



REMOÇÃO DE ANTIBIÓTICOS EM MEIO AQUOSO POR RESINAS DE TROCA IÔNICA COMERCIAIS

Milena Meireles Fernandes¹, Ismael Laurindo da Costa Junior², Renata Mello Giona³

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Brasil
(milenafernandes@alunos.utfpr.edu.br)

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Brasil

³Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Brasil

Resumo: A presença de antibióticos em águas representa risco ambiental relevante. Este estudo avaliou a remoção de seis fármacos por quatro resinas comerciais e determinou o pHPCZ dos materiais. A resina aniônica HPR4811 apresentou melhor desempenho, com remoções de até 45,2%. Os resultados indicam forte influência do pH e da especiação dos antibióticos no processo, evidenciando o potencial das resinas de troca iônica no tratamento de contaminantes emergentes.

Palavras-chave: contaminantes emergentes; adsorção; antibióticos; resinas de troca iônica

INTRODUÇÃO

A ocorrência de antibióticos em ambientes aquáticos tem sido amplamente reportada como um fator crítico para o desenvolvimento da resistência bacteriana, uma vez que a exposição contínua a baixas concentrações desses fármacos favorece a seleção de microrganismos resistentes (Castro; Castro; Lima, 2022; Ugolini *et al.*, 2025).

Esses compostos são classificados como contaminantes orgânicos emergentes (COE), sendo frequentemente detectados em águas superficiais, efluentes e solos, devido ao seu uso extensivo e à sua elevada persistência ambiental (Kuster *et al.*, 2008; Voznakova; Antao-Geraldes; Cane, 2025).

As rotas de disseminação dos antibióticos no ambiente são múltiplas e abrangem desde a indústria farmacêutica, por meio de efluentes gerados durante os processos de produção, até o descarte inadequado de medicamentos, o uso na agropecuária e o consumo humano (Muteeb *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2025; Lima; Jesus; Nogueira, 2024).

Nesse contexto, destaca-se que, após a administração, uma fração significativa dos antibióticos não é completamente metabolizada pelo organismo, sendo excretada na forma inalterada ou como metabólitos ainda biologicamente ativos (Löffler *et al.* 2023).

Esses dejetos, provenientes tanto de humanos quanto de animais, representam uma importante via de introdução contínua desses contaminantes em sistemas aquáticos e no solo, contribuindo para sua persistência ambiental e potencial impacto ecotoxicológico (Nishmitha *et al.*, 2025).

Os processos convencionais de tratamento de água apresentam limitações na remoção desses compostos, que tem impulsionado a investigação de tecnologias

alternativas, como a adsorção por resinas de troca iônica (Akhtar; Ali; Zaman, 2024). Essas resinas apresentam elevada versatilidade, seletividade e possibilidade de regeneração, sendo amplamente aplicadas em processos industriais e ambientais (Marin *et al.*, 2024).

As resinas de troca iônica destacam-se como materiais promissores para a remoção de COE, como os antibióticos, em função de suas propriedades físico-químicas e versatilidade operacional. Esses materiais apresentam elevada área superficial, estrutura porosa e grupos funcionais ativos capazes de promover interações seletivas com espécies iônicas em solução (Wang *et al.*, 2017).

Além disso, a possibilidade de regeneração e reutilização, aliada à estabilidade química e à eficiência em diferentes faixas de pH, torna essas resinas uma alternativa atrativa em comparação a outros adsorventes (Ali *et al.* 2023).

O mecanismo de troca iônica baseia-se na substituição reversível de íons presentes na estrutura da resina por íons em solução de mesma carga, podendo ocorrer por meio de resinas catiônicas ou aniônicas (Noble; Terry, 2009). Além disso, parâmetros como pH, tempo de contato e características do adsorvente influenciam significativamente o processo (Pintar; Batista; Levec, 2001).

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo explorar o desempenho de diferentes resinas comerciais na remoção de antibióticos em meio aquoso.

MATERIAL E MÉTODOS

Reagentes, padrões e soluções

Foram avaliadas quatro resinas comerciais: Amberlite XAD7HP (Supelco®) (R1), Amberlite HPR1100

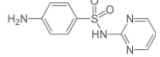
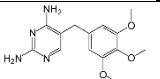
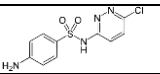
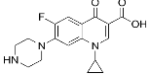
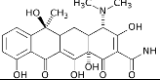
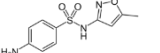
(Sigma-Aldrich®) (R2), Amberlite IRA 120 (Supelco®) (R3) e Amberlite HPR4811 (Sigma-Aldrich®) (R4), cujas principais características estão apresentadas na Tabela 1. As resinas foram previamente lavadas com água ultrapura, centrifugadas por 5 min a 2000 rpm e secas para remoção da umidade superficial.

