenário, faz-se necessário o desenvolvimento de tecnologias de tratamento de água que sejam ao mesmo tempo eficazes, sustentáveis e economicamente viáveis. A técnica de adsorção destaca-se como uma alternativa promissora na remoção de micropoluentes orgânicos, como os fármacos. O carvão ativado, amplamente utilizado como adsorvente, apresenta elevada eficiência devido à sua grande área superficial e estrutura porosa (Foust et al., 1982).

Nesse contexto, a utilização de resíduos vegetais como matéria-prima para a produção de carvão ativado surge como uma alternativa sustentável. As sementes da planta *Moringa oleifera* Lam. apresentam propriedades coagulantes e adsorventes, configurando-se como um material de baixo custo e elevado potencial na purificação de efluentes. Além disso, seu aproveitamento contribui para a promoção da economia circular e para a redução da dependência de recursos não renováveis.

Nesta mesma linha, alinhadas à adsorção, surgem as zeólitas, um material do tipo adsorvente, caracterizado em sua estrutura interna composta por elementos de silício (Si) e alumínio (Al) e por poros com pequenas cavidades imperfeitas e tridimensionais que favorecem as trocas de cátions entre os próprios sítios intercrystalinos e as soluções aquosas sobre as quais estes minerais estão submetidos (Magalhães, 2022).

A utilização da zeólita, é semelhante ao do carvão, simples de baixo custo de operação e implementação devido à grande quantidade de materiais disponíveis diante disso é que surge a adsorção como o objeto de estudo dos pesquisadores a fim de proporem alternativas eficientes e viáveis no tratamento das águas contaminadas com fármacos (FONSÊCA, 2020).

MATERIAL E MÉTODOS

O objetivo deste estudo foi avaliar a atividade adsorbtiva do carvão ativado produzido a partir de sementes de *Moringa oleifera* na remoção de paracetamol, analisando a influência da massa de adsorvente, do pH da solução, do tempo de contato e da temperatura do sistema. A eficiência do processo foi avaliada por meio da porcentagem de remoção e da capacidade adsorbtiva no equilíbrio (Q_e), calculadas pelas Equações (1) e (2), respectivamente.

$$\%_{\text{remoção}} = \frac{C_0 - \bar{C}_f}{C_0} \cdot 100 \quad (1)$$

$$Q_e = \frac{C_0 - \bar{C}_f}{m} \cdot V \quad (2)$$

Onde, C_0 é a concentração inicial de adsorvato, C_e (mg/L) é a concentração no equilíbrio, m é a massa de adsorvente e V o volume de solução contendo o adsorvato.

Avaliação Adsorvente

Inicialmente, foi avaliado o adsorvente mais eficiente na remoção de paracetamol, comparando-se o carvão ativado produzido a partir de sementes de *Moringa oleifera* e a zeólita natural. Aproximadamente 0,030 g de cada material foram adicionados a 0,03 L de solução de paracetamol (40mg/L) e mantidos sob agitação em shaker, à temperatura ambiente, durante 24 h. Todos os ensaios foram realizados em duplicata. Ao final, as amostras foram filtradas em membrana de acetato de celulose (0,45 μ m, Unifil) e a concentração residual de paracetamol foi determinada por espectrofotometria UV-Vis (DR 6000, HACH).

Efeito da massa de adsorvente

Após a seleção do adsorvente com melhor desempenho, foram realizados ensaios em duplicata utilizando diferentes massas de carvão ativado (0,01; 0,02; 0,03; 0,04 e 0,05 g). Cada massa foi adicionada a 0,03 L de solução de paracetamol (40mg/L). Os experimentos foram conduzidos em sistema batelada, sob agitação de 150 rpm, à temperatura ambiente, durante 24 h. Ao final dos ensaios, as amostras foram analisadas conforme o procedimento descrito anteriormente.

Efeito do pH da Solução

O efeito do pH foi avaliado em soluções ajustadas para pH 4,04; 6,75 e 10,06, utilizando HCl e NaOH 0,1 mol/L. Os ensaios foram realizados em duplicata, em sistema batelada, com 0,02 g de carvão ativado e 0,03 L de solução de paracetamol (40mg/L), sob agitação de 150 rpm, à temperatura ambiente, durante 24 h. Após o período de contato, as amostras foram

analisadas conforme o procedimento descrito anteriormente.

