

Analizando os PFAS: riscos, desafios e perspectivas

Raphael D'Anna Acayaba

Pesquisador do Cetea

Nanci Castanha da Silva

Pesquisadora do Cetea

As substâncias per-e polifluoralquil (PFAS) formam uma família de mais de 4.000 compostos amplamente utilizados em diversas áreas e aplicações, como surfactantes, retardantes de chama, espumas de combate a incêndios e pesticidas (OECD/Unep, 2018). Introduzidos no mercado na década de 1950, esses compostos são extremamente persistentes e têm se tornado onipresentes no meio ambiente devido ao seu uso intensivo (Podder *et al.*, 2021). Segundo Sunderland e colaboradores, os PFAS são considerados um dos contaminantes emergentes mais críticos, já que a exposição a essas substâncias está associada a efeitos adversos à saúde humana (Sunderland *et al.*, 2019).

Dentre as várias substâncias da família PFAS, o ácido perfluorooctanóico (PFOA) e o ácido perfluorooctanossulfônico (PFOS) foram os mais produzidos e estudados (Nakayama *et al.*, 2019; Stahl *et al.*, 2009). Devido ao seu alto potencial de bioacumulação, ampla utilização e persistência no meio ambiente, estudos indicam que cerca de 95% dos adolescentes e adultos nos Estados Unidos apresentam algum nível de contaminação por PFAS (Lewis *et al.*, 2015). Na União Europeia, foram adotadas medidas para reduzir a contaminação ambiental por esses compostos, com o objetivo de eliminar completamente a dependência das substâncias até 2030. Em 2000, a 3M, fabricante do PFOS, iniciou um processo gradual de eliminação voluntária da produção deste composto, o que foi concluído em 2002 (Podder *et al.*, 2021).

Os PFAS também estão amplamente presentes em diversos materiais de embalagem. O uso generalizado de PFAS em embalagens de alimentos tem sido identificado em diversos estudos. Testes realizados com caixas de fast-food, sacos plásticos e pacotes de pipoca para micro-ondas, por exemplo, revelaram níveis elevados desses compostos. Isto representa uma rota direta de exposição para os seres humanos, tornando-se um problema significativo de segurança alimentar e aumentando a preocupação sobre seus impactos a longo prazo na saúde humana (Sangkham, 2024; Zhang *et al.*, 2024).

Pesquisas indicam que a migração de PFAS a partir de sacos plásticos de armazenamento de alimentos com fecho hermético pode ocorrer de maneira rápida, com concentrações detectáveis após apenas duas horas de contato com simulante para alimentos ácidos, gordurosos e alcoólicos. Embora os níveis detectados em algumas análises estejam abaixo dos limites estabelecidos por órgãos reguladores, como a Autoridade Europeia para a Segurança Alimentar (EFSA), os PFAS ainda representam um risco devido à sua tendência de bioacumulação no organismo e persistência no ambiente. A EFSA estabeleceu uma ingestão máxima tolerável de 4,4 ng/kg de massa corpórea/semana para a soma de quatro PFAS, o que reforça a necessidade de controle rigoroso mesmo em níveis muito baixos de exposição (Stroski & Sapozhnikova, 2023).

Ainda, esses contaminantes estão amplamente distribuídos no meio ambiente e podem entrar na cadeia alimentar não só pela migração a partir de embalagens em contato direto com os alimentos, mas também pela exposição ambiental. Esses compostos já foram encontrados em produtos proteicos, como carnes e frutos do mar, e também em frutas, vegetais e alimentos processados. A ingestão oral é considerada a principal via de absorção dos PFAS pelo organismo humano (Zhang *et al.*, 2024). Os PFAS tendem a se acumular no fígado, e estudos epidemiológicos demonstraram a relação entre a exposição a esses contaminantes e o desenvolvimento de doenças hepáticas (Zhang *et al.*, 2024).

No entanto, avaliar com precisão a presença de PFAS nos alimentos e no meio ambiente ainda representa um grande desafio técnico. Os métodos analíticos atualmente disponíveis apresentam limitações importantes. As abordagens diretas, que quantificam individualmente os PFAS, enfrentam obstáculos devido à escassez de padrões analíticos comerciais para muitos compostos da classe (Megson *et al.*, 2025). Já os métodos indiretos, como o ensaio de precursores oxidáveis totais (TOP), buscam converter precursores em ácidos perfluorados mensuráveis, mas frequentemente não alcançam conversão completa, o que pode levar à subestimação da carga total de PFAS (Nikiforov, 2021; Shojaei *et al.*, 2022). Além disso, a análise de flúor total, que inclui as formas orgânicas e inorgânicas do elemento, exige uma separação eficiente das frações para evitar interferências na quantificação (Idowu *et al.*, 2025; Roesch *et al.*, 2024).

