

Eficácia dos processos biológicos na remoção de micropoluentes emergentes

DOI: 10.5281/zenodo.17014878

Julia Ribeiro Dias^{a*}

Studies on the removal of emerging micropollutants in effluents are relatively recent in Brazil. The main sources of contamination are Wastewater Treatment Plants, as they are not designed to remove these compounds. Therefore, this article aims to analyze the effectiveness of biological processes in removing these toxic substances, which can directly impact the environment if not properly treated. Through the analysis of experimental data and literature references, it was found that the effective removal of micropollutants requires the adoption of hybrid solutions or polishing steps in order to ensure effluents with quality compatible with environmental and reuse requirements.

Os estudos sobre a remoção de micropoluentes emergentes em efluentes são recentes no Brasil. As principais fontes de contaminação são as Estações de Tratamento de Efluentes, dado que elas não são projetadas para remover esses compostos. Com isso, este artigo tem o objetivo de analisar a eficácia dos processos biológicos na remoção desses tóxicos, que podem impactar diretamente o meio ambiente se não tratados. Por meio da análise de dados experimentais e referências da literatura, verificou-se que a remoção eficaz de micropoluentes exige a adoção de soluções híbridas ou etapas de polimento, a fim de garantir efluentes com qualidade compatível com os requisitos ambientais e de reuso.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: juliariberdias@gmail.com

Palavras-chave: Estações de tratamento de esgoto; contaminantes; tratamento biológico de efluentes.

Recebido em 10 de julho de 2025,

Aprovado em 15 de agosto de 2025,

Publicado em 31 de agosto de 2025.

Introdução

Os micropoluentes emergentes são substâncias tóxicas em baixas concentrações geralmente de $\mu\text{g/L}$ a ng/L , como fármacos e hormônios (naturais e sintéticos), que podem causar sérios efeitos, como toxicidade aquática, genotoxicidade, perturbação endócrina em animais selvagens, seleção de bactérias patogênicas resistentes, além de afetar também a saúde humana se lançados inadequadamente nos corpos receptores.³ As Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) são projetadas justamente para a redução desses impactos relacionados ao lançamento de substâncias tóxicas nos corpos hídricos.¹

A grande quantidade de efluentes contaminados por metais pesados, matéria orgânica, poluentes químicos e microrganismos patogênicos, se dá por conta do crescimento exponencial das atividades industriais e da população mundial.² Felizmente, os avanços na tecnologia têm possibilitado um desenvolvimento significativo nas buscas por estratégias diversas do tratamento de esgotos, todos com o objetivo de melhorar a qualidade dos corpos hídricos no mundo todo. Ademais, pesquisas indicam que poucos micropoluentes são eliminados precisamente nos métodos de tratamento convencionais, ficando assim resíduos não tratados mesmo após o fim do tratamento.⁴ Com isso, vem a necessidade de

avaliar alternativas mais eficazes, voltadas principalmente para a remoção de compostos que oferecem riscos à saúde pública e à vida aquática.

Nesse contexto, os processos biológicos têm se destacado no Brasil, sendo as instituições públicas as principais na produção científica. Processo este dividido em aeróbios e anaeróbios, onde cada um possui suas vantagens e aplicações. O sistema aeróbio, que ocorre na presença de oxigênio com a ação de microrganismos aeróbios, é disposto como sendo de alta eficiência de remoção de nutrientes e mais rápido em algumas situações devido à eficiência das bactérias aeróbias na degradação da matéria orgânica. Apresenta uma menor produção de lodo, além de requerer uma menor energia e possibilitar a produção de biogás. A degradação dos resíduos ocorre por meio da digestão aeróbia, onde as bactérias utilizam o oxigênio para degradar a matéria orgânica presente no lodo, como representado na Equação 1.²



A matéria orgânica é transformada em CO_2 , H_2O e nitrato, e há a geração de um subproduto, o lodo. Dependendo da estrutura química do contaminante e da comunidade microbiana presente, essa via metabólica favorece a remoção também de micropoluentes. Dentre os principais sistemas de

tratamento aeróbio, estão os de lodos ativados, de lagoas aeróbias e de filtros biológicos aeróbios.¹

