

## 1 Introdução

Esta ficha informativa fornece uma visão geral da caracterização de *sítios* onde foram liberadas PFAS no meio ambiente, assim como da ocorrência de PFAS em diferentes meios ambientes específicos. Maiores informações podem ser encontradas no Guia Técnico.

O objetivo não é apresentar princípios gerais de caracterização de *sítios*, mas destacar considerações únicas para esta família de contaminantes emergentes. Os princípios gerais de caracterização de *sítios* são semelhantes, tanto para PFAS quanto para qualquer outro contaminante, considerando que o ambiente físico, as especificidades de liberação, a proximidade dos receptores e as características do destino e transporte determinarão os pontos e requisitos de amostragem. A toxicidade, persistência, mobilidade, onipresença de PFAS, o grande número de compostos nesta família de substâncias químicas, variabilidade e incertezas referentes à substâncias específicas e seus critérios sendo regulamentados, bem como a natureza emergente das PFAS, devem ser consideradas no processo de caracterização de áreas contaminadas por PFAS. A Seção 10 do Guia Técnico tem como foco a água subterrânea e a identificação de fontes, mas também abrange os demais meios ambientais.

A ocorrência de PFAS em meios específicos é uma área ativa de pesquisa. O material apresentado nesta ficha informativa e na Seção 6 do Guia Técnico não é o resultado de uma revisão exaustiva da literatura, mas busca fornecer uma compreensão geral das ocorrências de PFAS. Como os métodos analíticos ainda estão sendo otimizados e padronizados, muitas vezes torna-se difícil comparar resultados entre os estudos, sendo que os dados reportados podem apresentar vários níveis de confiança. Os meios considerados na investigação de uma área contaminada geralmente incluem: ar, solo, sedimentos, água subterrânea, água superficial e biota.

## 2 Caracterização de Áreas Contaminadas - Questões Aplicáveis às PFAS

### Ciência e Regulamentos em Evolução

A ciência e o cenário regulatório continuam evoluindo. Portanto, muitos aspectos de PFAS, como toxicologia e comportamento no meio ambiente, amostragem e metodologias analíticas, e o ambiente regulatório, incluindo limites regulatórios e compostos de interesse, precisam sempre ser reavaliados durante a caracterização de uma área contaminada por PFAS. A Seção 11 do Guia Técnico aborda amostragem e análise para determinação de PFAS, e a Seção 8 inclui informações sobre regulamentações.

### Aspectos como Fontes, Destino e Transporte, assim como Outras Considerações

**Fontes:** a Seção 2.6 do Guia Técnico apresenta uma visão geral das fontes de PFAS. Além das principais fontes, que incluem lançamentos industriais e liberações de AFFF, existem também “fontes secundárias”, como por exemplo, fontes criadas através da dispersão de material contaminado em uma área que anteriormente não estava contaminada, ou em uma área onde processos físicos ou químicos concentraram PFAS (como por exemplo, deposição atmosférica ou interfaces entre diferentes meios).

**Visão histórica:** investigações anteriores podem não ter avaliado a contaminação por PFAS porque essas substâncias não eram regulamentadas até então, não eram consideradas contaminantes de interesse durante a investigação original, ou porque os métodos analíticos apropriados não estavam disponíveis na época. As plumas podem ser extensas, levando anos para desenvolverem-se antes de serem descobertas ou investigadas.

O ITRC desenvolveu uma série de fichas informativas que resumem a ciência recente e tecnologias emergentes referentes às PFAS. As informações apresentadas nesta ficha informativa e em outras sobre PFAS encontram-se descritas em maiores detalhes no **ITRC PFAS Technical and Regulatory Guidance Document (Guia Técnico)** (<https://pfas-1.itrcweb.org/>).

Esta ficha inclui os seguintes aspectos:

- Considerações referentes à caracterização de áreas contaminadas por PFAS;
- Informações resumidas sobre a ocorrência de PFAS em diferentes meios ambientes específicos.

## Substâncias Per- e Polifluoroalquiladas (PFAS): Caracterização de Áreas Contaminadas e Ocorrência de PFAS em Meios Ambientes *cont.*

*Rotas:* PFAS podem estar presentes ou migrar através de rotas que normalmente não são seguidos por outros compostos. Por exemplo, PFAS podem estar presentes na água subterrânea de um *sítio* como resultado da deposição atmosférica oriunda de uma fonte externa, sem que existam fontes de PFAS na área em questão.

