

Comparação da Remoção de PFAS em Sistemas de Tratamento de Lixiviados de Quatro Aterros Sanitários

Luís Marinheiro^{a,}, Inês Baptista^b, Andreia Nunes^b, Inês Carviçais^a, Ruben Jorge^b, Stefan Löblich^a*

^a AST – Soluções e Serviços de Ambiente, Rua do Bairro 400, 4485-010 Aveleda, Portugal

^b Wedotech, Rua do Seixal 108, 4000-521 Porto, Portugal

RESUMO

Os compostos per- e polifluoralquilos (PFAS) são uma família de mais de 4700 compostos químicos sintéticos usados numa vasta variedade de aplicações, mas que devido à sua persistência no ambiente e poder de bioacumulação, representam graves riscos para a saúde humana e ecossistemas. Neste estudo foi caracterizada a presença de PFAS em lixiviados de quatro aterros nacionais de resíduos não perigosos, e avaliada a eficiência dos processos de tratamento de lixiviados nestes locais. Os compostos PFBS (ácido perfluorobutanossulfónico) e PFHxA (ácido perfluorohexanóico) foram os PFAS mais frequentes e presentes em concentrações mais elevadas nos lixiviados avaliados. A comparação dos processos de tratamento de lixiviado permitiu concluir que o tratamento biológico e físico-químico convencional não é eficaz na remoção de PFAS em lixiviados (eficiência < 15%), enquanto a aplicação de osmose inversa demonstrou eficiência máxima com remoção dos PFAS detetados para valores inferiores ao limite de quantificação. Este estudo destaca que os lixiviados têm concentrações elevadas de PFAS, e que o seu tratamento deveria ser assegurado no aterro para evitar a disseminação desta contaminação de poluentes persistentes para a rede de saneamento.

Palavras-Chave: PFAS, lixiviado, aterro, osmose inversa, poluentes emergentes

doi: 10.22181/aer.2025.0205

* Autor para correspondência
E-mail: lmarinheiro@ast-ambiente.com

Comparison of Pfas Removal in Four Landfill Leachate Treatment Systems

Luís Marinheiro^{a,}, Inês Baptista^b, Andreia Nunes^b, Inês Carviçais^a, Ruben Jorge^b, Stefan Löblich^a*

^aAST – Soluções e Serviços de Ambiente, Rua do Bairro 400, 4485-010 Aveleda, Portugal

^bWedotech, Rua do Seixal 108, 4000-521 Porto, Portugal

ABSTRACT

Per- and polyfluoroalkyl compounds (PFAS) are a family of 4700 synthetic chemicals used in a wide range of applications, but due to their persistence in the environment and bioaccumulation power, they pose serious risks to human health and ecosystems. In this study, the presence of PFAS in leachate from 4 national non-hazardous waste landfills was characterised, and the efficiency of the leachate treatment processes at these sites was evaluated. The chemicals PFBS (perfluorobutanesulfonic acid) and PFHxA (perfluorohexanoic acid) were the most common PFAS, which were present in higher concentrations in the leachate assessed. The comparison of leachate treatment processes revealed that conventional biological and physicochemical treatment is not effective in removing PFAS in leachate (efficiency < 15%), while the application of reverse osmosis demonstrated maximum efficiency with the removal of detected PFAS below the quantification limit. This study highlights that landfill leachate can have high concentrations of PFAS, and that its treatment should be ensured at landfills to prevent the spread of this contamination of persistent pollutants into sewage systems.

Keywords: PFAS; leachate, landfill, reverse osmosis, emerging pollutants

doi: 10.22181/aer.2025.0205

* Corresponding author
E-mail: lmarinheiro@ast-ambiente.com

1 Introdução

Os compostos per- e polifluoralquilos (PFAS) são um grupo de mais de 4700 compostos químicos sintéticos que são usados desde a década de 1940s na fabricação de inúmeros produtos e bens de consumo (EEA, sd; Lenka et al., 2021). Estes compostos são caracterizados por conterem ligações carbono-flúor, que são muito estáveis e lhes conferem características muito desejáveis, como a estabilidade a elevadas temperaturas, serem impermeáveis e repelentes. São utilizados numa variedade de indústrias e produtos, incluindo setor têxtil, automóvel, tintas e vernizes, produtos de higiene pessoal, embalagens alimentares, utensílios de cozinha, equipamentos eletrônicos, espumas de combate a incêndios, entre muitos outros (ECHA, sd).