No processo anaeróbio são utilizadas bactérias que não precisam de oxigênio para a respiração e consiste na degradação da matéria orgânica em gás carbônico, metano e lodo. Ele ocorre por meio de 4 etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, cada uma exerce sua função exclusiva com seus devidos microrganismos.⁵ Entre os seus principais sistemas anaeróbios estão as lagoas anaeróbias, tanques sépticos, filtros anaeróbios e reatores de alta taxa. Além disso, os sistemas aeróbios são frequentemente utilizados em conjunto com processos anaeróbios, obtendo assim uma maior eficiência na remoção dos micropoluentes emergentes.⁶

O artigo referência “Estudos sobre remoção de micropoluentes emergentes em efluentes no Brasil: uma revisão sistemática”, apresenta uma avaliação sobre os estudos, dos últimos anos, dos processos de remoção de micropoluentes emergentes no Brasil e conclui que o processo de tratamento biológico foi o mais estudado no país e traz bons resultados.¹ O presente artigo tem como objetivo dar enfoque a eficácia e aprofundamento à análise do processo do tratamento biológico aplicado à remoção de micropoluentes emergentes, com base em revisão bibliográfica recente.

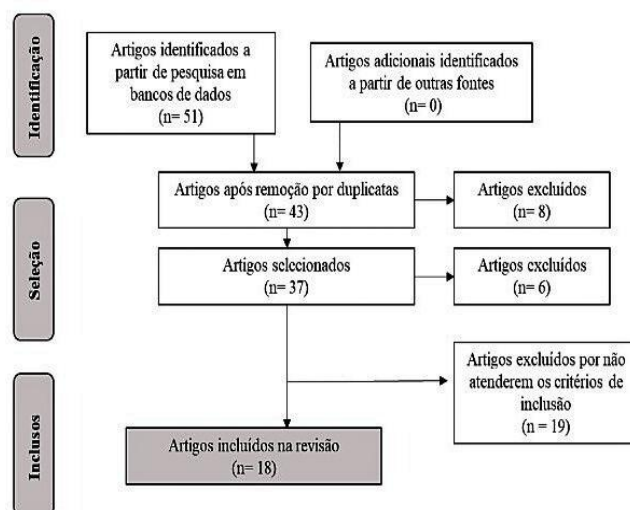
Metodologia

O presente QuiArtigo, como forma de fomentar as explicações, resultados e conclusões, teve como base uma revisão bibliográfica abrangendo artigos científicos, teses e livros. Utilizando as bases de dados Google Acadêmico, *Scielo* e Periódico CAPES. Com recorte temporal de 2020 a 2025 e utilizando palavras chave como “micropoluentes emergentes”, “processos biológicos” e “tratamento de efluentes”.

Com relação ao artigo referência, como forma de trazer uma revisão sistemática da literatura, utilizando as bases de dados (Portal Capes, *Scielo* e *Google Scholar*), selecionou-se estudos de técnicas de remoção de micropoluentes no Brasil. Aplicando alguns critérios de seleção que foram: análise de dados produzidos no Brasil; pesquisas que envolvam remoção de micropoluentes em efluentes; publicadas na forma de artigos completos. E os compostos mais analisados no artigo referência foram fármacos, hormônios, analgésicos, anti-inflamatórios, xenoestrogênios (compostos fenólicos e parabenos).¹

Com as seguintes palavras chave: “tratamento de esgoto” e “tratamento de efluentes”, “micropoluentes emergentes” e “micropoluentes”, em língua portuguesa e inglesa. Todos os artigos obtiveram ajuste em duplicatas e foram analisados em uma planilha com autor, ano de publicação, periódico, estado em que foi realizado o estudo, tecnologia de remoção utilizada, micropoluentes analisados e outras considerações. Ao final obteve um diagrama PRISMA detalhando o processo de seleção que é dado na Figura 1.

Figura 1. Diagrama PRISMA detalhando o processo de seleção. Extraído da referência 1.