*Transições complexas entre meios:* o comportamento de PFAS no meio ambiente pode divergir muito dos contaminantes típicos. As transições entre meios podem ser complexas devido às características específicas dessas substâncias.

*Particionamento:* PFAS se ligarão a solos e sedimentos através do particionamento hidrofóbico, eletrostático e interfásico. No entanto, a ligação de PFAS ao carbono orgânico não é tão forte quanto em compostos hidrofóbicos tradicionais (por exemplo, PCBs, PAHs), então acredita-se que Koc isoladamente provavelmente não seja o fator principal para prever a ligação de PFAS ao carbono orgânico. Devem-se tomar os cuidados necessários para obter os valores Koc mais atualizados. Devido à importância dos mecanismos de partição eletrostática ou interfásica, pode ser recomendado avaliá-los em vários *sítios*. A seção 4 do Guia Técnico inclui informações sobre as propriedades físicas e químicas de substâncias PFAS.

*Equilíbrio de prioridades:* uma vez que a água potável é uma importante via de exposição para PFAS e as plumas geradas podem ter se dispersado para áreas de jusante, pode ser dada prioridade ao gerenciamento das vias de exposição associadas à água potável em vez de caracterização do *sítio*.

*Estabelecimento de pontos de monitoramento:* os investigadores devem estar atentos às maneiras pelas quais o estabelecimento dos pontos de monitoramento pode influenciar os resultados da amostragem, como por exemplo, poços antigos com fita de fluoropolímero.

*Amplo uso:* como o uso de produtos contendo PFAS é generalizado, podem haver múltiplas fontes em uma determinada área que, possivelmente, atuam como fontes adicionais de PFAS em um determinado *sítio*. Além disso, PFAS são frequentemente detectadas em concentrações baixas em amostras de locais sem uma fonte óbvia. Talvez seja necessário avaliar os valores de fundo de origem antropogênica específicos do *sítio* visando determinar as contribuições na água subterrânea ou no solo que não são oriundas da fonte investigada. Ver, por exemplo, Strynar et al. (2012).

*Conjunto de compostos:* a seleção de um amplo conjunto de substâncias para serem analisados pode ser útil para aplicações como *fingerprinting* (se houver suspeita de múltiplas fontes) ou para compreender o processo da degradação de precursores. Deve-se observar que, com os métodos analíticos atualmente disponíveis, é possível que, mesmo considerando um conjunto amplo de substâncias, não haja detecção de todas as PFAS.

*Heterogeneidade geológica:* devido aos baixos limites regulamentadores utilizados para delimitar os impactos na água subterrânea e à mobilidade física de determinadas PFAS, deve-se prestar atenção especial à compreensão dos efeitos da heterogeneidade hidrogeológica sobre a pluma presente na água subterrânea.

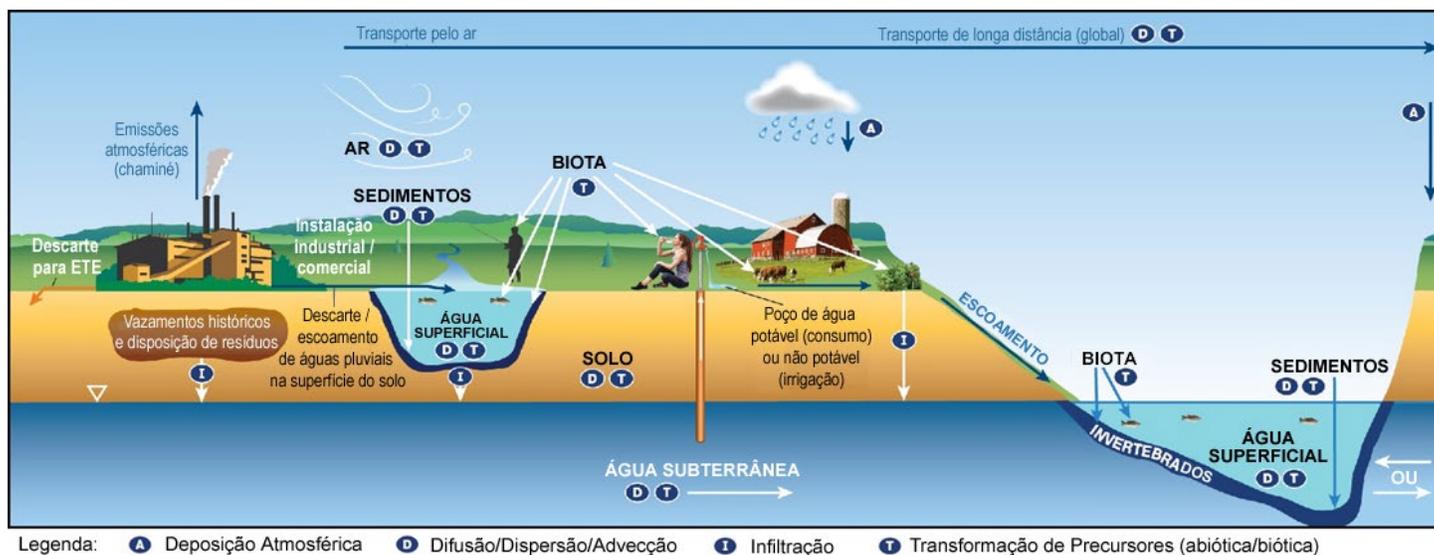
### Modelo Conceitual Inicial da Área (MCA)

