



GUIA TÉCNICO-CONCEITUAL
CONTAMINANTES EMERGENTES

GUIA DE CONTAMINANTES EMERGENTES (CE)

DEFINIÇÕES, CONCEITOS E IMPLICAÇÕES
NO GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS

Guia técnico-conceitual orientativo voltado
à compreensão dos contaminantes emergentes
no contexto da gestão ambiental e
gerenciamento de áreas contaminadas.



DEFINIÇÕES
E CONCEITOS



FONTES, DESTINO
E TRANSPORTE



RISCOS À
SAÚDE HUMANA



AMOSTRAGEM
E ANÁLISES



LEGISLAÇÃO
E REFERÊNCIAS



AESAS

Associação Brasileira das Empresas de
Consultoria e Engenharia Ambiental



CONHECIMENTO TÉCNICO
QUE **GERA CONFIANÇA**
E **PROTEGE** O MEIO AMBIENTE
E A SOCIEDADE



JULHO DE 2026

Guia de Contaminantes Emergentes (CE)

Definições, conceitos e implicações no gerenciamento de áreas contaminadas

Guia técnico-conceitual orientativo voltado à compreensão dos contaminantes emergentes no contexto da gestão ambiental e gerenciamento de áreas contaminadas

Julho/2026

Sumário

1	OBJETIVO DO PRESENTE GUIA	1
2	ESCOPO E LIMITAÇÕES	1
3	CONCEITOS GERAIS DE CONTAMINANTES EMERGENTES (CE)	2
4	QUAIS OS TIPOS DE CONTAMINANTES EMERGENTES	6
4.1	MICROPLÁSTICOS.....	6
4.1.1	O QUE SÃO	6
4.1.2	FONTES, DESTINO E TRANSPORTE	6
4.1.3	RISCOS À SAÚDE HUMANA	8
4.1.4	AMOSTRAGEM.....	9
4.1.5	MÉTODO DE ANÁLISE.....	11
4.1.6	LEGISLAÇÃO	11
4.2	FÁRMACOS E HORMÔNIOS.....	13
4.2.1	O QUE SÃO	13
4.2.2	FONTES, DESTINO E TRANSPORTE	15
4.2.3	RISCOS À SAÚDE HUMANA	17
4.2.4	AMOSTRAGEM.....	21
4.2.5	MÉTODOS DE ANÁLISE.....	21
4.2.6	LEGISLAÇÃO	22
4.3	PESTICIDAS.....	24
4.3.1	O QUE SÃO	24
4.3.2	FONTES, DESTINO E TRANSPORTE	26
4.3.3	RISCOS À SAÚDE HUMANA	29
4.3.4	AMOSTRAGEM.....	31
4.3.5	MÉTODOS DE ANÁLISES	31
4.3.6	LEGISLAÇÃO	32
4.4	PRODUTOS DE USO PESSOAL (PCPS).....	33
4.4.1	O QUE SÃO	33
4.4.2	FONTES, DESTINO E TRANSPORTE	34
4.4.3	PRINCIPAIS RISCOS À SAÚDE HUMANA	36
4.4.4	AMOSTRAGEM.....	37
4.4.5	MÉTODOS DE ANÁLISES	38
4.4.6	LEGISLAÇÃO	40
4.5	PFAS	41
4.5.1	O QUE SÃO:.....	41
4.5.2	FONTES, DESTINO E TRANSPORTE	42
4.5.3	RISCOS À SAÚDE HUMANA	43
4.5.4	AMOSTRAGEM.....	44
4.5.5	MÉTODOS DE ANÁLISES	44
4.5.6	LEGISLAÇÃO	45
4.6	OUTROS POPS.....	46
4.6.1	O QUE SÃO	46
4.6.2	FONTES, DESTINO E TRANSPORTE	47
4.6.3	RISCOS À SAÚDE HUMANA	49
4.6.4	AMOSTRAGEM.....	50
4.6.5	MÉTODOS DE ANÁLISE	51

4.6.6	LEGISLAÇÃO	52
5	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	53
6	REFERÊNCIAS -	54
	PARTICIPANTES NA ELABORAÇÃO DO GUIA	55

Lista de tabelas

Tabela 1 - Principais classes de Contaminantes Emergentes (CE)	4
Tabela 2 – Visão geral das principais classes terapêuticas dos fármacos.....	14
Tabela 3 – Principais Fontes de Contaminação por Fármacos	17
Tabela 4 – Compostos legislados no Brasil e pela US EPA.....	40

1 OBJETIVO DO PRESENTE GUIA

Este documento foi elaborado com o objetivo de consolidar, de forma estruturada, informações técnicas sobre contaminantes emergentes relevantes no contexto ambiental.

O conteúdo apresentado reflete o estágio atual de conhecimento científico e busca contribuir para a compreensão desses contaminantes, incluindo suas fontes, comportamento e aspectos gerais relacionados à investigação e aos métodos analíticos.