Tabela 1. Características das resinas

Resina	Tipo	Grupo	Estrutura
XAD7HP	Adsorvente polimérico	Poliacrilato (CH ₄ H ₆ O ₂) _n	Macro porosa
HPR1100	Catiônica forte	Ácido sulfônico (-SO ₃ H)	gel
IRA 120	Catiônica forte	Ácido sulfônico (-SO ₃ H)	gel
HPR4811	Aniônica forte	Trimetil amônio (-N ⁺ (CH ₃) ₃) _n	gel

Os antibióticos avaliados foram sulfadiazina (SDZ), trimetoprim (TMT), sulfaclopiridazina (SCP), ciprofloxacina (CIP), tetraciclina (TCT) e sulfametoxazol (SMX), todos obtidos como padrões analíticos (Sigma-Aldrich®), com pureza de até 98,5%. As principais propriedades físico-químicas desses compostos estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Antibióticos avaliados

	Massa molar (g mol ⁻¹)	Fórmula molecular	Fórmula Molecular	pK _a
SDZ	250,3		C ₁₀ H ₁₀ N ₄ O ₂ S	6,6
TMT	287,7		C ₁₄ H ₁₈ N ₄ O ₃	3,2 6,8
SCP	290,3		C ₁₀ H ₉ ClN ₄ O ₂ S	1,9 5,4
CIP	331,1		C ₁₇ H ₁₈ FN ₃ O ₃	6,1 8,7
TCT	444,4		C ₂₂ H ₂₄ N ₂ O ₈	3,3 7,7 9,7
SMX	253,3		C ₁₀ H ₁₁ N ₃ O ₃ S	1,8 5,6

Foram preparadas soluções estoque na concentração de 1000 mg L⁻¹ de cada fármaco em água destilada. A partir delas foram obtidas soluções de 20 mg L⁻¹ usadas nos ensaios de remoção.

Determinação do ponto de carga zero (pH_{PCZ})

Para melhor compreensão das características superficiais das resinas, foi realizada a determinação do ponto de carga zero (pH_{PCZ}). Para isso, duplicatas contendo 0,01 g de resina foram adicionadas a tubos

tipo Falcon de 50 mL, juntamente com 25 mL de solução de cloreto de sódio 0,01 mol L⁻¹ (NaCl, Isotar®, PA 99%), previamente ajustada para valores de pH entre 2 e 11.

O ajuste do pH foi realizado com alíquotas de soluções de ácido clorídrico 0,01 mol L⁻¹ (HCl, Moderna®, PA 37%) para os valores ácidos, e hidróxido de sódio 0,01 mol L⁻¹ (NaOH, Merck®, PA 98%) para os valores básicos.

Os frascos foram agitados por 24 h em incubadora shaker (modelo SL 221, SOLAB), a 25 °C e 175 rpm. Após esse período, o pH final de cada solução foi medido em potenciômetro de bancada (Even, modelo pHS-3E). Os valores de variação entre o pH final e o pH inicial ($\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{final}} - \text{pH}_{\text{inicial}}$) foram plotados em função do pH inicial, permitindo a determinação do pH_{PCZ}.

Ensaios de remoção

Os ensaios de remoção foram realizados em batelada, de forma individual para cada antibiótico. Para isso, duplicatas contendo 0,01 g das resinas R1, R2, R3 e R4 foram adicionadas a tubos tipo Falcon de 50 mL, juntamente com 25 mL da solução de trabalho de cada fármaco, na concentração de 20 mg L⁻¹, previamente ajustada para pH 7.

Os tubos foram mantidos sob agitação por 24 h, a 25 °C e 175 rpm, em incubadora shaker (modelo SL 221, SOLAB), a fim de permitir que o sistema atingisse o equilíbrio. Após esse período, alíquotas de 5 mL do sobrenadante foram filtradas em membrana de nylon de 0,45 µm e encaminhadas para quantificação da concentração remanescente dos fármacos.