Os PFAS são conhecidos como “compostos eternos” por serem extremamente resistentes à degradação, persistindo e acumulando-se no ambiente durante décadas, mais do que qualquer outro composto sintético conhecido (EEA, 2019; ECHA, sd). Os PFAS têm sido detetados em solos, águas, lamas, sedimentos, e também em animais e seres humanos (EurEau, 2021). As principais fontes de exposição humana a PFAS são água e alimentos contaminados, e contacto com bens de consumo contendo PFAS (EEA, 2019). Estes compostos bioacumulam-se e são tóxicas, com impactos adversos reportados nos seres humanos ao nível de resposta imunológica, aparelho reprodutivo e desenvolvimento fetal, função renal e hepática, desregulação endócrina, aumento da incidência de certos cancros, entre outros (EEA, 2019; Coffin et al., 2022). Devido a este elevado risco de toxicidade, existe atualmente legislação europeia que impõe limites para PFAS na água para consumo humano (Diretiva EU 2020/2184) e alimentos (Diretiva EU 2022/2388).

A estratégia de combate à contaminação generalizado por PFAS tem passado pela proibição gradual da utilização destes compostos (EurEau, 2021). Em 2006 o PFOS (ácido perfluorooctanoanosulfónico) foi proibido na EU na sequência da Convenção sobre Poluentes Orgânicos Persistentes (POP), e em 2010 foi incluído no Regulamento POP da UE (reformulação 2019/2021), que desde 2020 também abrange o PFOA (Ácido perfluorooctanóico) e os seus precursores (Regulamento 2020/748). Estes regulamentos implicam que a produção, importação e utilização de PFOS, PFOA e seus precursores já não são permitidas na EU (EurEau, 2021). Estes são dois PFAS de cadeia mais longa (8 carbonos), e têm sido gradualmente substituídos por outros PFAS de cadeia mais curta, por supostamente apresentarem menor toxicidade, contudo persistem dúvidas sobre estes menores impactos (EurEau, 2021).

Os aterros sanitários de resíduos não perigosos recebem inúmeros resíduos que contêm PFAS (Coffin et al., 2022; Chen et al., 2023). A degradação dos resíduos nos aterros e infiltração de águas da chuva leva à formação de lixiviados, que têm de ser captados e devidamente tratados. Estes lixiviados são águas residuais muito complexas com elevada matéria orgânica e inúmeros outros componentes, onde se incluem os PFAS (Masoner et al., 2020). Com o maior conhecimento sobre a toxicidade e persistência dos PFAS, há uma preocupação crescente sobre o tratamento e destino destes compostos, em particular nos lixiviados de aterro devido ao potencial de contaminação de outras águas residuais e superficiais.

O presente estudo teve os seguintes objetivos:

- Caracterizar a concentração e tipos de PFAS presentes em lixiviados de 4 aterros sanitários de resíduos não perigosos nacionais.
- Comparar a eficiência de remoção de PFAS de diferentes processos de tratamento de lixiviados de aterro, nomeadamente tratamento convencional (biológico e físico-químico) e por osmose inversa.

2 Materiais e Métodos

2.1 Caracterização dos aterros selecionados

Neste estudo foram analisadas amostras de lixiviado bruto e lixiviado tratado provenientes de 4 aterros sanitários nacionais de resíduos não perigosos. Foram selecionados aterros com diferentes características, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1. Características dos aterros sanitários incluídos neste estudo

Instalação	Tipo de resíduos	Tempo em operação (anos)	Volume resíduos rececionados (ton/ano)	Situação	Origem do Lixiviado
Aterro 1	RU (+RINP no passado)	25	116.000	ativo	Aterro + CVO
Aterro 2	RU	8	163.000	ativo	Aterro
Aterro 3	RU	24	6.000	ativo (em encerramento)	Aterro + CVO
Aterro 4	RINP	11	108.000	ativo	Aterro

