

Contaminação em água com compostos emergentes e o tratamento com processos oxidativos avançados no Brasil

Rodrigo Fortunato de Oliveira^{1*}

Thays Regina Mlotto Begnini^{1*}

Leonardo Santos Andrade^{1*}

Resumo: Compostos emergentes são substâncias com potencial risco aos ecossistemas aquáticos e à saúde humana. Eles têm esta denominação em função de terem sido detectados somente nos últimos anos devido ao avanço tecnológico aplicado às análises químicas ambientais. Esses compostos possuem grande variedade e incluem os fármacos, agrotóxicos, produtos de limpeza e beleza, dentre outros. O principal problema resultante da presença desses produtos na água de consumo está relacionado com o desenvolvimento de doenças em seres humanos e distúrbios na fauna aquática. Considerando a dificuldade de detecção e tratamento dessas substâncias, os métodos mais tradicionais e utilizados atualmente não são capazes de fazer sua remoção com segurança. Esses contaminantes podem ser tratados por processos de adsorção com carvão ativado pulverizado, com carvão ativado granular, por processos oxidativos avançados (POA) e filtração por membrana. Dentre estas técnicas, destaca-se o tratamento por POA, que utiliza o radical hidroxila para a oxidação destes poluentes. Deste modo, o presente trabalho apresenta, por meio de uma revisão cienciométrica utilizando o biblioshiny (Pacote R), o estado da arte no Brasil sobre o uso de POA para o tratamento de compostos emergentes.

Palavras-chave: Processos oxidativos avançados, Compostos emergentes, Meio ambiente, Brasil.

INTRODUÇÃO

A revolução industrial foi um marco mundial para a disseminação de contaminantes ambientais por meio da utilização de produtos químicos e combustíveis. A produção de novas substâncias, associada à falta de regulamentação e conscientização sobre sua utilização, ocasionou acumulação a longo prazo, causando impactos negativos aos recursos naturais e ecossistemas (CALVELLI *et al.*, 2023).

Dentre os contaminantes ambientais, destacam-se os chamados emergentes, os quais são variados, incluindo substâncias como produtos químicos, fármacos, produtos de limpeza e beleza, dentre outros. Os contaminantes emergentes têm

^{1*} Instituto de Química – UFCAT: rodrigofortunato144@gmail.com, engthaysmiotto@gmail.com, ls_andrade@ufcat.edu.br

levantado alertas devido à sua capacidade de bioacumulação e persistência, podendo ocasionar diversos problemas à saúde humana e ecossistemas (CALVELLI *et al.*, 2023).

Os contaminantes emergentes são compostos complexos, que apresentam resistência aos métodos tradicionais de tratamento e, mesmo em baixas concentrações, a exposição contínua a esses compostos está associada à indução de diversas disfunções hormonais e alterações metabólicas de organismos aquáticos (CAMPOS; PAGIORO, 2025).

Dentre as formas de dispersão de contaminantes emergentes, destaca-se o lançamento de efluentes tratados em corpos hídricos, uma vez que Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) convencionais não possuem sistemas de tratamento projetados para remover estes contaminantes. Nas Estações de Tratamento de Água (ETA) os tratamentos empregados também não são eficientes quando se trata de contaminantes emergentes, podendo, deste modo, ocasionar a contaminação de seres vivos que façam o consumo dessa água (FEITOSA; SODRÉ; MALDANER, 2013).

Além da contaminação por lançamento de efluentes, SCHLEGER e ANDRADE (2023) apontam que a lixiviação que ocorre em solos utilizados por lavouras, a disposição inadequada de resíduos sólidos e utilização de fossas rudimentares também são vias que viabilizam a dispersão dos compostos emergentes em águas superficiais e subterrâneas. Esses compostos, quando não inativados, podem interagir com a matéria orgânica presente no meio e gerar compostos imprevisíveis. Os autores mencionam ainda que, para redução de dispersão de compostos emergentes provenientes de defensivos agrícolas, se faz necessário o incentivo a substituição por produtos que não contenham poluentes emergentes. Para contaminantes provenientes de efluentes, deve-se promover a desativação de fossas rudimentares, direcionando-os para ETE. A partir disso, oportunizam-se estudos de viabilidade de implantação de tratamentos avançados, capazes de remover estes compostos.

Nesse sentido, os Processos Oxidativos Avançados (POA) surgem como uma alternativa de tratamento, em que se geram radicais livres, principalmente o radical hidroxila, capazes de degradar e transformar os contaminantes emergentes em dióxido de carbono, água e íons inorgânicos (TEIXEIRA e JARDIM, 2004).