As determinações analíticas foram realizadas em espectrofotômetro de bancada UV-Vis (PerkinElmer™ LAMBDA XLS), no intervalo de 200 a 400 nm. Para cada analito, foram construídas curvas de calibração na faixa de 0,5 a 15 mg L⁻¹. A porcentagem de remoção foi calculada a partir das concentrações inicial e final dos antibióticos em solução.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Determinação do ponto de carga zero (pH_{PCZ})

A determinação do ponto de carga zero (pH_{PCZ}) das resinas foi realizada a partir da relação entre a variação de pH (ΔpH) e o pH inicial das soluções, conforme apresentado na Figura 1.

Os valores obtidos foram aproximadamente 5,4 para a resina R3 (Amberlite IRA120), 5,9 para R1 (XAD7HP), 6,0 para R2 (HPR1100) e 6,3 para R4 (HPR4811). Esses resultados indicam que todas as resinas apresentam comportamento superficial semelhante, com pH_{PCZ} próximos (5,4 a 6,3), porém

com diferenças relevantes relacionadas à sua natureza química e funcionalização.

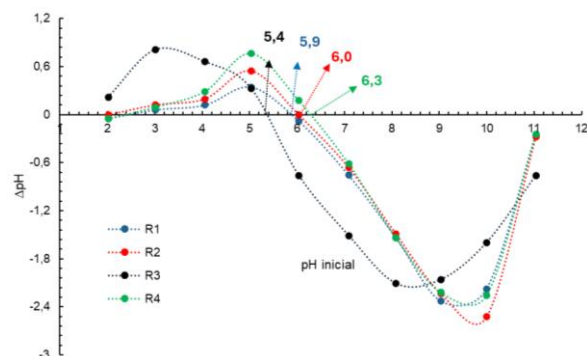


Figura 2. pH_{PCZ} das resinas

De modo geral, em valores de pH inferiores ao pH_{PCZ} , a superfície das resinas tende a apresentar carga positiva, em função da protonação dos grupos funcionais. Por outro lado, em pH superiores ao pH_{PCZ} , ocorre predominância de carga negativa, associada à desprotonação desses grupos. Esse comportamento é particularmente relevante para sistemas contendo antibióticos, uma vez que esses compostos apresentam caráter ionizável e podem existir em diferentes formas químicas dependendo do pH do meio.

A resina R3 apresentou o menor valor de pH_{PCZ} (5,4), sugerindo maior tendência à desprotonação em condições próximas ao pH neutro, o que pode influenciar negativamente sua interação com espécies aniônicas. Em contraste, a resina R4 apresentou o maior valor (6,3), indicando uma faixa mais ampla de predominância de carga positiva em pH próximos ao neutro, o que pode favorecer interações eletrostáticas com espécies carregadas negativamente.

Além disso, observa-se que as resinas catiônicas (R2 e R3), contendo grupos sulfônicos ($-SO_3H$), apresentam comportamento distinto da resina aniônica (R4), que possui grupos amônio quaternário ($-N^+(CH_3)_3$). Enquanto os grupos sulfônicos são fortemente ácidos e tendem a permanecer ionizados em ampla faixa de pH, os grupos amônio quaternário mantêm carga positiva permanente, o que pode contribuir para maior estabilidade das interações eletrostáticas com contaminantes aniônicos.

A resina XAD7HP (R1), por sua vez, apresenta caráter não iônico, sendo sua interação com os solutos predominantemente governada por forças físicas, como interações hidrofóbicas e de Van der Waals. Ainda assim, o valor de pH_{PCZ} observado sugere que sua superfície pode apresentar cargas residuais dependentes do meio, influenciando parcialmente o processo de adsorção.

Dessa forma, os resultados de pH_{PCZ} indicam que o pH do meio desempenha papel fundamental na eficiência

de remoção, uma vez que controla simultaneamente a carga superficial das resinas e a especiação química dos antibióticos. Esse fator será determinante na interpretação dos resultados de adsorção apresentados na sequência.

Desempenho das resinas na remoção de antibióticos

Os resultados de remoção dos antibióticos pelas diferentes resinas estão apresentados na Figura 2, evidenciando diferenças significativas de desempenho em função da natureza química dos materiais e dos fármacos avaliados.