Cinética de Adsorção

A cinética de adsorção foi avaliada com o objetivo de determinar o tempo necessário para o estabelecimento do equilíbrio adsorptivo. Foram utilizadas amostras contendo 0,02 g de carvão ativado e 0,03 L de solução de paracetamol (40mg/L), em pH próximo da neutralidade. Os ensaios foram conduzidos em duplicata, sob agitação de 150 rpm, a 25 °C, durante 24 h. Amostras foram coletadas em diferentes intervalos de tempo para determinação da concentração residual de paracetamol.

Isotermas de Adsorção

As isotermas de adsorção foram obtidas em três temperaturas (25, 35 e 45 °C) para avaliar a influência da temperatura no equilíbrio adsorptivo. Os ensaios foram realizados em duplicata, utilizando 0,02 g de carvão ativado e 0,03 L de solução de paracetamol em diferentes concentrações iniciais. As amostras foram mantidas sob agitação de 150 rpm, em temperatura controlada, durante 15 h, tempo previamente determinado no estudo cinético. Após o período de equilíbrio, as concentrações residuais foram determinadas por espectrofotometria UV-Vis, e os dados experimentais foram ajustados aos modelos de Langmuir e Freundlich para determinação dos parâmetros de adsorção.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, foi realizada uma análise para identificar o material adsorvente mais eficiente na remoção de paracetamol. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1, permitindo a comparação do desempenho dos materiais adsorventes avaliados.

Tabela 2. Avaliação do adsorvente

Adsorvente	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	(%) remoção	Q_e (mg/g)
Carvão ativado	40	0,93	97,67	39,07
Zeólita natural		19,87	49,68	20,13

Através dos resultados analisados acima, verificou-se que o carvão ativado apresentou maior interação com o paracetamol em comparação à zeólita. Esse desempenho superior deve-se à sua elevada área superficial e estrutura altamente porosa, que favorecem a adsorção.

Para determinar a massa de adsorvente mais adequada, foram realizados experimentos variando a quantidade de carvão ativado de 0,01 a 0,05 g. Posteriormente, os resultados obtidos foram avaliados para identificar a condição que proporcionou o melhor desempenho na adsorção de paracetamol.

Tabela 3. Resultados dos testes sob influência da massa

Massa (g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	(%) remoção	Q_e (mg/g)
0,01	40	20,11	48,60	54,38
0,02		6,58	83,20	47,66
0,03		0,48	98,80	37,42
0,04		0,00	100	29,36
0,05		0,00	100	23,97

Através dos resultados observou-se que o aumento da massa de carvão ativado elevou a taxa de remoção dos contaminantes, porém reduziu a capacidade adsorptiva específica. Esse comportamento é explicado pela maior disponibilidade de sítios de adsorção no sistema, aumentando a remoção total, enquanto a quantidade adsorvida por unidade de massa de adsorvente diminui (Portinho et al., 2017; Rosset et al., 2020). Dentre as massas avaliadas, 0,02 g foi escolhida por apresentar o melhor equilíbrio entre capacidade adsorptiva e eficiência de remoção. Apesar de apresentar taxa de remoção ligeiramente inferior às massas de 0,03–0,05 g, com capacidade adsorptiva superior. Em relação à massa de 0,01 g, apresentou maior remoção, com redução pouco significativa da capacidade adsorptiva, sendo considerada a condição mais eficiente.

Em seguida, foram avaliadas diferentes condições de pH da solução, com o objetivo de verificar a influência desse parâmetro no desempenho do processo de adsorção. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 4. Resultados dos testes sob influência do pH

pH	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	(%) remoção	Q_e (mg/g)
4,00	40	3,66	90,7	53,2
6,75		1,92	95,1	54,5
10,06		5,49	86	47

Observa-se que o processo adsorptivo apresentou melhor desempenho em pH neutro, resultando nas maiores taxas de remoção. A maior capacidade de adsorção em pH neutro pode estar relacionada às interações eletrostáticas atrativas entre o fármaco,

que se encontra em forma catiônica nessa condição, e a superfície do carvão ativado, que é carregada negativamente (Haro, 2017).

Em seguida, foi realizada a análise da cinética de adsorção, com o objetivo de estimar o tempo necessário para que o sistema atingisse o equilíbrio adsorptivo. Os resultados são apresentados na Tabela 4 e na Figura 1.