Trata-se de um documento de caráter orientativo, desenvolvido a partir da contribuição de profissionais atuantes na área, com a finalidade de subsidiar discussões técnicas e apoiar a tomada de decisão, sem estabelecer requisitos normativos ou diretrizes obrigatórias.

2 ESCOPO E LIMITAÇÕES

Este documento possui caráter exclusivamente orientativo, ou seja, as informações aqui apresentadas não estabelecem normas, padrões, critérios obrigatórios ou diretrizes obrigatórias, tampouco substituem a legislação vigente, normas técnicas aplicáveis ou diretrizes emitidas por órgãos ambientais competentes.

As abordagens relacionadas à investigação, amostragem e análise são apresentadas em nível conceitual e não configuram protocolos operacionais, procedimentos executivos ou metodologias analíticas padronizadas.

Sempre que aplicável, recomenda-se a utilização de métodos reconhecidos por organismos nacionais e internacionais, bem como a consulta a guias técnicos específicos e referências atualizadas aplicáveis a cada grupo de substâncias.

A inclusão de substâncias neste documento não implica, necessariamente, recomendação da investigação sistemática, obrigatoriedade de monitoramento ou caracterização automática de impacto ambiental, devendo sua avaliação ser realizada de forma contextualizada, considerando as características da área, o modelo conceitual, as potenciais vias de exposição e os objetivos do estudo.

3 CONCEITOS GERAIS DE CONTAMINANTES EMERGENTES (CE)

Os Contaminantes Emergentes (CE) compreendem uma vasta gama de substâncias químicas (sintéticas ou naturais) e agentes biológicos que, embora não sejam rotineiramente monitorados, apresentam potencial de ingresso nos ecossistemas e capacidade de causar efeitos adversos, confirmados ou suspeitos, à saúde humana e ao equilíbrio ecológico.

É fundamental destacar que o termo "emergente" não se refere, necessariamente, a moléculas de síntese recente. Na maioria dos casos, esses compostos já estavam presentes no meio ambiente, sendo o que efetivamente "emerge" é a percepção de risco associada à sua ocorrência, persistência e potencial de impacto ambiental, impulsionada pelo avanço do conhecimento científico e regulatório.

Essa mudança de paradigma foi impulsionada pela evolução das técnicas analíticas. Enquanto métodos anteriormente disponíveis operavam, predominantemente, em escala de partes por milhão (mg/L ou ppm), as tecnologias atuais permitem a detecção de compostos em concentrações muito inferiores, como partes por bilhão ($\mu\text{g/L}$ ou ppb) e até partes por trilhão (ng/L ou ppt).

O aumento da sensibilidade analítica possibilitou identificar a presença persistente de compostos, como determinados pesticidas, fármacos e produtos de uso pessoal, em matrizes ambientais anteriormente consideradas não impactadas, ampliando a compreensão sobre fontes potenciais de exposição, persistência e mecanismos de transporte desses contaminantes.

Além do avanço analítico, a crescente atenção dedicada aos contaminantes emergentes também decorre de fatores como:

- Toxicidade crônica: geração de evidências relacionadas a efeitos adversos anteriormente pouco compreendidos, incluindo desregulação endócrina, bioacumulação e potenciais efeitos mutagênicos em baixas concentrações.
- Novas rotas de exposição: identificação de substâncias capazes de resistir, parcial ou totalmente (ex: resíduos de fármacos e produtos de higiene pessoal) aos processos convencionais de tratamento em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) e de Água (ETA), favorecendo sua presença em diferentes compartimentos ambientais.

Para fins de investigação e diagnóstico, uma substância é frequentemente classificada como contaminante emergente quando apresenta um ou mais das seguintes características:

- Persistência: elevada resistência à degradação biológica, química ou fotolítica no meio ambiente ou em sistemas de tratamento.
- Bioacumulação: capacidade de se acumular em tecidos vivos e apresentar potencial de biomagnificação ao longo da cadeia trófica.
- Toxicidade: potencial de causar danos biológicos mesmo em dosagens extremamente baixas.
- Lacuna regulatória: ausência de padrões legais consolidados de emissão, remediação ou potabilidade.

Devido à complexidade no entendimento dos mecanismos de transporte, transformação, destino ambiental e possíveis efeitos sinérgicos desses compostos, muitos valores de referência e critérios de segurança ainda se encontram em desenvolvimento ou em processo de consolidação, tanto no âmbito nacional quanto internacional.

A simples detecção analítica de uma substância, entretanto, não implica, isoladamente, risco à saúde humana, dano ambiental ou necessidade automática de intervenção. A interpretação técnica deve considerar fatores como concentração, biodisponibilidade, persistência, mobilidade, vias de exposição e contexto ambiental avaliado.

A Tabela 1, apresenta as principais classes de contaminantes emergentes, exemplos representativos, fontes potenciais de aporte no meio ambiente e riscos associados.