Modelos conceituais são ferramentas úteis para apresentação e avaliação das características do *sítio*, despejo de produtos químicos no meio ambiente, destino e transporte de contaminantes e vias de exposição, sendo que esses modelos podem ajudar no foco da investigação de uma área. A **Figura 1** mostra um exemplo de um modelo conceitual generalizado de um *sítio* industrial.

O modelo apresenta as áreas-fonte mais conhecidas de PFAS, além dos mecanismos e vias de transporte em um contexto físico simplificado. Também estão ilustradas as vias e receptores de exposição. O desenvolvimento do modelo é um processo iterativo ao longo do projeto, ao qual são gradualmente incorporadas as informações obtidas durante as atividades de investigação da área, avaliação de riscos, elaboração do projeto de remediação e implementação e otimização de medidas remediadoras.

Desafios específicos do desenvolvimento de modelos conceituais para *sítios* contaminados por PFAS e relacionados à identificação da natureza e extensão dos impactos, incluem, por exemplo, casos em que corpos d'água superficiais criam plumas muito extensas na água subterrânea diluídas pelo processo de recarga (ATSDR 2008), assim como à identificação de potenciais receptores ecológicos e humanos no contexto de avaliações baseadas em risco de PFAS.

# Substâncias Per- e Polifluoroalquiladas (PFAS): Caracterização de Áreas Contaminadas e Ocorrência de PFAS em Meios Ambientes *cont.*



**Figura 1 - Modelo conceitual geral de uma área industrial**

Fonte: Adaptada de L. Trozzolo, TRC. Usada com permissão. PFAS-1, Figura 2-20.

## Investigação de Áreas Contaminadas

### **Desenvolvimento de um Plano de Trabalho para Investigação de Áreas Contaminadas**

Os planos de trabalho referentes a investigações de PFAS devem levar em consideração o modelo conceitual inicial e uma avaliação preliminar abrangente do *sítio*, bem como incorporar informações e conceitos aplicáveis apresentados no Guia Técnico. Esses itens incluem: procedimentos e equipamentos de amostragem para evitar contaminação cruzada, métodos analíticos, compostos a serem reportados, garantia/controle de qualidade, requisitos e critérios regulatórios geograficamente variáveis e em processo de alteração, contexto ambiental específico do *sítio*, avaliação de risco ecológico e/ou à saúde humana e potenciais tecnologias de tratamento.

Além disso, a avaliação do meio geológico e hidrogeológico associado ao *sítio* é crítica e, pode ser necessário que seja abordado em escala regional, uma vez que os impactos oriundos de PFAS podem estender-se a distâncias significativas da área.

Deverão ser consideradas técnicas de investigação adequadas para caracterizar os solos da fonte e determinar a extensão tridimensional da contaminação no solo e água subterrânea. As tecnologias de caracterização de alta resolução de áreas contaminadas, enquanto fornecem informações litológicas e hidrológicas subsuperficiais quase em tempo real, também podem ser usadas para obter com eficiência amostras discretas de água subterrânea nos intervalos de interesse, como por exemplo, zonas de alta transmissividade e interfaces litológicas.

Os principais fatores a serem considerados no desenvolvimento de um plano de trabalho incluem: lixiviação a partir da zona vadosa para a zona saturada, difusão pela matriz, dessorção, dissolução de líquidos em fase não aquosa (NAPL), fontes externas ao *sítio*, deposição atmosférica, escoamento superficial, descarga de água subterrânea para águas superficiais ou descarga da água subterrânea para corpos d'água superficiais, características da subsuperfície, incluindo linhas de utilidade pública, misturas multicomponentes, e os precursores de PFAS que podem estar presentes.