Tabela 5. Dados da cinética de adsorção

Tempo (h)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	(%) remoção	Q_e (mg/g)
0,08	40	34,26	12,31	7,22
0,17		32,45	16,94	9,93
0,33		29,86	23,57	13,82
0,5		26,04	33,35	19,55
0,67		25,25	35,37	20,73
0,83		24,28	37,86	22,19
1		24,18	38,11	22,34
1,5		23,32	40,31	23,63
2		19,72	49,53	29,03
3		18,29	53,19	31,17
4		14,35	63,27	37,08
5		13,08	66,52	38,99
6		12,53	67,93	39,81
7		11,81	69,77	40,89
8		11,28	71,13	41,69
12		5,97	84,72	49,65
15		3,38	91,35	53,54
18		2,90	92,58	54,26
24		1,98	94,93	55,64

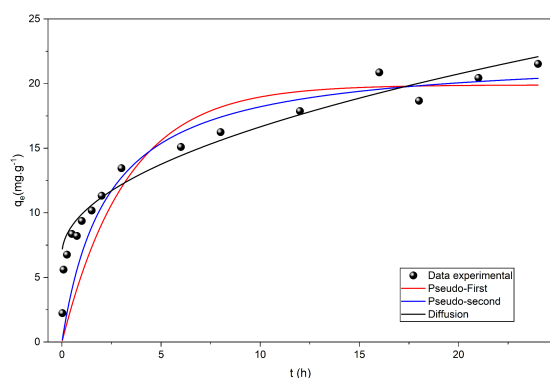


Figura 1. Cinética de adsorção.

Tabela 6. Resultados dos testes sob influência do pH

	Pseudo Primeira	Pseudo Segunda
Equação	$q_t = q_e (1 - e^{-K_1 t})$	$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t}$
k	0,549	0,012
q _e	47,292	53,969
C	-	-
R ²	0,853	0,934

A análise dos resultados demonstrou que o tempo de equilíbrio de 15 horas proporcionou elevados valores de remoção e capacidade adsorptiva, alcançando uma eficiência de remoção de 94,93% e uma capacidade de adsorção no equilíbrio (q_e) de 53,54 mg/g. Os parâmetros obtidos a partir dos ajustes estão apresentados na Tabela 5. De forma geral, todos os modelos apresentaram moderados coeficientes de determinação (R^2), indicando boa concordância com os dados experimentais. No entanto, diferenças significativas foram observadas entre os modelos quanto à capacidade de descrever o comportamento cinético do sistema. O modelo de pseudoprimeira ordem apresentou bom ajuste ($R^2=0,853$), com constante cinética $k = 0,549 \text{ min}^{-1}$ e capacidade de adsorção no equilíbrio $q_e = 47,292 \text{ mg.g}^{-1}$. Esse modelo assume que a taxa de adsorção é proporcional à quantidade de sítios livres disponíveis, sendo frequentemente associado a processos governados por interações físicas. Apesar do bom desempenho estatístico, o valor estimado de q_e é inferior ao obtido pelo modelo de pseudosegunda ordem, sugerindo que o modelo pode não representar completamente o comportamento do sistema.

Por sua vez, o modelo de pseudosegunda ordem apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais ($R^2 = 0,934$), indicando maior adequação para descrever a cinética de adsorção. A capacidade de adsorção no equilíbrio foi estimada em $q_e = 53,963 \text{ mg.g}^{-1}$, valor superior ao obtido pelo modelo de pseudoprimeira ordem, enquanto a constante cinética $k = 0,012 \text{ g.mg}^{-1}\text{min}^{-1}$ reflete uma taxa de adsorção compatível com processos envolvendo interações mais específicas entre adsorbato e adsorvente. Esses resultados sugerem que o mecanismo dominante pode estar relacionado a interações químicas ou forças específicas, como interações eletrostáticas e ligações intermoleculares, frequentemente observadas na absorção de compostos farmacêuticos.

Em seguida, foram obtidas isotermas de adsorção em diferentes temperaturas, com o objetivo de avaliar a influência da temperatura sobre o equilíbrio adsorativo e identificar o modelo matemático que melhor descreve a adsorção de paracetamol pelo carvão ativado.