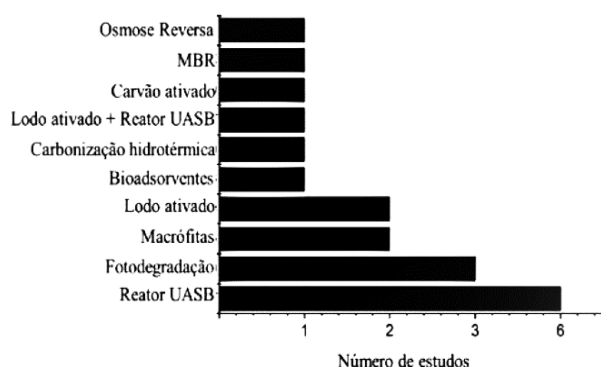


Resultados e discussão

Considerando a importância dos processos biológicos aeróbios e anaeróbios na remoção de micropoluentes discutida na introdução, nesta seção são apresentados e analisados dados encontrados na literatura sobre três abordagens específicas: o sistema combinado Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) e Lodo Ativado (LA), o reator UASB e o LA isolados, bioadsorventes e macrófitas.

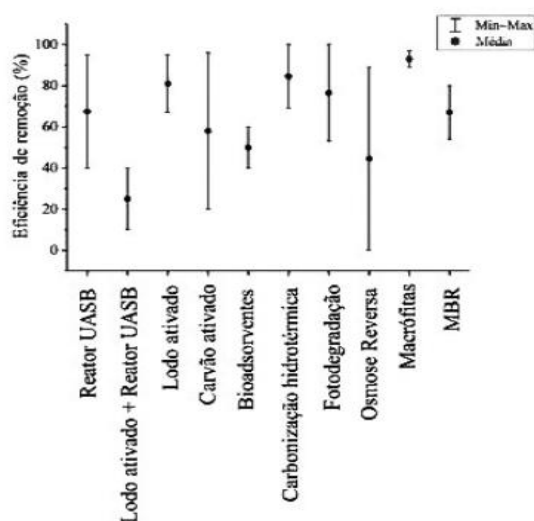
Os resultados do artigo de referência são usados como base, sendo complementados por outros estudos recentes que permitem uma análise comparativa da eficiência desses sistemas. A partir da análise da Figura 2, nota-se que entre as diversas tecnologias estudadas para a remoção de micropoluentes no Brasil, os tratamentos biológicos ocupam papel de destaque.

Figura 2. Técnicas de remoção de micropoluentes emergentes estudadas no Brasil. Extraído da referência 1.



A Figura 3 evidencia a eficiência de remoção de micropoluentes por diversas tecnologias aplicadas no Brasil. A técnica mais frequente nos estudos foi o reator UASB, com seis publicações e remoção média de 70%, tratamento em que os compostos orgânicos são biodegradados e digeridos por meio de uma transformação anaeróbia, resultando na geração de biogás e na sustentação de uma comunidade microbiana ativa.¹¹ Contudo, quando o foco se desloca para a remoção de micropoluentes emergentes, sua eficiência tende a ser variável, pois depende da estrutura química dos compostos. Podemos ver isso em um experimento onde o reator anaeróbio foi ineficiente na remoção do diclofenaco (DCF) e levaram a uma remoção parcial do bezafibrato (BZF).¹² Isso se deve, em grande parte, à ausência de oxigênio molecular, que limita vias metabólicas oxidativas necessárias para a biodegradação de muitos desses compostos.¹³

Figura 3. Eficiência de remoção das diferentes técnicas estudadas no Brasil. Extraído da referência 1



O processo de lodo ativado, presente em três estudos, apresentou uma remoção em torno de 70-90%. Representa um tratamento aeróbio, onde a matéria orgânica é oxidada pelos microrganismos aeróbios e convertida em biomassa.⁷ Este sistema é composto por um tanque onde ocorre a aeração e um decantador secundário onde ocorre a sedimentação. O lodo contido no tanque é formado por fungos, protozoários e bactérias, sendo elas responsáveis pela conversão dos resíduos orgânicos.⁸ Os microrganismos presentes no efluente tendem a crescer e se juntar, dando origem aos flocos biológicos, ou então, lodos ativados. Este lodo é transferido para ser separado do efluente via sedimentação. A biomassa que foi sedimentada é enviada novamente ao tanque de aeração para recircular, e o efluente, agora tratado, é retirado do decantador.⁹ Assim, é uma técnica muito indicada para efluentes com alta taxa de contaminação por matéria orgânica.