Neste trabalho, portanto, tem-se como objetivo apresentar, por meio de uma revisão cienciométrica utilizando o biblioshiny (Pacote R), o estado da arte no Brasil sobre o uso de POA para o tratamento de compostos emergentes.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os POA são técnicas de tratamento de águas residuárias e de abastecimento capazes de degradar e transformar os contaminantes emergentes em dióxido de carbono, água e íons inorgânicos. Esse processo pode ser utilizado para eliminar compostos orgânicos tanto em fase aquosa, como em fase gasosa ou adsorvidos em uma matriz sólida, podendo ser combinado com outras tecnologias (TEIXEIRA e JARDIM, 2004).

A formação dos radicais hidroxila, responsáveis pela degradação dos poluentes, pode ocorrer por meio de processos homogêneos ou heterogêneos, a depender da ausência ou presença de catalisadores na forma sólida. Nos sistemas homogêneos, a degradação dos poluentes pode ocorrer por meio de fotólise direta com radiação ultravioleta (UV), onde se utiliza luz como fonte de degradação, ou por meio da presença de oxidantes fortes, como H_2O_2 e O_3 , capazes de gerar o radical hidroxila. Já os processos heterogêneos têm como característica o uso de catalisadores semi-condutores, os quais aumentam a velocidade da reação (TEIXEIRA e JARDIM, 2004).

Os POA também podem ser divididos entre químicos, fotoquímicos, sonoquímicos e eletroquímicos. Dentre os POA químicos destaca-se o processo Fenton, o qual gera radical hidroxila por meio da reação de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) dissolvido na presença de íons de ferro, sendo estes últimos os catalisadores (BRILLAS; SIRÉS; OTURAN, 2009).

Já os POA fotoquímicos são considerados mais simples e eficientes que os químicos, pois associam irradiação UV com agentes oxidantes fortes, como H_2O_2 , ozônio (O_3) e catálise com dióxido de titânio (TiO_2). Esse processo gera três reações capazes de degradar poluentes: foto-decomposição (que utiliza irradiação UV), oxidação por H_2O_2 e O_3 e oxidação por fotocatalise com TiO_2 . Por fim, os POA sonoquímicos fazem uso de radiação ultrassônica (US) e os eletroquímicos tem como base técnicas de eletrólise (ARAÚJO *et al.*, 2016).

Os POA podem ser utilizados como complementos para técnicas de tratamento já estabelecidas, como floculação, precipitação, adsorção, oxidação biológica aeróbia, dentre outros. Algumas das técnicas mencionadas possuem a capacidade de alterar as fases de poluentes, contudo, não os destroem (CARDONA, 2001).

Apesar de apresentarem um custo operacional maior comparado com tratamentos biológicos, os POA podem ser utilizados como pré-tratamento para aumentar a biodegradabilidade de poluentes, tornando os produtos resultantes da reação facilmente degradáveis por microorganismos (CARDONA, 2001). Portanto, os POA não somente eliminam os contaminantes, como também transformam sua estrutura química, convertendo-os em compostos menos nocivos (ARMENDÁRIZ *et al.*, 2024).

Os POA podem ser utilizados para tratamento de águas residuárias e de abastecimento e, devido a sua alta reatividade, são capazes de degradar até mesmo compostos mais complexos, como íons metálicos ou compostos halogenados (ARMENDÁRIZ *et al.*, 2024).

A degradação dos contaminantes por meio de POA pode ser monitorada por meio de técnicas como a cromatografia líquida de alta eficiência ou espectrometria de massas. Esse monitoramento é importante, pois por meio dele é possível compreender mecanismos de reação e otimizar etapas do processo (ARMENDÁRIZ *et al.*, 2024).

MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de alcançar o objetivo proposto nesta pesquisa, adotou-se a revisão da literatura através da cientometria. A cientometria, quando comparada a outros métodos de revisão, se destaca por trazer a perspectiva da quantificação para o processo de revisão, revelando percepções sob um viés mais amplo da temática-alvo de estudo, tendo como pontos fortes a objetividade, escalabilidade e a revelação de padrões na literatura (HAGHANI, 2025).

As bases de dados escolhidas para realizar as buscas foram a *Web of Science* e a *Scopus*. Para realizar a busca nessas bases de dados, foram definidos descritores associados ao objetivo da pesquisa, sendo que os descritores foram

definidos em três grupos: i) compostos emergentes e seus sinônimos; ii) processos oxidativos avançados e seus sinônimos; e iii) Brasil e suas variações. Os descritores, combinados por operadores *booleanos*, resultaram na seguinte combinação que foi inserida nas bases de dados: ("emerging contaminants" OR "emerging pollutants" OR "micropollutants" OR "PPCPs" OR "pharmaceuticals" OR "personal care products" OR "pesticides" OR "EDCs") AND ("advanced oxidation processes" OR "AOP" OR "Fenton" OR "photo-Fenton" OR "photocatalysis" OR "ozonation" OR "UV/H₂O₂" OR "electrochemical oxidation") AND ("Brazil" OR "Brasil" OR "Brazilian").

