



INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO INICIAL DE AZUL DE METILENO NA ADSORÇÃO POR HIDROGÉIS SUSTENTÁVEIS DE GOMA DO CAJUEIRO E CINZA AGROINDUSTRIAL

Maria G.M. Chaves¹; Daniel S. Gonçalves¹, Francisco H.A. Rodrigues¹

¹ Universidade Estadual Vale do Acaraú - UVA.
giselemedeiros150@gmail.com

Palavras-Chave: Efluentes têxteis, Polissacarídeos, Biocompósitos.

Introdução

A crescente industrialização trouxe consigo grandes impactos ambientais, sobretudo, em efluentes, que sofrem poluição de diversas formas, sendo, dentre as mais preocupantes, contaminação por metais pesados como Cu^{2+} e Pb^{2+} , os quais são extremamente prejudiciais à saúde humana. Além disso, o descarte incorreto de corantes e outros produtos químicos provindos do tratamento industrial de tecidos, é um outro fator agravante para desequilíbrios ambientais (Piquet; Martelli, 2022; Zhao *et al*, 2023).

Entre os corantes mais utilizados industrialmente está o Azul de metileno, uma substância classificada como catiônica muito aplicada em tingir algodão, lã e seda (Piquet; Martelli, 2022). Há muitos processos, tanto físicos como químicos, que podem ser utilizados para a remoção desses compostos de corpos de água, como a oxidação, biodegradação por meio de bactérias e fungos, coagulação, floculação e adsorção (Stanciu; Teacă, 2024).

A adsorção é um dos métodos de separação e purificação mais utilizados, além do seu baixo custo, há também facilidade de execução. É um processo físico, onde o material adsorvente interage com o adsorvato por meio de grupos funcionais presentes na superfície do mesmo. Uma das características intrínsecas ao adsorvente é apresentar uma estrutura porosa, capaz de reter grandes concentrações da substância de interesse, a qual se deseja retirar do meio contaminado (Nascimento *et al*, 2014).

Atualmente, há uma ampla variedade de adsorventes de inúmeros materiais que podem remover os mais diversos contaminantes de águas residuais, entre eles, um dos mais utilizados, se encontra o carvão ativado, que apresenta alta eficiência, porém, possui um custo elevado (Stanciu; Teacă, 2024). Em contrapartida, há uma demanda por materiais que sejam de



baixo custo e principalmente compatíveis com a natureza, sendo, portanto, assim, biodegradáveis. Segundo Zhao *et al* (2023), muitos estudos sobre hidrogéis como adsorventes vêm sendo feitos, e, a maioria destes, envolvendo polissacarídeos como matriz principal, o que torna essas estruturas promissoras na aplicação de adsorventes alternativos biocompatíveis.

São variados polissacarídeos que podem ser utilizados na síntese de hidrogéis, como amido, quitosana (quitina modificada), goma de cajueiro, goma xantana, goma arábica, entre outros. A goma de cajueiro (GC), pode ser isolada e purificada posteriormente a partir de modificação química do exsudado da planta cajueiro (*Anarcadium occidentale*) como afirma Soares (2022). Por ser abundante no nordeste do Brasil, a GC é um biomaterial muito promissor e versátil em muitas aplicações, como na área biomédica na síntese de nanopartículas para liberação controlada de fármacos e, além disso, na agricultura em síntese de hidrogéis como condicionadores de solo (Almeida; Pinheiro; Abreu, 2025).

A GC contém grupos hidroxila (-OH) e carboxila (-COOH) em sua estrutura, que combinadas a um monômero sintético, como acrilamida ou ácido acrílico (AA), formam hidrogéis com capacidades absorptivas que podem auxiliar na irrigação de culturas de cacto pera espinhosa no contexto da Caatinga de acordo com estudos recentes (Barros *et al*, 2025). Além disso, a GC pode conferir biodegradabilidade e biocompatibilidade ao hidrogel, contribuindo com a sustentabilidade.

Subprodutos de rejeitos agroindustriais, como a cinza da casca do arroz, cinza do bagaço da cana de açúcar, cinza da casca do coco e cinza da casca da castanha de caju podem agregar nas propriedades de adsorção e absorção dos hidrogéis por possuírem pequenas porcentagens, em sua estrutura, de potássio (K), além de cálcio (Ca), sódio (Na) e fósforo (P) (Lima; Rossignolo, 2010).