A preparação das amostras também representa um ponto crítico. Técnicas como a extração em fase sólida (SPE), amplamente empregadas, podem apresentar variações na recuperação dos analitos conforme o sorvente utilizado, impactando diretamente a precisão dos resultados (Boronow *et al.*, 2019; Forster *et al.*, 2023). Além disso, os instrumentos analíticos aplicados, como a cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas (LC-MS/MS) e a cromatografia de íons por combustão (CIC), apresentam sensibilidades distintas, o que contribui para discrepâncias entre estudos (Koch *et al.*, 2020). Soma-se a isso a ausência de padronização metodológica, que dificulta a comparação entre os dados obtidos em diferentes investigações e reforça a necessidade de aprimoramento técnico e normativo nesse campo.

Diante desse cenário, é essencial ampliar as pesquisas sobre a presença e os impactos dos PFAS em diferentes categorias de alimentos, garantindo uma avaliação mais precisa dos riscos associados à exposição humana a essas substâncias. Muitos especialistas sugerem a necessidade de uma abordagem mais abrangente para controlar a presença de PFAS nas embalagens de alimentos, defendendo a adoção de legislações mais rigorosas.

Com o objetivo de mitigar esse risco, o Regulamento (UE) 2025/40 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de dezembro de 2024, que dispõe sobre embalagens e resíduos de embalagens (*Packaging and Packaging Waste Regulation – PPWR*), estabeleceu limites para a presença de substâncias per-e polifluoroalquil (PFAS) em embalagens, especialmente aquelas destinadas ao contato com alimentos. A partir de 12 de agosto de 2026, será proibida a comercialização de embalagens que excedam os seguintes valores: 25 partes por bilhão (ppb) para qualquer PFAS individual detectado por análise direcionada (excluindo PFAS poliméricos); 250 ppb para a soma dos PFAS detectados por análise direcionada (também excluindo os poliméricos); e 50 partes por milhão (ppm) para o total de PFAS presentes, incluindo os de natureza polimérica. Essa medida visa reduzir a exposição humana a essas substâncias, reconhecidas por seus efeitos adversos mesmo em baixas concentrações (*Office of the European Union L- & Luxembourg*, n.d.).

Outra opção para mitigar os riscos dos PFAS está na busca por substitutos mais seguros. No entanto, essa transição é desafiadora devido à complexidade do cenário, pois os PFAS desempenham funções essenciais em diversas aplicações. Além disso, os compostos alternativos podem ser igualmente danosos à saúde humana e ao meio ambiente. Dessa forma, é fundamental que essa substituição seja conduzida de maneira estratégica e embasada em pesquisas sólidas, garantindo que as novas soluções sejam realmente seguras e eficazes. Considerando a persistência dos PFAS no meio ambiente e os potenciais riscos à saúde humana, é imprescindível que futuras alternativas sejam avaliadas com rigor científico para evitar consequências indesejadas (Ateia & Scheringer, 2024).

Um dos possíveis substitutos recentemente estudados são os ésteres de fosfato polifluoroalquil (PAPs), que, apesar de serem considerados uma alternativa promissora, também apresentam preocupações com seus impactos na saúde (Ao *et al.*, 2024). Embora esses substitutos não sejam isentos de riscos, é essencial continuar a pesquisa para identificar materiais seguros e sustentáveis que possam substituir os PFAS, especialmente em embalagens.

A longo prazo, é fundamental que a indústria busque alternativas mais seguras e que a regulamentação evolua para garantir a proteção da saúde humana e ambiental. A pesquisa por novos compostos e a implementação de soluções baseadas em “química responsável” são passos importantes na direção de um futuro sem os riscos associados aos PFAS.

Referências

- AO, J., TANG, W., LIU, X., AO, Y., ZHANG, Q., & ZHANG, J. (2024). Polyfluoroalkyl phosphate esters (PAPs) as PFAS substitutes and precursors: An overview. In *Journal of Hazardous Materials* (v. 464). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023>.
- ATEIA, M., & SCHERINGER, M. (2024). From “forever chemicals” to fluorine-free alternatives. In *Science (New York, N.Y.)* (V. 385, Issue 6706, pp. 256–258). <https://doi.org/10.1126/science.adq7784>