As bases de dados foram unificadas e tiveram suas duplicatas removidas no *R studio* por meio do pacote *Bibliometrix*. A base de dados unificada e sem duplicatas passou por curadoria baseada em critérios para sua manutenção ou exclusão. Os critérios adotados para manter os artigos foram os seguintes: i) o artigo possui em sua metodologia o uso de algum Processo Oxidativo Avançado; ii) o composto alvo de avaliação da remoção por meio de POA é um composto emergente; e iii) o estudo foi conduzido no Brasil. Estudos de caracterização e/ou quantificação de compostos emergentes e revisões de literatura foram excluídos na triagem. A base de dados curada foi retornada ao R para análise dos dados através do pacote *Bibliometrix*, o qual analisou dados envolvendo métricas de produção científica anual, palavras-chave, citações, etc.

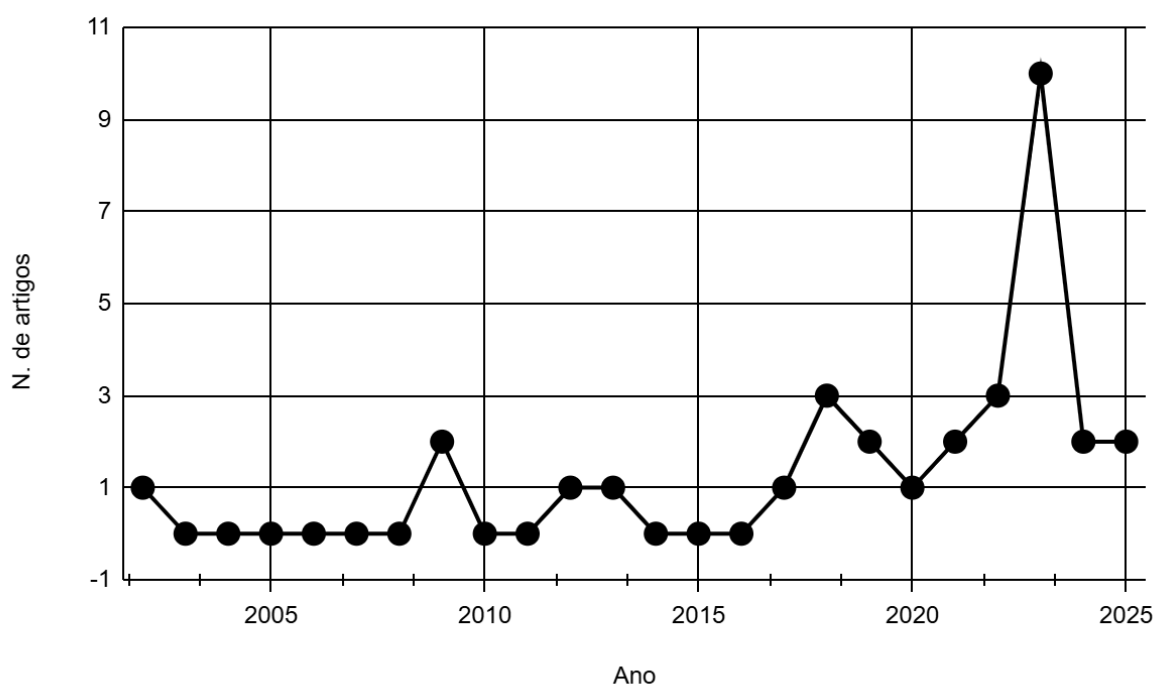
RESULTADOS

A produção de artigos científicos no Brasil relacionada ao tratamento de compostos emergentes por POA iniciou-se em 2002, com um artigo produzido no referido ano (Figura 1). Desde então, até 2022 houve modesta quantidade de publicações, com o máximo de três artigos ao ano. Contudo, em 2023 ocorreu um aumento significativo de produção científica anual, com o total de 10 artigos publicados. O aumento de publicações pode estar ligado ao aumento da preocupação ambiental relacionada aos compostos emergentes (MARSON et al., 2022).

Esse aumento de publicações, ainda, pode estar relacionado à revisão dos padrões de potabilidade da água no Brasil por meio da Portaria GM/MS nº 888/2021.