Nesse contexto, este estudo tem como objetivo geral avaliar, sobretudo, as propriedades absorptivas e adsorptivas dos hidrogéis baseados em GC enxertados com (poli) ácido acrílico (PAA) e cinzas da casca da castanha de caju (CCCC) para remoção do corante azul de metileno de soluções aquosas, visando entender o seu comportamento em variados sistemas, dando assim um indicativo a respeito de sua aplicabilidade como adsorvente alternativo, sustentável e de baixo custo.



Material e Métodos

Materiais

O ácido acrílico e o azul de metileno (AM) procederam da Dinâmica. O persulfato de potássio (KPS) e N,N'-metilenobisacrilamida (MBA) foram fornecidos pela Sigma-Aldrich. O hidróxido de sódio (NaOH) procedeu da Neon, o ácido clorídrico (HCl) e acetona foram fornecidos pela Synth e a fenolftaleína pela Vetec,

Purificação da GC

A purificação da GC foi realizada através da metodologia proposta por Rodrigues, de Paula e Costa (1996), onde 10 g do exsudado do cajueiro previamente triturado, foi colocado para dispersar em 100 mL de água destilada por pelo menos 12 h em agitação magnética (200 rpm/ 25°C). A solução resultante foi filtrada utilizando funil de placa sinterizada (n° 1) para retirar as impurezas sólidas de tamanho maior, depois foi ajustado o pH para 7,0 utilizando NaOH 0,1 mol.L⁻¹ e foi adicionado 1,0 g de NaCl a fim de melhorar a força iônica da solução. A mesma foi precipitada em álcool etílico P.A. (1:4 v/v). O precipitado foi depois filtrado em funil de placa sinterizada (n° 3), lavado utilizando álcool etílico e acetona (ambos P.A.) três vezes. Por fim, a GC retida no filtro foi macerada e colocada em estufa para secar, depois etiquetada.

Síntese dos hidrogéis

0,5 g de GC e uma quantidade de CCCC (5-20 % m/m) foi colocada para dispersar em 20 mL de água destilada a uma temperatura de 70 °C, sob fluxo de N₂ e agitação magnética (200 rpm). 30 minutos depois, o KPS (1% m/m) foi adicionado, após dez minutos o MBA (1% m/m) foi introduzido, juntamente com 3,5 g de AA. Aproximadamente 24 h depois, os hidrogéis foram neutralizados em solução de NaOH (2 mol.L⁻¹) a 95 °C por 2 h, lavados com água destilada e secos a 70 °C em estufa. Por fim, os mesmos foram macerados até que atingissem granulometria 9-24 mesh (2,00-0,71 mm).



FTIR e DRX

Os espectros de FTIR foram obtidos em equipamento Shimadzu FTIR-8300, operando na faixa de 600-4000 cm^{-1} , em pastilha de KBr. Enquanto os padrões de DRX do pó foram registrados em um difratômetro Siemens (modelo D500, Alemanha) equipado com uma fonte Cu-K α ($\lambda = 0,15418 \text{ nm}$).

Ensaio de adsorção

Os ensaios de adsorção foram realizados pela imersão de 25 mg das amostras em 50 mL de solução de AM (100-700 mg.L^{-1}) em agitação magnética (200 rpm) por 60 minutos a 25°C e pH original da solução ($\text{pH}_i = 6,0$). As soluções resultantes foram filtradas e diluídas adequadamente, e depois analisada em espectrofotômetro UV-Vis ($\lambda_{\text{max}} = 670 \text{ nm}$) para determinar a concentração residual de AM foi utilizada a equação de uma reta adquirida a partir de uma curva analítica ($y = 0,0735x - 0,00299$, $R^2=0,9979$, sendo y a absorvância e x a concentração, respectivamente). A quantidade de adsorção no equilíbrio (Q_e) em mg/g foi calculada através da equação 1:

$$q_e = \frac{(C_o - C_{eq})V}{m} \quad (1)$$

Onde, C_o é a concentração inicial do corante (mg/L), C_{eq} é a concentração final do corante (mg/L), V é o volume da solução do corante (L) e m é a massa do hidrogel utilizado (g). Todos os ensaios foram realizados em triplicata ($N = 3$).