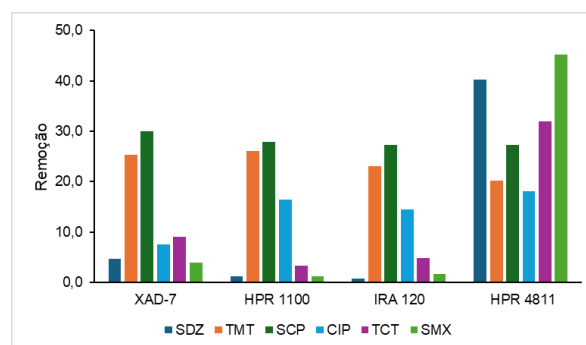


Figura 2. Remoção dos antibióticos

A resina aniônica HPR4811 (R4) apresentou o melhor desempenho global, com destaque para os antibióticos SMX (45,2%), SDZ (40,2%) e TCT (32,0%), além de remoção intermediárias para CIP (18,1%) e SCP (27,3%). Esse comportamento indica afinidade da resina por compostos com caráter aniônico ou zwitteriônico em pH neutro, condição experimental adotada (pH 7).

Em contraste, as resinas catiônicas HPR1100 (R2) e IRA120 (R3) apresentaram desempenho inferior, especialmente para SDZ (1,2% e 0,8%, respectivamente) e SMX (1,3% e 1,7%), sugerindo baixa interação com espécies predominantemente aniônicas nessas condições. Ainda assim, observou-se remoção moderada para TMT (26% e 23%) e SCP (28% e 27%), indicando que outros mecanismos, além da troca iônica, podem estar envolvidos, como interações hidrofóbicas ou difusão nos poros da resina.

A resina XAD-7 (R1), de caráter não iônico, apresentou comportamento intermediário, com destaque para SCP (30,0%) e TMT (25,3%). Esse resultado sugere que, na ausência de grupos funcionais carregados, a adsorção ocorre predominantemente por interações físicas, como forças de Van der Waals e interações hidrofóbicas, sendo mais eficiente para compostos com maior afinidade orgânica.

A superioridade da resina HPR4811 (R4) pode ser relacionada aos resultados de pH_{PCZ} previamente discutidos. Considerando que o pH experimental (pH 7) está acima do pH_{PCZ} de todas as resinas (5,4–6,3), a superfície tende a apresentar carga negativa. No entanto, a presença de grupos amônio quaternário (-



$N^+(CH_3)_3$) na estrutura da resina aniônica confere carga positiva permanente aos sítios ativos, favorecendo interações eletrostáticas com espécies aniônicas dos antibióticos.

Esse comportamento é particularmente relevante para as sulfonamidas (SDZ, SCP e SMX), que apresentam valores de pKa na faixa de 5–7, estando predominantemente na forma aniônica em pH 7. Isso explica os elevados valores de remoção observados para esses compostos na resina R4.

Por outro lado, antibióticos como CIP e TCT apresentam múltiplos valores de pKa, podendo existir como espécies zwitteriônicas. Nesses casos, a adsorção pode ocorrer por combinação de mecanismos, incluindo interações eletrostáticas, complexação e interações π - π , justificando os valores intermediários de remoção observados.

Assim, os resultados evidenciam que a eficiência do processo de remoção está associada à compatibilidade entre a carga superficial da resina e a especiação química dos antibióticos, sendo esse fator determinante para a seleção do adsorvente mais adequado.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que as resinas de troca iônica apresentam potencial para remoção de antibióticos em meio aquoso, com desempenho dependente da natureza química do material e da especiação dos fármacos. Entre as resinas avaliadas, a Amberlite HPR4811 destacou-se, apresentando as maiores eficiências de remoção para a maioria dos antibióticos testados, especialmente para as sulfonamidas.

As resinas catiônicas apresentaram menor eficiência de remoção nas condições estudadas, enquanto a resina não iônica mostrou comportamento intermediário, indicando a atuação de diferentes mecanismos de interação, como forças físicas e hidrofóbicas.

Dessa forma, o estudo permitiu identificar as resinas mais promissoras e evidenciar os principais fatores que controlam o processo de adsorção, contribuindo para o entendimento do sistema. Como perspectiva, recomenda-se a realização de estudos mais detalhados com as resinas selecionadas, incluindo avaliação do efeito do pH, modelagem de isotermas e cinética de adsorção, visando à otimização do processo e à aplicação em sistemas reais.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Araucária (Nº 576/2022 Nº MUL2022201000058) e ao Conselho Regional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq (408343/2023-0) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio

financeiro. A Central Analítica Multiusuários da UTFPR Campus Medianeira (CEANMED).