Embora a norma não tenha incluído parâmetros específicos para fármacos, hormônios e outros compostos emergentes, ela introduziu requisitos mais rigorosos para substâncias químicas e reforçou a necessidade de monitoramento ampliado. Essa atualização pode ter mobilizado instituições acadêmicas e laboratórios de pesquisa a investigar a ocorrência de micropoluentes ainda não regulamentados, de modo a antecipar futuras exigências legais.

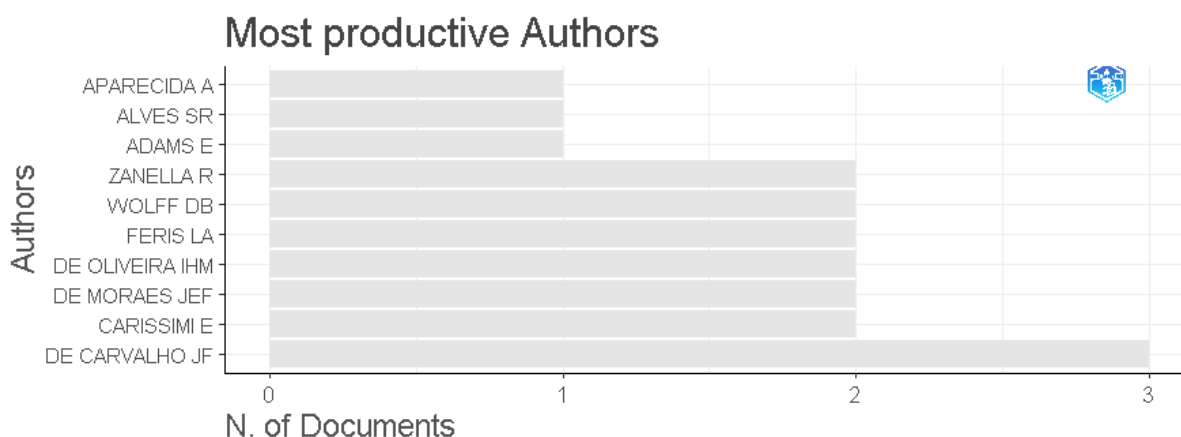
Figura 1 - Produção Científica Anual.



Fonte: elaborado pelos autores.

A análise de autores que publicaram sobre POA sugere produção dispersa entre grupos de pesquisa, com poucos autores apresentando duas ou mais publicações (Figura 2). Esse padrão indica que, embora a área esteja em expansão, ainda necessita de redes colaborativas mais consolidadas, tal como ocorre em outros países com produção científica mais madura no tema. ODELIUS e ONO (2018) pontuam que a colaboração científica entre grupos de pesquisa pode levar a uma melhoria da qualidade da produção científica, bem como disseminar o conhecimento, demonstrando a necessidade de colaboração na temática.

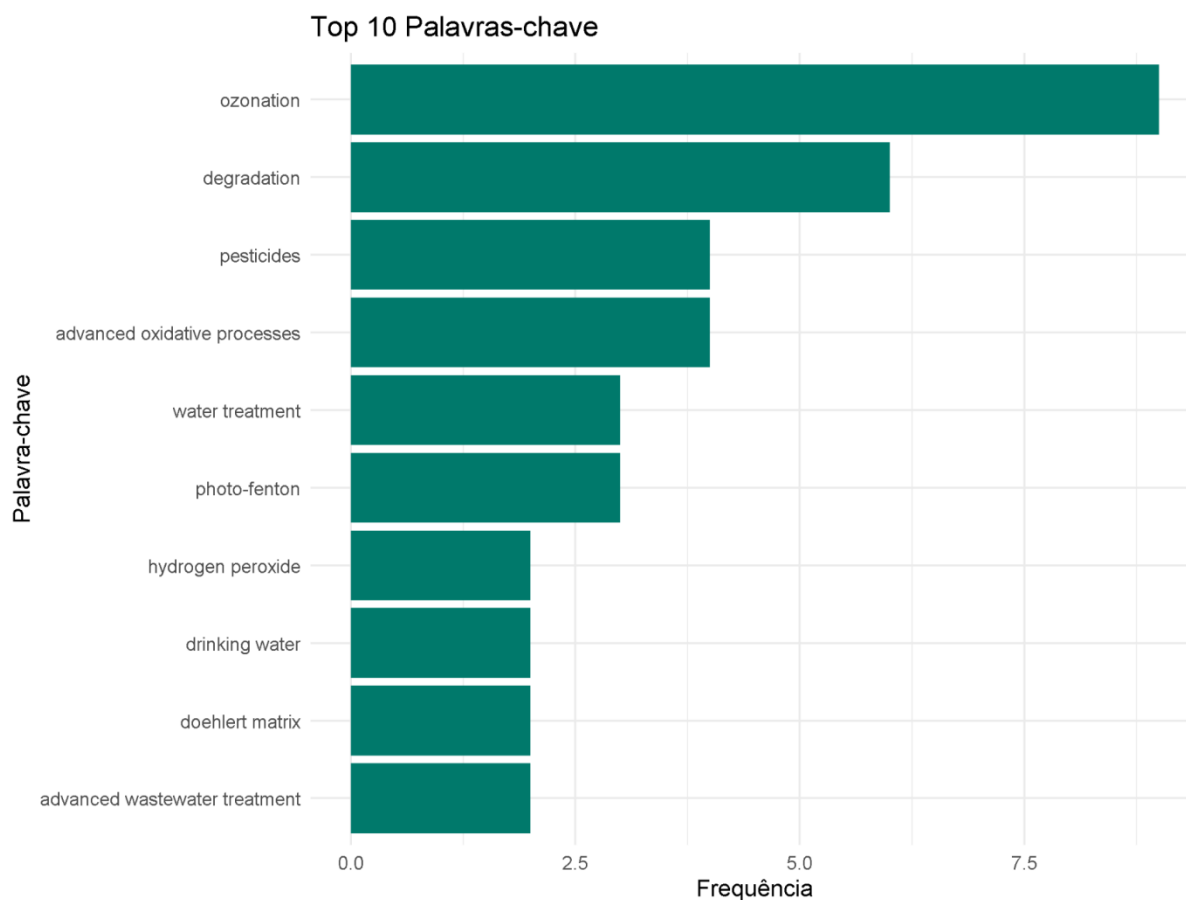
Figura 2 - Autores mais produtivos.