Resultados e Discussão

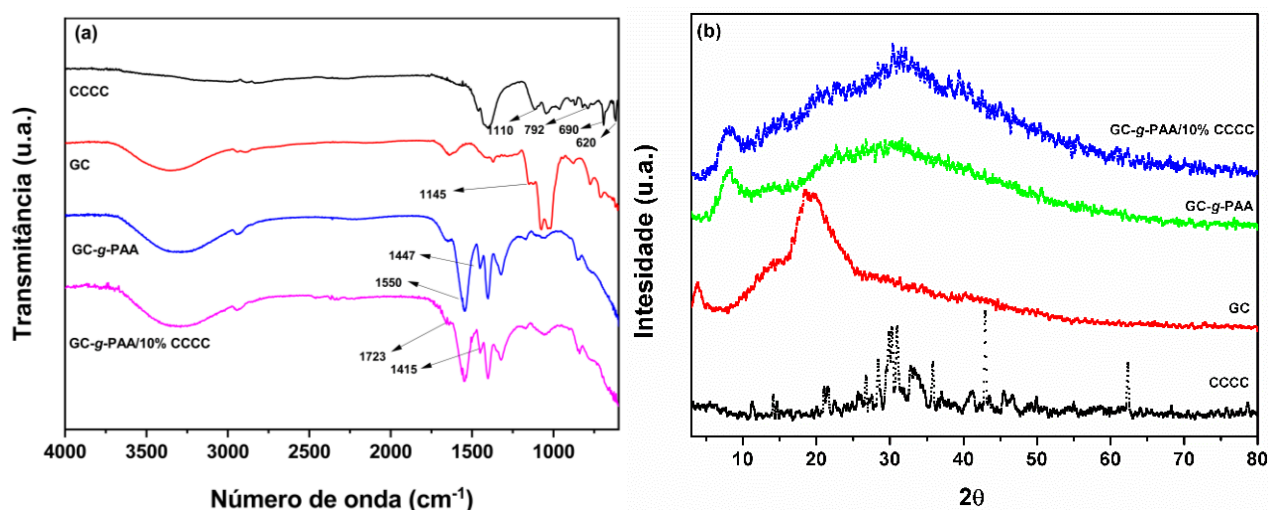
Caracterização dos hidrogéis compósitos

A Figura 1 mostra os espectros de infravermelho (FTIR) Difratometria de Raios X de CCCC, da GC e dos hidrogéis sintetizados na ausência e presença das cinzas. No espectro de FTIR (Figura 1.a) da CCCC, observam-se bandas características das ligações Si–O–Si em 1110 e 792 cm^{-1} , atribuídas aos estiramentos assimétrico e simétrico, respectivamente. Também foi identificada uma banda em 950 cm^{-1} , relacionada às ligações Si–OH. Além disso, a presença de sílica cristalina é evidenciada por uma absorção em 620 cm^{-1} , atribuída à cristobalita, e por

uma banda em torno de 690 cm^{-1} , característica do quartzo (Wanyika *et al.*, 2016; Vaz *et al.*, 2017).

A incorporação do PAA à estrutura da GC foi confirmada pela comparação dos espectros de FTIR da GC pura e do hidrogel GC-g-PAA. Em relação à GC, o hidrogel apresentou o surgimento de um ombro em 1723 cm^{-1} , atribuído ao grupo --COOH , além de bandas em 1550 , 1447 e 1415 cm^{-1} , associadas às ligações C=O do PAA, confirmando a ocorrência da reação de enxertia. A formação do hidrogel compósito GC-g-PAA/10% CCCC foi confirmada pelo aparecimento de bandas em 1110 , 797 , 690 e 620 cm^{-1} , atribuídas às vibrações das ligações Si--O--Si e à presença de SiO_2 , evidenciando a incorporação da cinza à matriz polimérica (Wanyika *et al.*, 2016; Vaz *et al.*, 2017; Anuar *et al.*, 2020).

Figura 1. (a) Espectros de FTIR de CCCC, da GC e dos hidrogéis sintetizados na ausência e presença das cinzas. (b) Difratomogramas de DRX dos hidrogéis compósitos sintetizados na ausência e presença das cinzas.



Fonte: autoria própria.

