



SUBSTÂNCIAS PERFLUORALQUILADAS E POLIFLUORALQUILADAS (PFAS): UMA REVISÃO SOBRE TRATAMENTOS, REGULAMENTAÇÃO E MONITORAMENTO

Palavras-Chave: PFAS, EMERGING CONTAMINANTS, RISK ASSESMENT, REGULATIONS PFAS.

Autores(as):

ANA CAROLINE DA SILVA FERREIRA, FT - UNICAMP

KARINA TIEMI YUZAWA, FT - UNICAMP

Prof. Dr. DAGOBERTO YUKIO OKADA, FT - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

Os Per e Perfluoralquil (PFAS) são um grupo de produtos químicos orgânicos, que possuem como características a persistência ambiental e potencial de toxicidade, compostos por cadeias longas e curtas lineares de moléculas de carbono (C), com extremidade totalmente ou parcialmente preenchidas por átomos de flúor (F) (ZHANG et al., 2016). Por sua estrutura molecular ser considerada estável e à sua resistência à degradação, os PFAS são considerados poluentes emergentes devido a sua persistência no ambiente e capacidade de bioacumulação em organismos vivos (RUIZ, 2023).

As PFAS foram identificadas pela primeira vez no mundo em 1930 (ITRC, 2022). Posteriormente, foram detectadas na década de 1950, durante a produção de Teflon (ITRC, 2020). A partir de 2009, devido ao desenvolvimento significativo dos PFAS, foi realizada uma investigação sobre a produção, destino e impactos. Foram identificados em diversas aplicações industriais e produtos manufaturados, como embalagens de alimentos, espumas, retardantes de incêndio, roupas, revestimentos protetores para tecidos, tapetes e eletrônicos (ABUNADA et al., 2020).

Por ser substâncias de ampla aplicabilidade, têm se tornado preocupantes devido a sua persistência e bioacumulação: estudos têm associado essas substâncias a efeitos adversos à saúde especialmente devido à exposição humana pela ingestão de água e alimentos contaminados (NTP, 2016). A complexidade de realizar o monitoramento dos PFAS em diferentes ambientes e os riscos desconhecidos associados representam um risco significativo e potencial, devido a isso muitos países têm adotado medidas para regulamentar, eliminar ou proibir essas substâncias (ITRC, 2020). Portanto o objetivo do estudo é analisar o cenário atual sobre as PFAS do Brasil e realizar um comparativo da situação em outros países, buscando analisar os estudos, técnicas de remoção e as legislações atuais.

METODOLOGIA:

Para essa pesquisa, definimos que seria realizada baseada em revisões bibliográficas com o objetivo de analisar, sintetizar informações relevantes e atuais, além de realizar um comparativo do panorama do Brasil e do mundo sobre as PFAS e os tipos de tratamentos. A base de dados que

buscamos foi Google Scholar, PubMed, Scielo e ScienceDirect, empregando palavras chaves como: PFAS, *Emerging contaminants*, *risk assessment*, *regulations* PFAS. Para aprofundarmos sobre os PFAS, buscamos também encontrar na agência regulatória *Environmental Protection Agency* (EPA) dos Estados Unidos diretrizes, pesquisas e monitoramentos, uma vez que a agência é uma das mais ativas em relação à regulamentação. A busca resultou em 40 artigos relacionados ao tema, estreitamos a pesquisa focando em informações sobre técnicas de tratamento e remoção, legislações aplicáveis e metodologias de identificação e quantificação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Em resposta aos riscos associados aos PFAS alguns métodos de tratamentos eficazes para remover esses compostos da água potável vem sendo estudado conforme apresentado na Tabela 1. Segundo Karlos (2020), no Brasil, o principal tratamento de água para abastecimento é o convencional, que emprega carvão ativado e areia no processo de filtração. De acordo com a Tabela 1, a filtração com areia sozinha não é suficiente para remover os PFAS, mas quando combinada com o carvão ativado, a taxa de remoção supera 90%. Já em relação aos tratamentos de esgoto, Oliveira e Von Sperling. (2007) identificaram algumas metodologias que empregam microrganismos no processo de tratamento principais, incluindo lodos ativados, lagoas facultativas, fossas-filtro, lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas, reatores UASB operando isoladamente e seguidos de pós-tratamento. Em comparação com a Tabela 1, os métodos que aplicam tratamento biológico tiveram uma eficiência de remoção de 30% com enzima peroxidase e 67% com bactérias aeróbias, não sendo tão eficiente em comparação com outras técnicas. Nota-se que as técnicas que demonstraram maior eficiência na remoção dos PFAS foram: nanofiltração e a osmose reversa, que são técnicas observadas com menos frequência no tratamento de água e não utilizadas no tratamento de esgotos. Embora essas técnicas apresentam alta eficiência na remoção de contaminantes, é importante ressaltar que demandam altos investimentos para sua implantação, o que se torna uma barreira significativa.