Fonte: elaborado pelos autores.

A análise das palavras-chave (Figura 3) utilizadas nos artigos indicou que “ozonização” é o termo mais recorrente, indicando notável interesse por essa tecnologia nos POA no Brasil. Na sequência, o uso do termo “degradação” indica que a degradação de compostos está entre os principais objetivos de aplicação da técnica, especialmente para compostos como pesticidas, que são amplamente utilizados no Brasil. A presença de palavras como “photo-Fenton”, “advanced wastewater treatment”, “drinking water” e “water treatment” reforça que a pesquisa está centrada em POA clássicos aplicados ao tratamento de águas de abastecimento e efluentes.

Figura 3 - Palavras-chave mais recorrentes na análise.



Fonte: elaborado pelos autores.

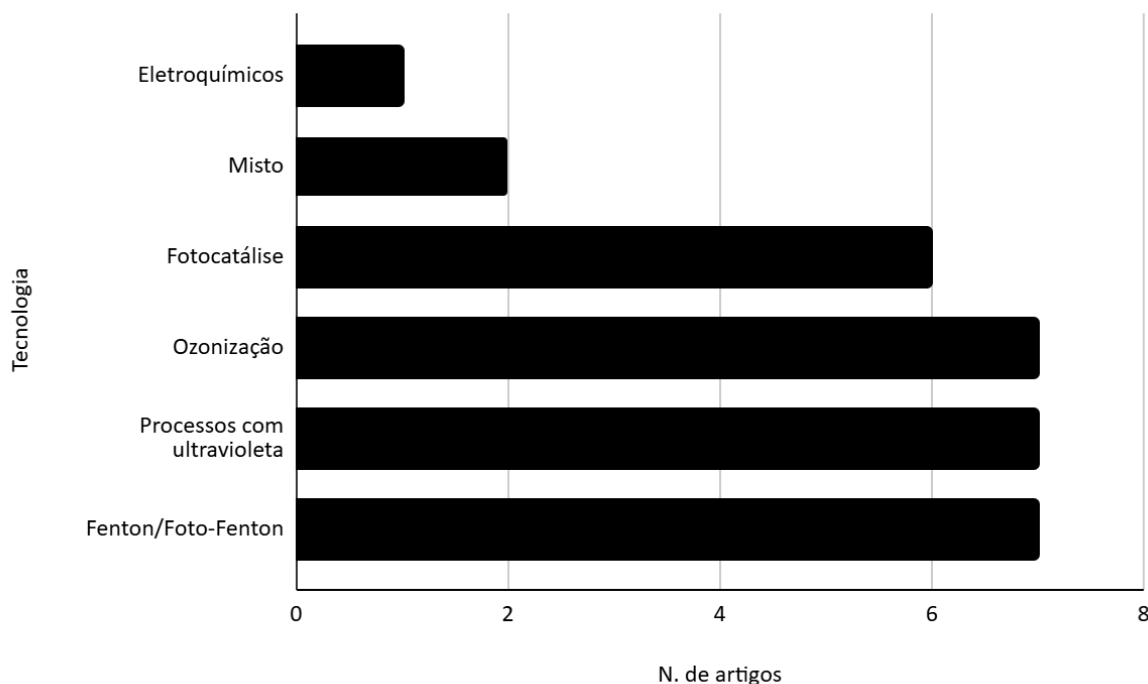
Dentre os artigos analisados, conforme Figura 4, verifica-se que as tecnologias compostas por Fenton/Foto-Fenton, Ozonização e Processos com Ultravioleta destacam-se no tratamento de compostos emergentes por POA, cada uma com 7 artigos descritos. Esses resultados confirmam a análise realizada anteriormente, indicando prioridade por métodos consolidados, de fácil implementação e com bons resultados.