As macrófitas são uma tecnologia complementar para as estações de tratamento de esgoto, em que utilizam plantas aquáticas. Experimentos envolvendo macrófitas apresentaram bons resultados na remoção de micropoluentes, como fármacos e parabens, com eficiência média acima de 90%, obtendo bons resultados mesmo na remoção de hormônios. É importante destacar que a eficiência de remoção depende de diversos fatores operacionais, como qualidade do efluente, temperatura, pH, luz solar e condições redox.¹

Com o intuito de obter um sistema mais compacto e com menor consumo de energia, estudaram o desempenho de um sistema híbrido, um reator anaeróbio (UASB) integrado ao sistema de lodos ativados, aproveitando as vantagens de cada processo: o UASB atua na remoção de carga orgânica bruta com baixa demanda energética e produção de biogás, enquanto o lodo ativado realiza a oxidação aeróbia complementar, responsável pela degradação de compostos recalcitrantes, como fármacos e hormônios.^{2,14} Embora eficaz para remover carga orgânica convencional, apresenta desempenho limitado (20–40%) para a remoção de micropoluentes emergentes.

Concluindo, técnicas não biológicas como fotodegradação, osmose reversa, carvão ativado e MBR também aparecem no gráfico, mas com menor ênfase em abordagens sustentáveis ou acessíveis à realidade da maioria das estações brasileiras.

Conclusões

Diante da revisão de literatura realizada e com base nos dados discutidos, observa-se que, ambos os métodos de

tratamento biológico dominam a prática operacional e os estudos no Brasil e apresentaram resultados satisfatórios, porém sua eficiência na remoção de micropoluentes ainda depende de otimização.

As macrófitas obtiveram um maior resultado e uma menor variabilidade, mostrando assim sua eficácia, porém como os outros métodos, depende do tipo e da configuração do sistema. Uma forma de atender os padrões de qualidade exigidos para remoção de micropoluentes seria a integração com tecnologias complementares, como bioadsorventes, as próprias macrófitas, carvão ativado ou processos oxidativos avançados, obtendo-se, assim, uma melhor qualidade do efluente final, garantindo a segurança ambiental no descarte ou reuso.

Portanto, destaca-se a importância de fomentar mais pesquisas que busquem melhorar o desempenho dos tratamentos biológicos tradicionais.

Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de detalhes obtidos por artigos auxiliares são de Julia Ribeiro Dias.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

1. P. P. Ribas, E. O. Santos, C. C. Costa and P. L. S. González, *Revista Brasileira do Meio Ambiente*, 2021, **9**, 165–175.
2. D. C. S. Oliveira, P. G. F. Azevedo and L. A. P. Cavalcanti, *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 2021, **8(18)**, 397–415.
3. B. Halling-Sørensen, S. N. Nielsen, P. Lanzky, F. Ingerslev, H. C. Holten Lützhøft and S. E. Jørgensen, *Chemosphere*, 1998, **36**, 357.
4. S. F. de Aquino, E. M. F. Brandt and C. A. L. Chernicharo, *Eng. Sanit. Ambient.*, 2013, **18(3)**, 187–204.
5. S.-D. Kim and D. S. Aga, *Water Res.*, 2007, **41**, 1013.
6. K. Kümmerer, *Chemosphere*, 2010, **75**, 417.
7. X. Bui, Y. Choi, H. Jo, S. Kim, H. Kim and G. Yoon, *J. Hazard. Mater.*, 2016, **318**, 347.
8. TERRA Ambiental, *Tratamento biológico aeróbio e anaeróbio de efluentes*, 2019.
9. S. Aziz, M. A. Rahman, M. M. Hossain and K. M. Rahman, *Sci. Total Environ.*, 2019, **665**, 248.
10. A. P. Silva, *Eficiência de reatores UASB na remoção de micropoluentes em efluentes domésticos*, Monografia de Graduação, Universidade Federal do Ceará, 2018.
11. M. Salles, *Tratamento de Efluentes – Perspectivas e Tecnologias Sustentáveis*, 1ª ed., EdUFMA, 2019.
12. M. von Sperling, *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*, 4ª ed., Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2016.
13. M. von Sperling, *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*, 4ª ed., Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2014.
14. M. C. V. Amaral, M. S. Souza and G. L. Tavares, *Eng. Agric.*, 2010, **30**, 109.