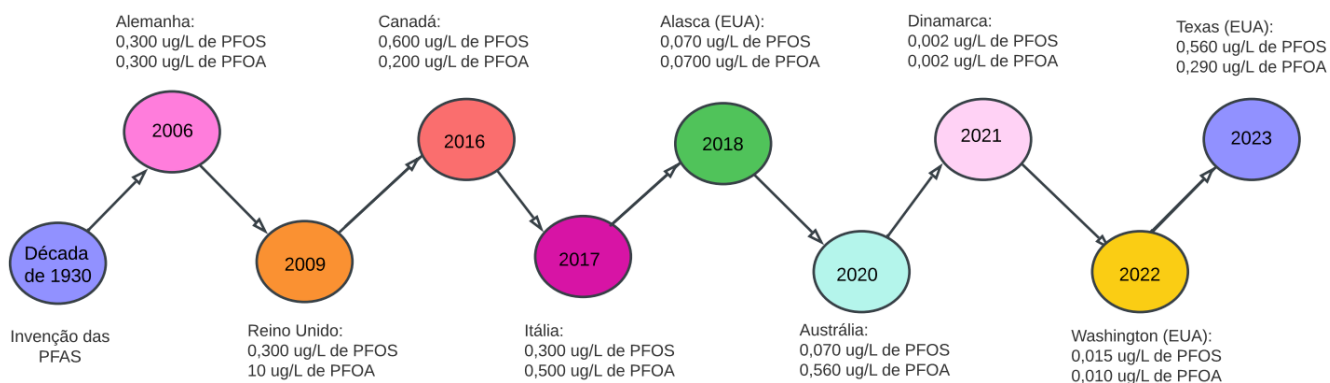
As PFAS estão chamando a atenção de governos e do público em todo o mundo nos últimos anos. Na Figura 1 são observados que alguns países têm desenvolvido diretrizes específicas para regular a presença de PFOA e PFOS e quando elas foram regulamentadas. Por serem substâncias de bioacumulação, estão incluídos na Convenção de Estocolmo, um tratado internacional que objetiva eliminar e reduzir a produção e o uso destes produtos químicos, conhecidos como poluentes orgânicos persistentes (POPs) (RUIZ, 2023). Essas regulamentações destacam os esforços globais para abordar os riscos associados aos PFAS, com muitos países implementando políticas específicas para proteger a saúde humana e o meio ambiente. Diante desse cenário identificamos a necessidade de regulamentações rigorosas e de esforços contínuos para monitorar e mitigar a exposição aos PFAS na população. No Brasil, ainda não existe uma legislação específica que regulamenta a presença de PFAS ou limites de concentrações em matrizes ambientais. Porém, está em andamento o projeto de lei PL 2726/2023 que solicita o monitoramento e controle das fontes de emissões, que sejam

estabelecidos limites, que haja a fiscalização da produção e do descarte dessas substâncias e que ocorra a remediação de áreas contaminadas por esses produtos químicos.

Tabela 1: Tratamentos dos PFAS

Matriz	Tratamento	Eficiência (%)	Referências
Água/águas residuais	Filtração de areia	0	Eschauzier et al, 2012; Takagi et al, 2011
Água/águas residuais	Nanofiltração	90-99	Tang et al, 2007; Steinle-Darling; Reinhard, 2008
Água/águas residuais	Osmose Reversa	>95	Appleman, 2013; Schröder, 2010
Água/águas residuais	Carvão ativado	>90	Ochoa-Herrera et al, 2008; Hawley et al, 2012
Águas residuais	Tratamento Biológico-enzima peroxidase	30	Colosi, 2009; Kucharzyk et al, 2017
Águas residuais	Tratamento Biológico-bactérias aeróbias	67	Kwon et al, 2014
Águas subterrâneas	Oxidação Química	80,5	Mitchell et al, 2013

Figura 1: Linha do tempo de Regulamentação das PFAS por países.