O uso de técnicas como o Foto-Fenton se mostra promissor em função do baixo custo associado a sua implementação, relacionada, principalmente, com o aproveitamento da energia solar (NOGUEIRA et al., 2007). Ainda, tecnologias como processos eletroquímicos e abordagens mistas aparecem com baixa frequência, sugerindo que ainda não são consolidadas na pesquisa nacional.

Segundo ARAÚJO *et al.* (2016), a combinação de diferentes tipos de POA resulta em uma maior geração de radicais hidroxila, aumentando a degradação de espécies tóxicas e/ou recalcitrantes, o que reforça a necessidade de ampliar estudos

com tecnologias mistas no Brasil. Ainda, técnicas que envolvem processos eletroquímicos apresentam maior custo e tendem a requerer mais complexidade na operação (BRIÃO et al., 2024).

Figura 4 - Número de artigos publicados para cada tipo de Processo Oxidativo Avançado.

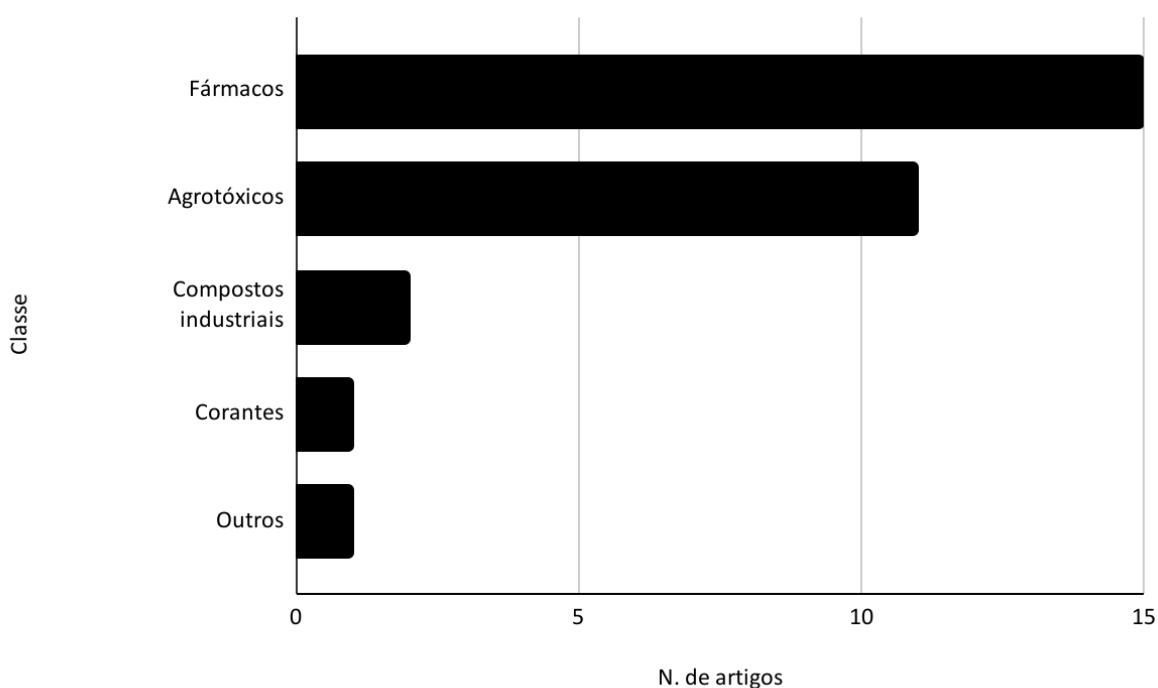


Fonte: elaborado pelos autores.