O difratograma de raios X da CCCC (Figura 1.b) apresenta um halo entre 25° e 35° (2θ), característico de material amorfo, além de fases cristalinas, com destaque para a arcanita (K_2SO_4), identificada pelo pico em $2\theta = 30,2^\circ$. Também foram identificados compostos contendo potássio (K), fósforo (P) e cálcio (Ca), principais constituintes da CCCC (Silva;

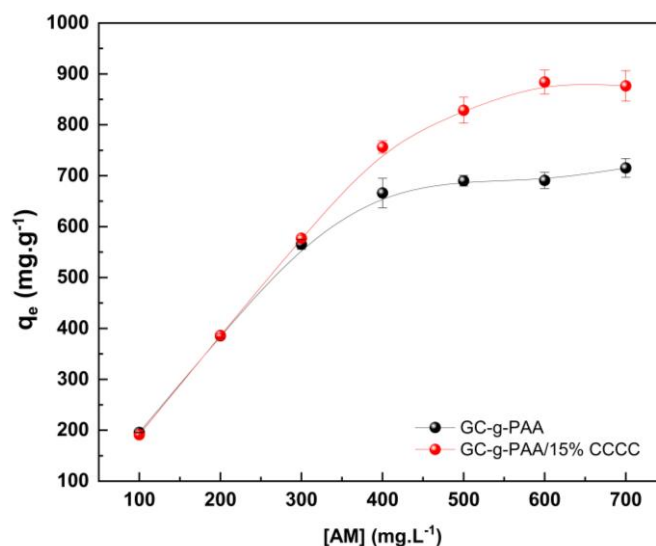
Marques; Rapôso, 2023). A GC apresentou baixa cristalinidade, característica de sua estrutura microcristalina ou semicristalina (Silva *et al.*, 2019).

O difratograma do GC-g-PAA não apresentou picos de difração definidos, indicando uma estrutura predominantemente amorfa. Já o hidrogel compósito GC-g-PAA/10% CCCC preservou as fases cristalinas características da cinza, embora com menor intensidade devido à sua baixa concentração na matriz polimérica. Em conjunto com os resultados de FTIR, a análise de DRX confirma a formação do hidrogel compósito e a incorporação da CCCC à rede polimérica.

Efeito da concentração inicial sobre a adsorção do corante

A influência da concentração inicial do corante AM sobre a capacidade de adsorção dos hidrogéis GC-g-PAA e GC-g-PAA/15% CCCC é apresentada na Figura 2.

Figura 2. Efeito da concentração inicial sobre a capacidade de adsorção de hidrogéis compósitos GC-g-PAA e GC-g-PAA/15% CCCC para o AM. Condições do experimento: pH = 5,0; T = 25±1,0°C; Tempo de equilíbrio: 60 min; Razão molar GC/PAA = 7.



Fonte: autoria própria.

Observa-se um aumento significativo na capacidade de adsorção com o aumento da concentração inicial do corante (100–500 mg·L⁻¹) para ambos os hidrogéis, variando de 195 ± 10 a 690 ± 44 mg·g⁻¹ para o GC-g-PAA e de 191 ± 1 a 813 ± 18 mg·g⁻¹ para o GC-g-PAA/15% CCCC. Entretanto, em concentrações mais elevadas do corante, verifica-se uma tendência à estabilização das curvas de adsorção. Esse comportamento pode ser atribuído ao progressivo



preenchimento dos sítios ativos dos hidrogéis pelas moléculas de AM, levando, a partir de determinado ponto, à saturação desses sítios. Nessa condição, o processo de adsorção torna-se limitado, uma vez que o aumento da concentração de adsorbato no meio não resulta em novas interações efetivas entre o corante e os centros de adsorção disponíveis. (Gautam; Rasool; Kumar, 2025).

Isotermas de adsorção

As isotermas de adsorção são modelos matemáticos que descrevem a interação entre adsorbato e adsorvente. A partir da relação entre a capacidade de adsorção no equilíbrio (q_e) e a concentração de equilíbrio (C_e), esses modelos permitem compreender o mecanismo de adsorção, indicando se o processo ocorre em superfície homogênea ou heterogênea, com formação de mono ou multicamadas, além de avaliar a favorabilidade do processo e a eficiência dos hidrogéis como adsorventes (Gautam; Rasool; Kumar, 2025; Murphy *et al.*, 2023).

O modelo de Langmuir, um dos mais utilizados para descrever isotermas de adsorção, assume que o processo ocorre em monocamada sobre uma superfície homogênea, com sítios ativos energeticamente equivalentes e interações desprezíveis entre as moléculas adsorvidas. Nesse modelo, (q_m) representa a capacidade máxima de adsorção, (C_e) a concentração de equilíbrio e (K_L) a constante de Langmuir, relacionada à afinidade entre o adsorbato e o adsorvente (Murphy *et al.*, 2023).