Como no caso de outros compostos, a investigação de um *sítio* focada na presença de PFAS depende da compreensão da natureza das fontes, bem como sua extensão lateral e vertical. Em algumas áreas, observou-se que plumas de PFAS de cadeia mais curta e mais móveis são relativamente mais extensas do que as plumas de PFAS de cadeia mais longa, devido ao menor índice de retardamento em água subterrânea. O comportamento do particionamento de substâncias PFAS está abordado na Seção 5.2 do Guia Técnico. Além disso, a mistura de outros contaminantes além das PFAS pode impactar a extensão da contaminação por PFAS.

# Substâncias Per- e Polifluoroalquiladas (PFAS): Caracterização de Áreas Contaminadas e Ocorrência de PFAS em Meios Ambientes *cont.*

---

## **Análise e Interpretação de Dados**

Exemplos de fatores e processos que precisam ser avaliados através de abordagens, métodos e ferramentas disponíveis que podem ser relevantes para áreas contaminadas por PFAS que estão disponíveis no Guia Técnico são: coeficientes de retardamento e tempo de deslocamento, fluxo de massa/descarga de massa, contribuições de diferentes fontes, deposição atmosférica, percolação na zona vadosa, difusão através da matriz, contribuições de áreas a montante, caminhos e taxas de transformação, avaliação da estabilidade da pluma, modelagem do destino e transporte de PFAS e métodos de visualização.

## **Forense e Identificação de Fontes**

A identificação de fontes é um dos desafios em investigações envolvendo PFAS. Quando não há fontes documentadas ou possivelmente existem várias fontes

combinadas, podem ser necessárias múltiplas linhas de evidência para identificação de fontes (também conhecida como análise forense de PFAS). A identificação de fontes tenta utilizar a avaliação de análises químicas típicas e avançadas para diferenciar, potencialmente, fontes de contaminantes e eventos envolvendo vazamentos ou derramamentos que ocorreram no passado. Continuam a ser desenvolvidas técnicas avançadas como: *fingerprinting* químico, substâncias químicas do tipo *signature*, *fingerprinting* isotópico, modelos de transporte de contaminantes, diagnóstico molecular das proporções de pares de determinados compostos, datação por radionuclídeos e análise microscópica.

## **3 Ocorrência de PFAS em Diferentes Meios Ambientes Específicos**

A ocorrência de PFAS em diversos meios ambientais é uma área ativa de pesquisa. O material apresentado no Guia Técnico não é o resultado de uma revisão completa da literatura, mas está incluído para fornecer uma compreensão relativa das concentrações de PFAS normalmente encontradas em meios ambientais. A seção 6 do Guia Técnico inclui figuras que resumem as concentrações observadas de PFAS que vêm sendo reportadas na literatura. A Seção 17.1 inclui tabelas que resumem detalhes importantes referentes a cada estudo utilizado no desenvolvimento das figuras.

### **Ar**

Determinadas PFAS são encontradas no meio atmosférico, em concentrações elevadas ou em níveis esperados para áreas urbanas próximas às fontes de emissão, como por exemplo, plantas industriais, ETEs, instalações de treinamento de bombeiros e aterros (Barton et al. 2006 Ref#241; Ahrens et al. 2011; Liu et al. 2015 Ref#340). Embora o ar externo contendo PFAS possa adentrar edifícios, a presença de fontes internas pode fazer com que as concentrações de certos PFAS no ar interno sejam superiores às concentrações no ar externo (Fromme et al. 2015; Shoeib et al. 2011).

### **Precipitação**

Substâncias PFAS também foram detectadas na precipitação e em outros meios associados, incluindo águas pluviais, neve superficial e subsuperficial, gelo marinho e água de degelo. As concentrações de PFAS na precipitação variam em muitas ordens de grandeza (Casas et al. 2021; Pike et al. 2020; Xie et al. 2020; Chen et al. 2019 Ref#2413; MacInnis et al. 2019; Wang et al. 2019 Ref#2415).