Legenda: RU – resíduos urbanos; RINP – Resíduos industriais não perigosos; CVO – Central de Valorização Orgânica

2.2 Amostragem e análises

Foram recolhidas amostras pontuais e simultâneas de lixiviado bruto e lixiviado tratado no ponto de descarga do processo de tratamento. A amostragem foi realizada em período de época seca. Os PFAS foram analisados por cromatografia líquida acoplada a espectrometria de massa (LC-MS) de acordo com o método acreditado US EPA 537, CEN/TS 15968 em laboratório externo, com pesquisa individual de 20 compostos. Os limites de quantificação (LQ) do método estavam no intervalo entre 0,3-2 ng/L para todos os PFAS pesquisados.

3 Resultados e Discussão

3.1 Caracterização de PFAS em lixiviados

A caracterização dos PFAS presentes no lixiviado de cada aterro avaliado é apresentada na Figura 1, onde estão apresentados os compostos que foram quantificados individualmente e o somatório dos respetivos PFAS quantificados.

Avaliando os PFAS individuais quantificados, verifica-se que o PFBS (ácido perfluorobutanossulfónico) e PFHxA (ácido perfluorohexanóico) são os que estavam presentes em concentrações superiores nos quatro lixiviados analisados (>1000 ng/L). Estes foram também os dois únicos PFAS quantificáveis nos lixiviados dos aterros 1 e 4.

O PFBS é um PFAS de cadeia curta que veio substituir o PFOS (Ácido perfluorooctanessulfónico), por ser considerado potencialmente menos tóxico, e é usado no fabrico de tintas, agentes de limpeza, tratamentos anti-manchas e revestimentos (EPA, 2023). O Lixiviado do aterro 1 apresenta uma concentração de PFBS de 86000 ng/L, uma concentração muito superior às registadas nos outros lixiviados avaliados (10x), e superior ao reportado na literatura cujo valor mais elevado identificado foi de 5510 ng/L (Solo-Gabriele *et al.*, 2019; Busch *et al.*, 2010). O facto deste aterro ter recebido resíduos industriais no passado, e a circunstância de se proceder, aplicando-se as boas práticas, à recirculação do concentrado de osmose para a massa de resíduos podem ser duas razões justificativas dessa observação. O PFHxA é um produto da degradação e/ou substituto de outros PFAS de cadeia longa (EPA, 2022). As concentrações obtidas para PFHxA foram semelhantes nos 4 lixiviados analisados, e também na gama valores reportados na literatura para aterros de RU (Solo-Gabriele *et al.*, 2019; Masoner *et al.*, 2020).

A presença de maior concentração de PFAS de cadeia curta (< 6 carbonos), como PFBS e PFHxA, reflete a tendência atual pela utilização de PFAS de cadeia mais curta em detrimento de outros de cadeias mais longas, considerados mais tóxicos (Chen et al., 2023). Destaca-se, no entanto, que os PFOS e PFOA de cadeia longa (8 carbonos), que foram banidos de utilização ao abrigo do regulamento POP, são ainda detetados nos lixiviados dos aterros 2 e 3.

Para os lixiviados dos aterros 2 e 3, foram quantificados 9 PFAS individuais, que estão presentes num perfil de concentração semelhante nestas duas instalações. O facto destes dois aterros receberem RU em exclusivo, pode justificar o facto do lixiviado ter um perfil idêntico de PFAS. Contudo, seria expectável encontrar menor concentração de PFOS e PFOA, que foram banidos de utilização ao abrigo do regulamento POP, no lixiviado do aterro 2 que é o mais recente, e maior no aterro 3 mais antigo, como tem sido a tendência reportada noutros estudos comparativos que avaliaram esta composição em função da idade do aterro (Chen et al., 2023).