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{(1 + K_L C_e)} \quad (2)$$

Foi utilizada a sua forma linearizada, representada na Equação 3, sendo aplicada uma regressão linear, a fim de se obter os parâmetros q_m e K_L , a partir dos coeficientes linear ($1/K_L \cdot q_m$) e angular ($1/q_m$) da reta:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L \cdot q_m} + \frac{1}{q_m} C_e \quad (3)$$

Por outro lado, o modelo proposto por Freundlich, assume a adsorção como um processo que ocorre de maneira heterogênea, o que indica que os centros de adsorção se distribuem de forma irregular em multicamadas na área superficial do adsorvente. É importante destacar que a partir deste modelo não é possível prever um valor limite de saturação do adsorvente (Murphy *et al.*, 2023). A Equações 4 e 5 descrevem o modelo de Freundlich:



$$q_e = k_F \cdot C_e^{1/n} \quad (4)$$

$$\ln q_e = \ln k_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (5)$$

em que q_e representa a capacidade de adsorção no equilíbrio (mg.g^{-1}), C_e corresponde à concentração do adsorvato na solução em equilíbrio (mg.L^{-1}), e k_F (L.g^{-1}) e n (adimensional) são as constantes que pertencem ao modelo de Freundlich. A constante k_F está associada à capacidade de adsorção e reflete a afinidade entre o adsorvente e o adsorvato, enquanto n está relacionada à intensidade do processo adsorptivo, sendo um indicativo da distribuição energética dos sítios de adsorção, considerada favorável quando apresenta valores entre 2 e 10.

A equação (7) em sua forma linearizada pode ser ajustada aos dados experimentais através de regressão linear com a finalidade de determinar os valores das constantes k_F e n a partir dos coeficientes linear ($\ln k_F$) e angular ($1/n$) da reta.

Além disso, foi calculado o coeficiente de correlação linear (R^2) em ambos os casos, a fim de verificar se o ajuste do modelo ao conjunto de dados experimentais é aplicável e o mesmo descreve de maneira efetiva o processo de adsorção.

A partir do exposto, a Tabela 1 mostra os resultados obtidos da análise de dados:

Tabela 1. Parâmetros estimados das isotermas para a adsorção de AM.

Hidrogel	Modelo de Langmuir				Modelo de Freundlich		
	q_m, exp	q_m, cal	k_L	R^2	k_F	n	R^2
GC-g-PAA	690	704	0,0594	0,9972	0,0036	2,24	0,8114
GC-g-PAA/15% CCCC	813	832	0,0501	0,9949	0,0403	1,67	0,8468

Fonte: autoria própria.

É possível observar pelo valor de R^2 , que o modelo que se ajusta melhor ao conjunto de dados é o de Langmuir, pois o mesmo se aproxima mais de 1. Isso indica que este modelo descreve de maneira mais efetiva a interação entre o corante e o hidrogel, de modo que os sítios ativos do mesmo se distribuem uniformemente em sua superfície. Além disso, os valores de q_m teóricos se aproximam dos valores de q_m experimentais, o que evidencia um mecanismo de adsorção em monocamada para os hidrogéis GC-g-PAA e GC-g-PAA/15% CCCC. Em contrapartida, os valores das constantes e de R^2 para o modelo de Freundlich não são favoráveis para descrever o processo de adsorção para estes hidrogéis.



Conclusões

Neste trabalho, foram desenvolvidos e avaliados hidrogéis biocompósitos à base de GC enxertada com PAA e cinzas agroindustriais (CCC e CCCC), visando à remoção do corante azul de metileno em soluções aquosas. As análises de FTIR e DRX confirmaram a formação dos hidrogéis, bem como a incorporação das cinzas à matriz polimérica. Além disso, o aumento da concentração inicial do corante, no intervalo de 100 a 500 mg·L⁻¹, resultou em elevação da capacidade adsorptiva até o limite de saturação dos sítios ativos. A análise das isotermas de adsorção indicou que o modelo de Langmuir apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais.

Dessa forma, os resultados quantitativos obtidos demonstram que os hidrogéis biocompósitos estudados apresentam elevado potencial como adsorventes sustentáveis, eficientes e de baixo custo para a remoção de corantes catiônicos em sistemas aquosos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FUNCAP, CNPq pelo apoio financeiro e ao Laboratório de Polímeros e Compósitos (LAPOLICOM) pertencente a Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA) pelo suporte à pesquisa.