REFERÊNCIAS

- AKHTAR, M. S.; ALI, S.; ZAMAN, W. Innovative Adsorbents for Pollutant Removal: Exploring the Latest Research and Applications. *Molecules*. v. 29, n. 18, p. 4317, 2024.
- ALI, A.; SADIA, M.; AZEEM, M.; AHMAD, M. Z.; UMAR, M.; UL ABBAS, Z. Ion Exchange Resins and their Applications in Water Treatment and Pollutants Removal from Environment: A Review: Ion Exchange Resins and their Applications. *Futuristic Biotechnology*. v. 3, n. 3, p. 12–19, 2023.
- CASTRO, Í. R. R.; CASTRO, L. R.; LIMA, A. C. S. Bactérias resistentes a antibióticos em ambiente aquático: efeito na produção animal. *Ciência Animal*, v. 32, p. 84-99, 2022.
- NISHMITHA, P. S.; AKHILGHOSH, K. A.; AISWRIYA, V.P.; RAMESH, A.; MUTHUCHAMY, M.; MUTHUKUMAR, A. Understanding emerging contaminants in water and wastewater: A comprehensive review on detection, impacts, and solutions. *Journal of Hazardous Materials Advances*. V. 18, p. 100755, 2025.
- NOBLE, R. D.; TERRY, P. A. Ion exchange. In: *Principles of Chemical Separations with Environmental Applications*. Cambridge Series in Chemical Engineering. Cambridge University Press, p. 214-233, 2009.
- KUSTER, M.; ALDA, M. J. L.; HERNANDO, M. D.; PETROVIC, M.; MARTÍN-ALONSO, J.; BARCELÓ, D. Analysis and occurrence of pharmaceuticals, estrogens, progestogens and polar pesticides in sewage treatment plant effluents, river water and drinking water in the Llobregat river basin (Barcelona, Spain). *Journal of Hydrology*, v. 358, p. 12-123, 2008.
- LI, Z.; TANG, J.; WANG, X.; MA, X.; YUAN, H.; GAO, C.; GUO, Q.; GUO, X.; WAN, J.; DAGOT, C. The Environmental lifecycle of antibiotics and resistance genes: transmission mechanisms, challenges, and control strategies. *Microorganisms*. v.13, n. 9, p. 2113, 2025.
- LIMA, K. V. L.; JESUS, J. H. F.; NOGUEIRA, R. F. P. Occurrence of antibiotics in aqueous matrices: an outlook about the situation in Brazil. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 35, n. 3, p. e-20230196, 2024.
- LÖFFLER, P.; ESCHER, B. E.; BADUEL, C.; VIRTÀ, M. P.; LAI, F. Antimicrobial Transformation Products in the Aquatic



Environment: Global Occurrence, Ecotoxicological Risks, and Potential of Antibiotic Resistance. Environmental Science & Technology, v. 5, n. 26, p. 9474-9494, 2023.

MARIN, N. M.; NITA-LAZAR, M.; POPA, M.; GALAON, T.; PASCU, L. F. Current Trends in Development and Use of Polymeric Ion-Exchange Resins in Wastewater Treatment. Materials. v. 17, n. 23, p. 5994, 2024.

MUTEEB, G.; REHMAN, M. T., SHAHWAN, M.; AATIF, M. Origin of Antibiotics and Antibiotic Resistance, and Their Impacts on Drug Development: A Narrative Review. Pharmaceuticals (Basel), v.15-16, n. 11, p. 1615, 2023.

PINTAR, A.; BATISTA, J.; LEVEC, J. Integrated ion exchange/catalytic process for efficient removal of nitrates from drinking water. Chemical Engineering Science, v. 56, n. 4, p. 1551-1559, 2001.

UGOLINI, V.; KHAN, U. A.; LÖFFLER, P.; SPILSBURY, F.; LAI, F. Y.; Insight into on-site sewage facilities as an overlooked contributor to antimicrobial resistance: Environmental impacts and existing mitigation strategies, Journal of Environmental Management, v. 391, p. 126528, 2025.

VOZNAKOVA, A.; ANTAO-GERALDES, A. M.; CANLE, M. Pharmaceuticals in the Douro basin: Occurrence, distribution, and ecological risk. Journal of Environmental Chemical Engineering. v. 13, n. 6, p. 119181, 2025.

WANG, T.; PAN, X.; BEN, W.; WANG, H.; HOU, P.; QIANG, Z. Adsorptive removal of antibiotics from water using magnetic ion exchange resin. Journal of Environmental Sciences. v. 52, p. 111-117, 2017.