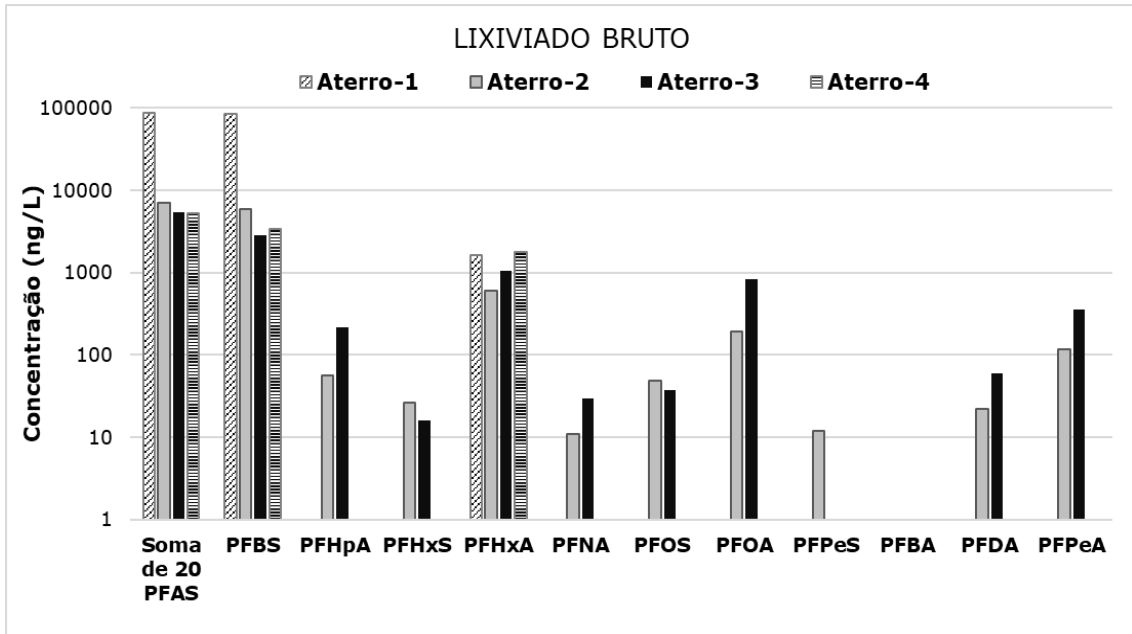


Figura 1. Resultados da caracterização de PFAS presentes nos lixiviados brutos de cada aterro. Eixo vertical apresentado em escala logarítmica. Nota: PFAS não representados são inferiores a limite de quantificação

3.2 Impacto do tratamento de lixiviados na remoção de PFAS

A descrição dos sistemas de tratamento de lixiviados instalados localmente em cada aterro, e o destino final do lixiviado após tratamento, são apresentados no Quadro 2. Os aterros 1 e 4 têm sistemas de tratamento com base em tecnologia de osmose inversa, e os aterros 2 e 3 têm sistemas de tratamento com base em processos de tratamento convencionais biológicos e físico-químicos.

Quadro 2. Processo de tratamento e destino do lixiviado de cada instalação

Instalação	Processo de tratamento de lixiviado	Destino do lixiviado tratado
Aterro 1	Lagoa de armazenamento -> tanque de pré-acidificação -> decantação -> unidade de osmose inversa	Reutilização interna + descarga em meio hídrico
Aterro 2	Lagoa com injeção de oxigénio -> tratamento biológico -> tratamento físico-químico com remoção de lamas	Coletor municipal
Aterro 3	Lagoa com injeção de oxigénio -> tratamento biológico -> tratamento físico-químico com remoção de lamas	Coletor municipal
Aterro 4	Tratamento biológico -> unidade de osmose inversa	Coletor municipal

A caracterização de PFAS nos lixiviados após tratamento local em cada aterro sanitário é apresentada na Figura 2. Verifica-se que não foram detectados PFAS quantificáveis nos lixiviados tratados (permeados) do aterro 1 e aterro 4, que foram tratados por osmose inversa. Para os lixiviados tratados nos aterros 2 e 3, foram quantificados no lixiviado tratado 6 e 8 PFAS individuais, respectivamente, que correspondem a um somatório de PFAS quantificáveis de 6090 ng/L e 4910 ng/L, respectivamente, mantendo-se o PFBS como o composto presente em concentração superior. A eficiência global de remoção de PFAS nos sistemas de tratamento destes dois aterros 2 e 3 foi inferior a 15%, o que demonstra que este tipo de tratamento não é eficaz na remoção destes poluentes dos lixiviados. Este resultado é coerente com um estudo comparativo de tecnologias de tratamento de lixiviados realizado em 20 aterros na Alemanha, que identificou a osmose inversa como o tratamento mais eficaz na remoção de PFAS, em comparação com adsorção por carvão ativado, nanofiltração, tratamento biológico, e oxidação por via húmida (Busch *et al.*, 2010).