Referências

- ALMEIDA, J. L. I. O.; PINHEIRO, H. N.; ABREU, F. O. M. S. Avaliação da goma do cajueiro (*Anacardium occidentale*) como biocoagulante no tratamento de água. **Revista Sítio Novo**, Palmas, v. 9, p. e1808, 2025. Disponível em: <https://sitionovo.ifto.edu.br/index.php/sitionovo/article/view/1808>. Acesso em: 24 nov. 2025.
- ANUAR, M. F. *et al.* The physical and optical studies of crystalline silica derived from the green synthesis of coconut husk ash. **Applied Sciences**, v. 10, p. 2128, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10062128>. Acesso em: 30 dez. 2025.
- BARROS, D. *et al.* Cashew gum (*Anacardium occidentale*) hydrogel for sustainable irrigation of cactus pear: effects on growth, chemical composition, and mineral content. **Sustainability**, v. 17, p. 501, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su17020501>. Acesso em: 25 nov. 2025.
- GAUTAM, S.; RASOOL, T.; KUMAR, V. Hing gum-based hydrogel for effective adsorption of methylene blue and rhodamine B from wastewater: a comparative study. **Next Materials**,



v. 8, p. 100861, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.100861>. Acesso em: 13 jan. 2026.

LIMA, S. A.; ROSSIGNOLO, J. A. Estudo das características químicas e físicas da cinza da casca da castanha de caju para uso em materiais cimentícios. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 32, n. 4, p. 383–389, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v32i4.7434>. Acesso em: 16 dez. 2025.

MURPHY, O. P. *et al.* A review on the adsorption isotherms and design calculations for the optimization of adsorbent mass and contact time. **ACS Omega**, v. 8, n. 20, p. 17407–17430, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c08155>. Acesso em: 14 jan. 2026.

NASCIMENTO, R. F. do *et al.* **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. 256 p. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/10267>. Acesso em: 24 nov. 2025.

PIQUET, A. B. M.; MARTELLI, M. C. Bioadsorventes produzidos a partir de resíduos orgânicos para remoção de corantes: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, e27311326506, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26506>. Acesso em: 10 nov. 2025

RODRIGUES, J. F.; PAULA, R. C. M.; COSTA, S. M. O. Métodos de isolamento de gomas naturais: comparação através da goma do cajueiro (*Anacardium occidentale* L.). **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 1, p. 31–36, jan./mar. 1996. Disponível em: <https://www.revistapolimeros.org.br/journal/polimeros/article/5883713d7f8c9d0a0c8b47d4>. Acesso em: 22 dez. 2025.

SILVA, E. L. V. *et al.* Nanostructured polymeric system based on cashew gum for oral administration of insulin. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 3, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190003.0712>. Acesso em: 30 dez. 2025.

SILVA, M. V. P.; MARQUES, S. K. J.; RAPÔSO, A. L. Q. R. S. Estudo da aplicação das cinzas provenientes da queima da casca do coco em concretos. **Revista Principia**, v. 60, n. 4, p. 1120–1141, out. 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6543>. Acesso em: 30 set. 2025.

SOARES, J. H. da S. Hydrogels based on cashew tree gum and poly(acrylic acid) as potential water suppliers in agriculture. **Brazilian Journal of Science**, v. 1, n. 4, p. 1–17, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/bjs.v1i4.113>. Acesso em: 24 nov. 2025.

STANCIU, M. C.; TEACĂ, C. A. Natural polysaccharide-based hydrogels used for dye removal. **Gels**, v. 10, n. 4, p. 243, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/gels10040243>. Acesso em: 18 nov. 2025.

VAZ, M. G. *et al.* Methylene blue adsorption on chitosan-g-poly(acrylic acid)/rice husk ash superabsorbent composite: kinetics, equilibrium, and thermodynamics. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 228, p. 14, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-016-3185-4>. Acesso em: 30 dez. 2025.



WANYIKA, H. *et al.* Instrumental characterization of montmorillonite clays by X-ray fluorescence spectroscopy, Fourier transform infrared spectroscopy, X-ray diffraction and UV/visible spectrophotometry. **Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology**, v. 17, n. 1, p. 224–239, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.4314/jagst.v17i1>. Acesso em: 30 dez. 2025.

ZHAO, C. *et al.* Polysaccharide-based biopolymer hydrogels for heavy metal detection and adsorption. **Journal of Advanced Research**, v. 44, p. 53–70, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2023.01.008>. Acesso em: 10 nov. 2025.