Fonte: Elaboração das autoras com base na referência ITRC, 2022.

Para a determinação das PFAS existem métodos padronizados, o Método EPA 533 é utilizado na detecção de um amplo grupo de PFAS de cadeias curtas, e o Método EPA 537.1 foca em compostos de cadeia mais longa. Ambos utilizam a cromatografia líquida acoplada a um espectrômetro de massa para realizar a quantificação em matriz de águas potáveis, com preparo das amostras por extração de fase sólida para líquida com cartuchos (SPE) (EPA, 2024). As amostras são concentradas e ressuspendidas antes da análise. A quantificação é realizada por software que utiliza a razão entre a área do pico do analito integrado, e os resultados são reportados em µg/L ou ng/L (EPA, 2024). Segundo Acayaba (2022), ao realizar a validação do método, utilizou padronização externa. O limite de quantificação (LQ) determinado com base na relação sinal/ruído é um fator de concentração de 1000 vezes. Realizou as curvas, todas com linearidade ($R^2 > 0,99$) e avaliação em triplicata de precisão e exatidão em água ultrapura e nas amostras. A Tabela 1 demonstra alguns PFAS identificados em sua pesquisa com os LQs obtidos. Analisando a Figura 1, pode-se observar que o país que possui mais restrição em relação às regulamentações das PFAS é a Dinamarca, no qual o seu limite máximo permitido é de 0,002 µg/L de PFOS e PFOA. Em relação a Tabela 2, com base no método desenvolvido por Acayaba (2022), identificou-se que seria possível realizar o monitoramento dos compostos 2, 4, 5, 6, 7 e 8 (Tabela 2), visto que a técnica utilizada consegue detectar traços dessas

substâncias nas amostras. No entanto, é preciso ressaltar que ao realizar uma metodologia com um grupo de vários compostos, há uma certa dificuldade em manter a estabilidade deles. Devido a isso, torna-se difícil alcançar o mesmo LQ para todos os compostos. Sendo assim, os compostos 1 e 3 estavam acima do limite máximo permitido pela Dinamarca (Tabela 2). Outra limitação que influencia na determinação é o alto custo de reagentes e equipamentos necessários para a realização do ensaio, o que pode dificultar a implementação de um monitoramento abrangente e constante.

Tabela 2: Limites de quantificação

Analito	LQ (ng L ⁻¹)	Analito	LQ (ng L ⁻¹)
¹ Ácido perfluoropentanóico	5	⁵ Ácido perfluoroheptanóico	1,7
² Ácido perfluorooctanóico	2	⁶ Ácido perfluorobutanóico	1,7
³ Ácido perfluorooctanossulfônico	5	⁷ Ácido perfluorobutanossulfônico	1,7
⁴ Ácido perfluorohexanóico	2	⁸ Ácido 1H,1H,2H,2H-Perfluorooctanossulfônico	1,7

Fonte: Acayaba, 2022.

CONCLUSÕES:

Os resultados obtidos através da revisão bibliográfica sobre os PFAS demonstram cada vez mais urgência, tanto no Brasil quanto em outras partes do mundo que não possuem regulamentação. No Brasil, embora ainda não exista uma legislação específica, o Projeto de Lei PL 2726/2023 está em andamento, buscando estabelecer medidas para monitorar, controlar e remediar a contaminação por PFAS. Porém, caso entre em vigor alguma legislação para os PFAS, será um desafio que demandará investimentos e melhorias na infraestrutura de saneamento.

BIBLIOGRAFIA

ACAYABA, Raphael d'anna. **Segurança Hídrica: Um olhar sobre os impactos do uso e ocupação de solos sobre a qualidade de águas superficiais**. 2022. 75 f. Tese (Doutorado) - Doutorado em Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2022.

ABUNADA, Z., et al. An overview of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the environment: Source, fate, risk and regulations. **Water**, v. 12, n. 12, p. 3590, 2020.