### **Solo, Sedimento e Biossólidos**

As PFAS são encontradas em solo e sedimentos devido à deposição atmosférica, exposição a meios impactados (por exemplo, lixiviado de aterro ou biossólidos) e liberações diretas ao meio ambiente. A distribuição de PFAS no solo é complexa, refletindo vários fatores específicos da área como carbono orgânico total (TOC), cargas na superfície de partículas e interfaces entre fases. As propriedades de PFAS individuais, como por exemplo, o comprimento da cadeia alquílica e grupo funcional terminal, também são fatores importantes. Normalmente, PFOS, PFOA e outros PFCA de cadeia longa são as PFAS predominantes identificadas em solos superficiais e sedimentos (Zhu et al. 2019; Rankin et al. 2016; Strynar et al. 2012). A detecção de substâncias PFAS em biossólidos é frequente nos Estados Unidos em uma ampla gama de concentrações, podendo ser oriundas de fontes municipais, residenciais ou industriais, ou de uma combinação dessas fontes (consultar a ficha informativa sobre Biossólidos e PFAS do ITRC encontrada em <https://pfas-1.itrcweb.org/fact-sheets/>).

# Substâncias Per- e Polifluoroalquiladas (PFAS): Caracterização de Áreas Contaminadas e Ocorrência de PFAS em Meios Ambientes *cont.*

## Água Subterrânea

A USEPA reuniu uma extensa base de dados sobre a ocorrência de seis ácidos perfluoroalquilados (PFAA) no suprimento público de água potável, através do monitoramento de grandes sistemas de abastecimento no âmbito do programa UCMR3 (USEPA 2017 Ref#933). Um ou mais PFAA foram detectados em 4% dos sistemas de abastecimento públicos reportados (USEPA 2017 Ref#920). As fontes de água subterrânea tiveram aproximadamente o dobro da taxa de detecção das fontes de água superficial (Hu et al. 2016). Os dados de ocorrência na água subterrânea, levantados como parte de estudos nacionais e internacionais, também caracterizaram a faixa de concentrações de PFAS associadas a áreas nas quais essas substâncias foram liberadas no meio ambiente.

## Água Superficial

As concentrações de PFAS em águas doces, marinhas e pluviais geralmente dependem da proximidade do ponto de liberação dessas substâncias e das concentrações encontradas na fonte. Além das liberações associadas a fontes identificadas, o escoamento superficial de águas pluviais pode gerar uma carga significativa de PFAS em corpos d'água superficiais devido a fontes não pontuais (Wilkinson et al. 2017; Zushi e Masunaga 2009). A sorção de PFAS a sólidos suspensos pode afetar as concentrações de PFAS em águas superficiais. Os microplásticos em suspensão também podem influenciar as concentrações de PFAS em águas superficiais (Llorca et al. 2018). Além do ácido perfluorooctano sulfônico (PFOS) e do ácido perfluorooctanóico (PFOA), muitas outras PFAS foram observadas em águas superficiais, incluindo compostos além dos ácidos perfluoroalquilados (PFAA).

## Biota

Uma vez que as substâncias PFAS são de ampla distribuição e têm propensão à bioconcentração, estas têm sido frequentemente encontradas em peixes, animais selvagens e seres humanos. Os PFAA, especialmente o PFOS, são frequentemente as PFAS predominantes detectadas em biota (Houde et al. 2011). As concentrações de PFAA em biota são influenciadas pela taxa de absorção e eliminação de PFAA e seus precursores, bem como pelas taxas de biotransformação dos precursores de PFAA (Asher et al. 2012; Gebbink, Bignert e Berger 2016). Portanto, as concentrações de PFAA observadas na biota de um determinado local podem não refletir as concentrações presentes em outros meios ambientes.

## 4 Referências e Acrônimos

As referências citadas nesta ficha informativa e em outros documentos podem ser encontradas em <https://pfas-1.itrcweb.org/references/>. Números de referência estão incluídos nesta ficha informativa para citações não exclusivas na lista de referência do Guia Técnico.

Os acrônimos utilizados nesta ficha informativa e no Guia Técnico podem ser encontrados em <https://pfas-1.itrcweb.org/acronyms/>.



## Substâncias Per e Polifluoroalquiladas (PFAS) - Contatos

**Sandra Goodrow** • New Jersey Department of Environmental Protection  
609-940-4164 • [Sandra.Goodrow@dep.nj.gov](mailto:Sandra.Goodrow@dep.nj.gov)

**Kristi Herzer** • Vermont Department of Environmental Conservation  
802-461-6918 • [Kristi.Herzer@vermont.gov](mailto:Kristi.Herzer@vermont.gov)

Setembro de 2023



**ITRC**  
1250 H St. NW, Suite 850  
Washington, DC 20005  
[itrcweb.org](http://itrcweb.org)