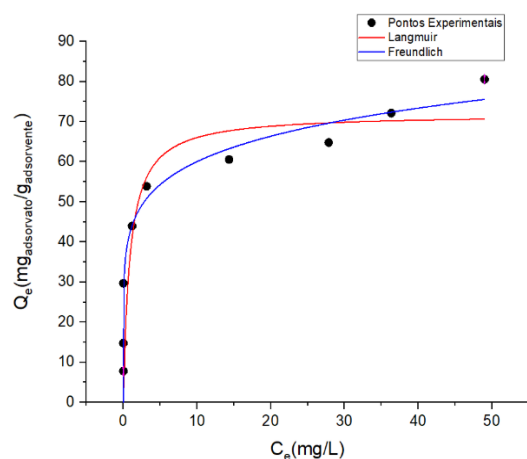


Figura 2. Isoterma de adsorção à 25°C.

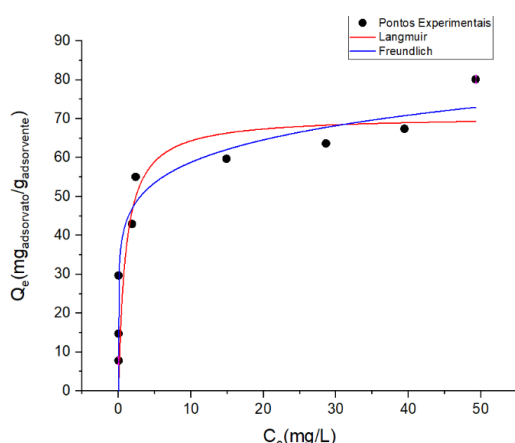


Figura 3. Isoterma de adsorção à 30°C.

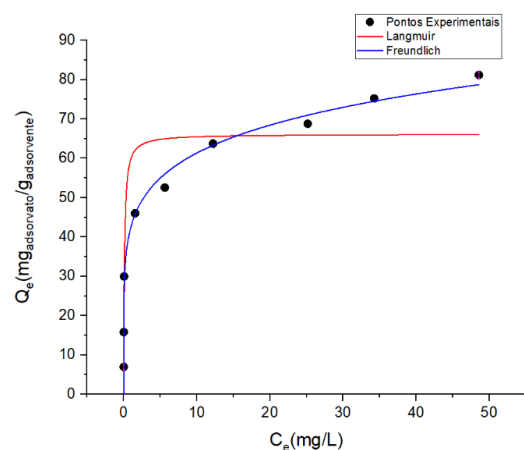


Figura 4. Isoterma de adsorção à 45°C.

Tabela 7. Parâmetros obtidos dos modelos de Freundlich

Temperatura (°C)	K_F [(mg/L) (L/g) ^{1/n}]	n	R ²
25	43,03	6,91	0,76
30	43,10	7,40	0,73
45	42,65	6,34	0,94

Tabela 8. Parâmetros obtidos dos modelos de Langmuir.

Temperatura (°C)	$Q_{máx}$ (mg/g)	K_L (L/mg)	R ²
25	71,91	1,12	0,74
30	70,7	1,00	0,72
45	66,15	9,69	0,81

Os valores de capacidade máxima de adsorção ($Q_{máx}$) variaram de 66,15 a 71,91 mg/g e apresentaram tendência de diminuição com o aumento da temperatura, indicando que a adsorção é favorecida em temperaturas mais baixas. Esse comportamento sugere um processo exotérmico. A constante de Langmuir (K_L), que representa a afinidade entre o adsorvato e os sítios ativos do adsorvente, aumentou com a temperatura para ambos os fármacos. O maior valor de K_L (9,69 L/mg) foi obtido a 45 °C, enquanto os valores em 25 °C e 30 °C foram mais próximos (1,12 e 1,00 L/mg, respectivamente), sugerindo afinidade moderada e um processo de adsorção predominantemente físico.

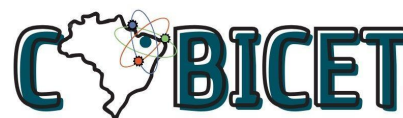
Segundo o modelo de Freundlich, os valores do parâmetro n permaneceram dentro da faixa indicativa de adsorção favorável ($1 < n < 10$). A constante K_F , associada à capacidade de adsorção, apresentou pouca variação com a temperatura, sugerindo que o sistema se manteve relativamente estável dentro do intervalo analisado.