APPLEMAN, T. D.; et al. Nanofiltration and Granular Activated Carbon Treatment of Perfluoroalkyl Acids. **J. Hazard. Mater.**, v. 260, p. 740-746, 2013.

BRASIL. Câmara dos Deputados. Projeto de Lei nº2.726 de 2023. Institui a política nacional de controle dos PFAS - substâncias perfluoroalquil e polifluoroalquil, e dá outras providências. 22 mai. 2023.

ESCHAUZIER, C.; et al. Impact of Treatment Processes on the Removal of Perfluoroalkyl Acids from the Drinking Water Production Chain. **Environ. Sci. Technol.**, v. 46, n. 3, p. 1708-1715, 2012.

COLOSI, Lisa M. et al. Peroxidase-mediated Degradation of Perfluorooctanoic Acid. **Environ. Toxicol. Chem.: An International Journal**, v. 28, n. 2, p. 264-271, 2009.

EPA - United States Environmental Protection Agency. **PFAS Analytical Methods Development and Sampling Research**. junho, 2024.

ITRC - Interstate Technology & Regulatory Council. **Regulamentação de substâncias Per e Polifluoroalquiladas**. Agosto de 2020.

INTERSTATE TECHNOLOGY AND REGULATORY COUNCIL (ITRC). **PFAS Fact Sheets**, 2022.

HAWLEY, E. L.; et al.. Remediation Technol. for Perfluorinated Compounds (PFCs), Including Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) and Perfluorooctanoic Acid (PFOA). **Pollut. Eng.**, v. 44, n. 5, p. 20-23, 2012.

KUCHARZYK, K. H.; et al. Novel treatment technologies for PFAS compounds: A critical review. **J. Environ. Manage.**, v.204, p.757-764, 2017.

KWON, B. G.; et al. Biodegradation of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) as an Emerging Contaminant. **Chemosphere**, v. 109, p. 221-225, 2014.

MITCHELL, S. M.; et al. Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Reactive Species Generated Through Catalyzed H₂O₂ Propagation Reactions. **Environ. Sci. Technol. Let.**, v. 1, n. 1, p. 117-121, 2014.

NTP - National Toxicology Program. **Monografia sobre Imunotoxicidade Associada à Exposição ao Ácido Perfluorooctanóico (PFOA) e Perfluorooctano Sulfonato (PFOS)**. 2016.

OCHOA-HERRERA, V.; et al. Reductive Defluorination of Perfluorooctane Sulfonate. **Environ. Sci. Technol.**, v. 42, n. 9, p. 3260-3264, 2008.

OLIVEIRA, S.C.;VON SPERLING, M. Análise da confiabilidade de estações de tratamento de esgotos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.12, p. 389-398, 2007.

RUIZ, A. S. **Análise da situação brasileira correlacionada ao cenário mundial na aplicação de técnicas de biodegradação em substâncias per e polifluoroalquil (PFAS)**. 2023. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de São Paulo, Santos, 2023.

SCHRÖDER, H. Fr et al. Biological Wastewater Treatment Followed by Physicochemical Treatment for the Removal of Fluorinated Surfactants. **Water Sci. Technol.**, v. 61, n. 12, p. 3208-3215, 2010.

SILVA, K. M. De S. **Descrição das tecnologias de tratamento de água no Brasil e suas distribuições por regiões no país**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, PB, 2020.

STEINLE-DARLING, E.; REINHARD, M.. Nanofiltration for Trace Organic Contaminant Removal: Structure, Solution, and Membrane Fouling Effects on the Rejection of Perfluorochemicals. **Environ. Sci. Technol.**, v. 42, n. 14, p. 5292-5297, 2008.

TAKAGI, S.; et al. Fate of Perfluorooctanesulfonate and Perfluorooctanoate in Drinking Water Treatment Processes. **Water research**, v. 45, n. 13, p. 3925-3932, 2011.

TANG, C. Y.; et al. Effect of Flux (transmembrane pressure) And Membrane Properties on Fouling and Rejection of Reverse Osmosis and Nanofiltration Membranes Treating Perfluorooctane Sulfonate Containing Wastewater. **Environ. Sci. Technol.**, v. 41, n. 6, p. 2008-2014, 2007.

ZHANG, S.; et al. Biotransformation potential of 6: 2 fluorotelomer sulfonate 6. **Chemosphere**, v. 154, p. 224-230, 2016.