Os lixiviados tratados dos aterros 2 e 3 são descarregados em coletor municipal e encaminhados para a respectiva estação de tratamento de águas residuais (ETAR) urbana. O encaminhamento de lixiviados para ETAR urbana pode contribuir de forma substancial para a concentração de PFAS nos afluentes de ETAR (Masoner *et al.*, 2020). Adicionalmente, estudos têm demonstrado que a maioria das ETAR com tratamentos biológicos exibe baixa remoção de PFAS, podendo até verificar-se casos de aumento da concentração durante tratamento devido às transformações que ocorrem ao longo do processo de tratamento (Lenka *et al.*, 2021; Loos *et al.*, 2012; Marinheiro e Löblich, 2022). Por este motivo, as ETAR têm sido apontadas como a principal fonte de entrada de PFAS no meio aquático (Loos *et al.*, 2012). Constata-se assim neste estudo que o tratamento convencional de lixiviados com base em processos biológicos e físico-químicos, não permite a remoção de PFAS e pode contribuir para a contaminação de afluentes de ETAR a jusante.

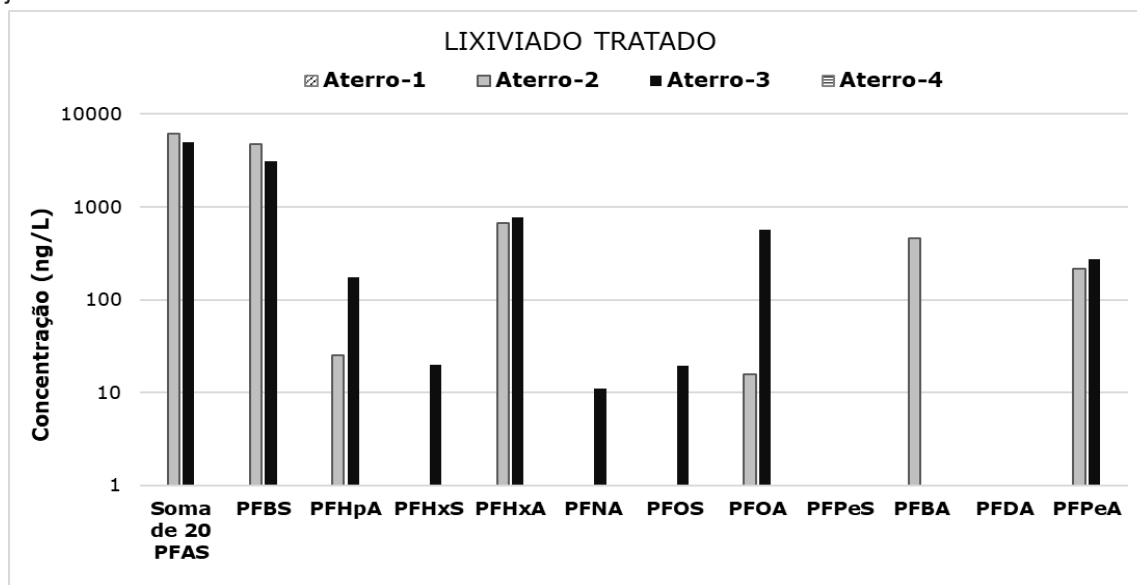


Figura 2. Resultados da caracterização de PFAS presentes nos lixiviados tratados de cada aterro. Eixo vertical apresentado em escala logarítmica. Nota: PFAS não representados são inferiores a limite de quantificação