Considerando as classes de poluentes emergentes estudados, conforme Figura 5, observa-se que os fármacos lideram a pesquisa no Brasil com 15 artigos, indo contra a tendência internacional, que revela uma tendência de decaimento no número de estudos relacionados aos fármacos nos últimos anos, conforme YU et al., 2024. Em seguida, observa-se que agrotóxicos também aparecem de forma expressiva, com 11 artigos. Contudo, esse número pode ser considerado baixo ao avaliar o fato de que o Brasil é o país que mais consome agrotóxicos no mundo, segundo dados da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura - FAO (2023). Tal discrepância pode ser atribuída a desafios analíticos, como a diversidade estrutural dos pesticidas e o elevado custo de métodos de tratamento para múltiplos resíduos.

As categorias corantes, compostos industriais e outros apresentam número muito reduzido de estudos, indicando que, embora reconhecidamente relevantes, recebem menor atenção na literatura sobre POA, fato esse que pode estar associado à menor disponibilidade de dados nacionais sobre esses compostos.

Figura 5 - Classe de compostos avaliada por artigo.

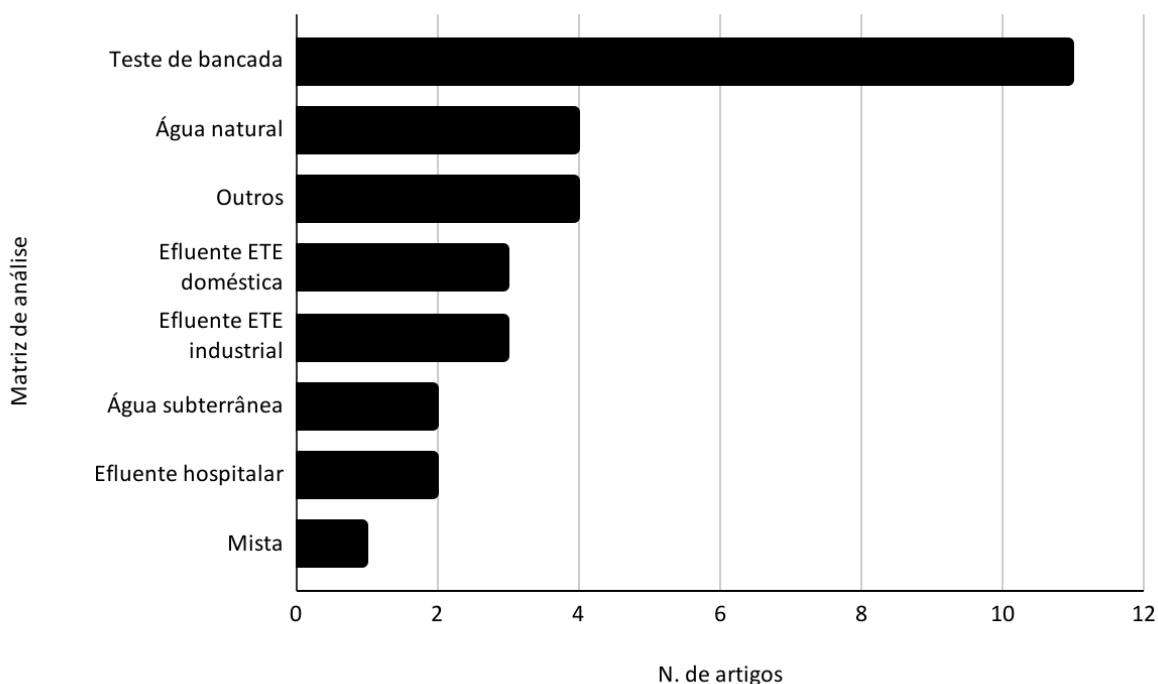


Fonte: elaborado pelos autores.

Quanto às matrizes analisadas, conforme Figura 6, observa-se que há um predomínio de estudos realizados por testes de bancada, nos quais a água é misturada com compostos emergentes em diferentes concentrações a fim de avaliar a eficiência de remoção dos mais diversos métodos. Embora os testes de bancada sejam importantes para a avaliação da eficiência de remoção de poluentes emergentes de diferentes técnicas, é necessário que mais estudos sejam realizados em matrizes reais, a fim de garantir uma perspectiva mais confiável no âmbito da eficiência destas técnicas, bem como do seu custo (MARSON et al., 2022). Na sequência, verifica-se que a matriz de água natural (retirada de cursos hídricos), tem grande relevância, assim como a fonte classificada como outros, que representa um

estudo que utilizou como matriz de análise um teste de bancada, água de curso hídrico, efluente da entrada e saída do sistema de tratamento.

Figura 6 - Matriz de análise dos estudos.



Fonte: elaborado pelos autores.