- BORONOW, K. E., BRODY, J. G., SCHAIER, L. A., PEASLEE, G. F., HAVAS, L., & COHN, B. A. (2019). Serum concentrations of PFASs and exposure-related behaviors in African American and non-Hispanic white women. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 29(2), 206–217. <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0109-y>.
- FORSTER, A. L. B., ZHANG, Y., WESTERMAN, D. C., & RICHARDSON, S. D. (2023). Improved total organic fluorine methods for more comprehensive measurement of PFAS in industrial wastewater, river water, and air. *Water Research*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119859>.
- IDOWU, I. G., EKPE, O. D., MEGSON, D., BRUCE-VANDERPUIJE, P., & SANDAU, C. D. (2025). A systematic review of methods for the analysis of total per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Science of The Total Environment*, 967, 178644. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178644>.
- KOCH, A., ARO, R., WANG, T., & YEUNG, L. W. Y. (2020). Towards a comprehensive analytical workflow for the chemical characterisation of organofluorine in consumer products and environmental samples. In *TrAC - Trends in Analytical Chemistry* (V. 123). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.02.024>.
- LEWIS, R. C., JOHNS, L. E., & MEEKER, J. D. (2015). Serum biomarkers of exposure to perfluoroalkyl substances in relation to serum testosterone and measures of thyroid function among adults and adolescents from NHANES 2011–2012. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6), 6098–6114. <https://doi.org/10.3390/ijerph120606098>.
- MEGSON, D., BRUCE-VANDERPUIJE, P., IDOWU, I. G., EKPE, O. D., & SANDAU, C. D. (2025). A systematic review for non-targeted analysis of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). In *Science of the Total Environment* (V. 960). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178240>.
- NAKAYAMA, S. F., YOSHIKANE, M., ONODA, Y., NISHIHAMA, Y., IWAI-SHIMADA, M., TAKAGI, M., KOBAYASHI, Y., & ISOBE, T. (2019). Trends in Analytical Chemistry Worldwide trends in tracing poly- and per fluoroalkyl substances (PFAS) in the environment. *Trends in Analytical Chemistry*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.02.011>.
- NIKIFOROV, V. A. (2021). Hydrolysis of FTOH precursors, a simple method to account for some of the unknown PFAS. *Chemosphere*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130044>.
- OECD/UNEP. (2018). Toward a new comprehensive global database of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs): Summary report on updating the OECD 2007 list of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs). *Organisation for Economic Co-Operation and Development*, n. 39. (39), 1–24.
- OFFICE OF THE EUROPEAN UNION L., P., & LUXEMBOURG, L. (n.d.). *Regulation (EU) 2025/40 of the European Parliament and of the Council of 19 December 2024 on packaging and packaging waste, amending Regulation (EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2019/904, and repealing Directive 94/62/EC (Text with EEA relevance)*. <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj>. Acessado em: 07/11/2025.
- PODDER, A., SADMANI, A. H. M. A., REINHART, D., CHANG, N. BIN, & GOEL, R. (2021). Per and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) as a contaminant of emerging concern in surface water: A transboundary review of their occurrences and toxicity effects. *Journal of Hazardous Materials*, 419(March), 126361. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126361>.
- ROESCH, P., SCHINNEN, A., RIEDEL, M., SOMMERFELD, T., SAWAL, G., BANDOW, N., VOGEL, C., KALBE, U., & SIMON, F. G. (2024). Investigation of pH-dependent extraction methods for PFAS in (fluoropolymer-based) consumer products: A comparative study between targeted and sum parameter analysis. *Chemosphere*, 351. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141200>.
- SANGKHAM, S. (2024). Global Perspective on the Impact of Plastic Waste as a Source of Microplastics and Per- and Polyfluoroalkyl Substances in the Environment. In *ACS ES and T Water* (V. 4, Issue 1, pp. 1–4). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.3c00607>.
- SHOJAEI, M., KUMAR, N., & GUELFO, J. L. (2022). An Integrated Approach for Determination of Total Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS). *Environmental Science and Technology*, 56(20), 14517–14527. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05143>.
- STAHL, T., HEYN, J., THIELE, H., HÜTHER, J., FAILING, K., GEORGII, S., & BRUNN, H. (2009). Carryover of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) and Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) from Soil to Plants. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 57(2), 289–298. <https://doi.org/10.1007/s00244-008-9272-9>.
- STROSKI, K. M., & SAPOZHNIKOVA, Y. (2023). Analysis of per- and polyfluoroalkyl substances in plastic food storage bags by different analytical approaches. *Journal of Chromatography Open*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.jcoa.2023.100106>.
- SUNDERLAND, E. M., HU, X. C., DASSUNCAO, C., TOKRANOV, A. K., WAGNER, C. C., & ALLEN, J. G. (2019). A review of the pathways of human exposure to poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) and present understanding of health effects. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 29(2), 131–147. <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0094-1>.
- ZHANG, J., HU, L., & XU, H. (2024). Dietary exposure to per- and polyfluoroalkyl substances: Potential health impacts on human liver. In *Science of the Total Environment* (V. 907). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167945>.