4 Conclusões

Este estudo permitiu caracterizar a presença de um conjunto de PFAS em lixiviados de aterro de resíduos não perigosos, destacando-se a presença de PFBS e PFHxS como os mais persistentes e presentes em concentrações mais elevadas. A comparação dos processos de tratamento de lixiviado permitiu concluir que o tratamento biológico e físico-químico convencional não é eficaz na remoção de PFAS em lixiviados, enquanto a aplicação de osmose inversa permitiu atingir eficiência máxima com remoção de todos os PFAS detetados no lixiviado até valores não quantificáveis (<2 ng/L). Estes resultados demonstram que os lixiviados de aterros sanitários têm elevada concentração de PFAS, e destacam a importância de se assegurar o tratamento efetivo destes PFAS no respetivo aterro, para evitar a contaminação de outros cursos de água ou afluentes de ETAR a jusante com estes poluentes persistentes.

Agradecimentos

Os autores agradecem a colaboração das entidades gestoras dos quatro aterros sanitários que disponibilizaram as amostras de lixiviado para este estudo.

Referências

- Busch J., Ahrens L., Sturm R., Ebinghaus R. (2010). Polyfluoroalkyl compounds in landfill leachates. *Environmental pollution*, 158(5), 1467-1471. Doi: 10.1016/j.envpol.2009.12.031
- Chen Y., Zhang H., Liu Y., Bowden J. A., Tolaymat T. M., Townsend T. G., Solo-Gabriele, H. M. (2023). Evaluation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in leachate, gas condensate, stormwater and groundwater at landfills. *Chemosphere*, 318, 137903. Doi:10.1016/j.chemosphere.2023.137903
- Coffin, E. S., Reeves D. M., Cassidy D. P. (2022). PFAS in municipal solid waste landfills: Sources, leachate composition, chemical transformations, and future challenges. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 100418. Doi: 10.1016/j.coesh.2022.100418
- ECHA (sd). Substâncias perfluoroalquiladas (PFAS). ECHA – European Chemicals Agency. Acessível em <https://echa.europa.eu/pt/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas>.
- EEA (2019). Emerging chemical risks in Europe – ‘PFAS’. European Environmental Agency (EEA). Acessível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/emerging-chemical-risks-in-europe/emerging-chemical-risks-in-europe>
- EEA (sd). What are PFAS and how are they dangerous for my health? European Environmental Agency (EEA). Acessível em <https://www.eea.europa.eu/en/about/contact-us/faqs/what-are-pfas-and-how-are-they-dangerous-for-my-health>.
- EPA (2022). IRIS Toxicological Review of Perfluorohexanoic Acid (Pfhxa) and Related Salts. Environmental Protection Agency.
- EPA (2023). The EPA's January 2021 PFBS Toxicity Assessment Did Not Uphold the Agency's Commitments to Scientific Integrity and Information Quality. Report no. 23-E-0013, Environmental Protection Agency.
- EurEau (2021). PFAS and wastewater – Current knowledge for the European waster sector and the case for control-at-source. EurEau briefing note.
- Lenka S., Kah M., Padhye L. (2021). A review of the occurrence, transformation, and removal of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) in wastewater treatment plants. *Water Research*, 199 117187. Doi: 10.1016/j.watres.2021.117187

- Loos R., *et al.*, (2012). EU wide monitoring survey on wastewater treatment plant effluents. Joint Research Centre (JRC) Scientific and Policy Reports – European Commission.
- Marinheiro, L., Loblich, S. (2022). Tratamento Avançado de Chorume de Aterros Sanitários Urbanos e Industriais Para Remoção de Poluentes Emergentes. Waste Expo Brasil. São Paulo. 08 – 11 novembro 2022.
- Masoner J. R., *et al.*, (2020). Landfill leachate contributes per-/poly-fluoroalkyl substances (PFAS) and pharmaceuticals to municipal wastewater. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(5), 1300-1311. DOI: 10.1039/d0ew00045k
- Solo-Gabriele H., Jones A., Zhang H., Chen Y., Roca M. (2019). Characterization of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Landfill Leachate and Preliminary Evaluation of Leachate Treatment Processes. Report no. 11960. Hinkley Center for Solid and Hazardous Waste Management, University of Florida.