CONCLUSÃO

De modo geral, os resultados evidenciam que o Brasil acompanha tendências internacionais no estudo e aplicação de POA para tratamento de compostos emergentes, embora apresente lacunas importantes, especialmente quanto à diversidade de matrizes, aplicação em escala real e estudos envolvendo compostos industriais e corantes. O avanço da legislação, a ampliação da capacidade analítica e o fortalecimento de redes de pesquisa podem favorecer o desenvolvimento futuro da área.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Karla Santos de et al. Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e

- efluentes industriais. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, n. 2, p. 387-401, 2016.
- ARMENDÁRIZ, E. V.; AZUELA, A. C. G.; BELMAN, F. J. J.; ACOSTA, A. S. P.; DÁVALOS, C. G. D.; RODRÍGUEZ, H. T.; RAMÍREZ, E. R.; ORTEGA, N. L. G. **Procesos Avanzados de Oxidación para la Eliminación de Contaminantes del Agua, una Revisión**. *JÓVENES EN LA CIENCIA, [S. l.]*, v. 28, p. 1-11, 2024.
- BRIÃO, G. V.; COSTA, T. B.; ANTONELLI, R.; COSTA, J. M. **Electrochemical processes for the treatment of contaminant-rich wastewater: A comprehensive review**. *Chemosphere*, v. 355, p. 141884, 2024. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.141884.
- BRILLAS, E.; SIRES, I.; OTURAN, M. A. **Electro-Fenton process and related electrochemical technologies based on Fenton's reaction chemistry**. *Chemical Reviews*, v. 109, p. 6570-6631, 2009.
- CALVELLI, J. V. B., *et al.* **Contaminantes emergentes: uma visão ecotoxicológica sobre o impacto dos fármacos no meio ambiente e na saúde pública**. Ponta Grossa: Atena, 2023. 91 p.
- CAMPOS, R. F. F.; PAGIORO, T. A. **Compostos emergentes: características, fontes de geração e presença no meio ambiente**. *Natural Resources, [S. l.]*, v. 15, n. 1, p. e8636, 2025.
- CARDONA, Sandra Patricia Parra. **Coupling of photocatalytic and biological processes as a contribution to the detoxification of water: catalytic and technological aspects**. 2001. Tese de Doutorado. Universidad del Valle.
- FAO. *Pesticides use and trade, 1990–2023*. FAOSTAT Analytical Brief 109. Rome: FAO, 2025. Acesso em 09 Dez. 2025. Disponível em: <<https://openknowledge.fao.org/bitstreams/4b637deb-e1c4-480f-ab02-13c635d200a3/download>>.
- FEITOSA, R. S.; SODRÉ, F. F.; MALDANER, A. O. **Drogas de abuso em águas naturais e residuárias urbanas: ocorrência, determinação e aplicações forenses**. *Química Nova*, v. 36, n. 2, p. 291–305, 2013.
- HAGHANI, M. **What makes an informative and publication-worthy scientometric analysis of literature: A guide for authors, reviewers and editors**.

- Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, v. 22, p. 100956, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100956>.
- MARSON, E. O.; PANIAGUA, C. E. S.; GOMES JÚNIOR, O.; GONÇALVES, B. R.; SILVA, V. M.; RICARDO, I. A.; STARLING, M. C. V. M.; AMORIM, C. C.; TROVÓ, A. G. **A review toward contaminants of emerging concern in Brazil: occurrence, impact and their degradation by advanced oxidation process in aquatic matrices.** Science of the Total Environment, v. 836, p. 155605, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155605.
- NOGUEIRA, R. F. P.; TROVÓ, A. G.; SILVA, M. R. A.; VILLA, R. D.; OLIVEIRA, M. C. **Fundamentos e aplicações ambientais dos processos Fenton e foto-Fenton.** Química Nova, v. 30, n. 2, p. 400–408, 2007.
- ODELIUS, C. C.; ONO, R. N. **Características da colaboração científica entre grupos de pesquisa de áreas de exatas, vida e humanas.** Cadernos EBAPE. BR, v. 17, n. 1, p. 101–116, 2019. DOI: 10.1590/1679-395164739.
- SCHLEGER, P. T.; ANDRADE, P. A. W. de. **Poluentes emergentes: uma visão sistêmica.** Tuniplac, Lages, v. 5, n. 1, p. 92-98, ago. 2023.
- TEIXEIRA, C. P. de A. B.; JARDIM, W. de F. **Processos Oxidativos Avançados: conceitos teóricos.** Caderno temático, v. 3. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Instituto de Química – IQ, Laboratório de Química Ambiental – LQA. Campinas, 2004.
- YU, Y.; WANG, S.; YU, P.; WANG, D.; HU, B.; ZHENG, P.; ZHANG, M. **A bibliometric analysis of emerging contaminants (ECs) (2001–2021): Evolution of hotspots and research trends.** Science of the Total Environment, v. 907, p. 168116, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168116.