Quanto ao ajuste dos modelos, os coeficientes de determinação (R^2) indicaram que o modelo de Freundlich apresentou melhor correlação com os dados experimentais.

CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do carvão ativado obtido a partir de *Moringa oleifera* e de Zeólitas naturais na remoção de Paracetamol em sistema adsorativo em batelada.

Os resultados demonstraram que o carvão ativado apresentou desempenho significativamente superior à



zeólita, destacando-se como o material mais promissor para aplicações em tratamentos de efluentes contendo o fármaco estudado. Com base nos testes preliminares, o carvão foi selecionado como material modelo, e, a partir de então, investigaram-se parâmetros operacionais que influenciam a adsorção.

A concentração de adsorvente de 0,67 g/L e o pH na faixa de 6 a 7 foram identificados como condições ideais para maximizar a remoção dos compostos. Junto a isso, a análise cinética trouxe que o tempo necessário para que o processo atingisse o equilíbrio adsorptivo fora de 15h e com os dados experimentais o modelo de pseudo-segunda ordem foi quem teve melhor ajuste, o que indica a presença de interações químicas no processo estudado.

A análise da influência da temperatura revelou que a melhor performance foi alcançada a 45 °C onde foram obtidos uma capacidade adsorptiva na casa de 80mg/g. Além disso, o modelo de Freundlich ajustou-se melhor aos dados experimentais, indicando um processo adsorptivo em multicamadas e em superfície heterogênea.

Esses resultados reforçam o potencial do carvão ativado de *Moringa oleifera* como alternativa sustentável e eficiente para o tratamento de águas contaminadas com fármacos.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer primeiramente a Deus, por ter nos dado força e sabedoria para chegarmos até aqui. Também gostaríamos de agradecer aos nossos familiares por todo incentivo, amor e apoio incondicional.

Agradecemos ao professor Dr. Luis Fernando Cusioli pela sua amizade, dedicação e sua orientação sobre nosso trabalho, que em todo momento se dispôs a tirar nossas dúvidas e nos ajudou a conduzi-lo. Além de disponibilizar o laboratório LGCPA e todo suporte para realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Benedetti, E. Água - Fonte da vida- Considerações. Veterinária Notícias, Uberlândia, v. 18, n. 1, p. 1-5, jan./jun. 2013.
- DrugBank online (acesso em 2026). <<https://go.drugbank.com/drugs/DB00316>>
- Fonsêca, M. C. Avaliação da Adsorção de Fármacos presentes em Amostras Aquosas usando Biocarvão de Bagaço de Cana-de-Açúcar. Araraquara-SP, p.17-22, fev. 2020.
- Foust, A. S.; Wenzel, L. A.; Clump, C. W.; Maus, L.; Andersen, L. B. Princípios das Operações Unitárias. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A., 1982.

Haro, N. K.; Remoção dos fármacos Atenolol, Paracetamol e Ampicilina por adsorção em carvão ativado. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Porto Alegre, 2017.

Kyzas, G. Z.; Koltsakidou, A.; Nanaki, S. G.; Bikiaris, D. N.; Lambropoulou, D. A. Removal of beta-blockers from aqueous media by adsorption onto graphene oxide. *Science of the Total Environment*, v. 537, p. 411-420, 2015.

Magalhães, B. S.; Pereira, G. C.; Campos, D. V. B. Quantitative analysis of ammonia adsorption using zeolites. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.8, n.5, p. 33189-33199, may., 2022.

Portinho, R., & Zanella, O. (2017). Grape stalk application for caffeine removal through adsorption. *J. Environ. Manage*, 202, 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.033>

Reis Filho, R. W.; Luvizotto-Santos, R.; Vieira, E. M. Poluentes emergentes como desreguladores endócrinos. *Journal of the Brazilian Society of Ecotoxicology*, v.2, n.3, p.283-288, 2007.

Rosset, M., Sfreddo, L. W., Perez-Lopez, O. W., & Féris, L. A. (2020). Effect of concentration in the equilibrium and kinetics of adsorption of acetylsalicylic acid on ZnAl layered double hydroxide. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 103991. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103991>

Von Sperling, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2014.