Tabela 1 - Principais classes de Contaminantes Emergentes (CE)			
Classe	Exemplos	Fontes principais	Riscos associados
Microplásticos	• Polietileno • Poliestireno • Fibras sintéticas	Roupas, embalagens, cosméticos, fragmentação de plásticos	Bioacumulação, efeitos físicos e químicos em organismos
Fármacos e hormônios	• Antibióticos (amoxicilina) • Analgésicos (ibuprofeno) • Hormônios sintéticos (etinilestradiol)	Esgoto doméstico e descarte inadequado de medicamentos	Resistência antimicrobiana, efeitos no sistema endócrino, toxicidade aquática
Pesticidas e metabólitos	• Glifosato • Neonicotinoides • 2,4-D	Atividades agrícolas, lixiviação, pulverização	Toxicidade para polinizadores e organismos aquáticos
Produtos de uso pessoal (PCP)	• Triclosan • Parabenos • Benzofenonas	Cosméticos, cremes, xampus, filtros solares	Disfunções hormonais e bioacumulação
Produtos industriais	• PFAS • BPA	Embalagens, plásticos, resíduos industriais, espumas anti-incêndio, tecidos impermeáveis, painéis	Câncer, hepatotoxicidade e persistência ambiental e neurotoxicidade

Dentre os contaminantes emergentes, destacam-se aquelas substâncias conhecidas por sua capacidade de interferir no sistema endócrino de diferentes espécies animais, incluindo o ser humano, mesmo em concentrações baixas.

Esses compostos podem ser de origem artificial (como os xenoestrogênios) ou natural (como os fitoestrogênios) e são denominados interferentes ou desreguladores endócrinos.

Uma definição amplamente adotada, proposta pela USEPA considera como desreguladores endócrinos as substâncias capazes de alterar a estrutura ou a função do sistema endócrino, resultando em efeitos adversos sobre organismos, suas descendências ou populações.

Os mecanismos de ação desses compostos são diversos e podem envolver:

- Mimetização hormonal: atuação semelhante à dos hormônios naturais, ativando respostas biológicas indevidas.
- Alteração da sensibilidade hormonal: estímulo à formação de receptores hormonais, aumentando a sensibilidade dos organismos às interações hormonais.
- Bloqueio de receptores celulares: impedindo a ligação dos hormônios naturais aos seus respectivos receptores.
- Aceleração da síntese e secreção hormonal: interferência nos processos de produção e liberação de hormônios naturais.
- Interferência enzimática: inibição ou modificação da atividade de enzimas envolvidas na regulação hormonal.
- Comprometimento da capacidade dos hormônios em interagir com os receptores celulares: alteração da capacidade da interação entre hormônios e receptores celulares.

Estudos científicos têm associado a exposição a determinados desreguladores endócrinos a potenciais efeitos adversos, incluindo alterações reprodutivas, distúrbios hormonais e possíveis impactos sobre processos de desenvolvimento e crescimento em diferentes organismos.

Nesse contexto, o aumento da detecção de contaminantes emergentes no meio ambiente, aliado à ampliação do conhecimento sobre seus mecanismos de ação e potenciais efeitos biológicos, reforça a importância do aprofundamento técnico-científico acerca de suas propriedades físico-químicas, comportamento ambiental, principais fontes de introdução no ambiente e interações com diferentes matrizes ambientais.

4 QUAIS OS TIPOS DE CONTAMINANTES EMERGENTES

4.1 Microplásticos

4.1.1 O que são

Microplásticos correspondem a polímeros sintéticos ou semissintéticos que vêm despertando crescente preocupação ambiental em razão do aumento contínuo da poluição plástica no meio ambiente. Resíduos plásticos provenientes de diferentes fontes sofrem processo de fragmentação física, química e biológica, originando partículas cada vez menores que podem alcançar solo, água superficiais, sedimentos, ambientes marinhos e, potencialmente, organismos vivos, incluindo o ser humano.

De acordo com a faixa de tamanho das partículas, existem várias definições para o termo Microplásticos (MP). A mais utilizada se refere a esses materiais como partículas de polímeros orgânicos sintéticos com tamanho inferior a 5 mm. Essa definição foi proposta em 2009 pela *National Oceanic and Atmospheric Administration Home* (NOAA) e, desde então, a maioria das publicações tem a adotado como referência. Após um pouco mais de uma década, em 2020, foi publicada o relatório intitulado “*Plastics – Environmental Aspects – State of Knowledge and Methodologies*” (ISO/TR 21960:2020), em que o termo MP é definido como qualquer partícula plástica sólida insolúvel em água com dimensões entre 1 µm e 1000 µm. A norma também define o termo “*large microplastic*” (microplástico grande, em tradução livre), para a faixa de tamanho de 1 a 5 mm.

4.1.2 Fontes, destino e transporte

Os microplásticos podem ser introduzidos no meio ambiente por diferentes fontes, incluindo:

- descarte inadequado de resíduos plásticos;
- disposição de resíduos em lixões e aterros;
- desgaste de pneus;
- utilização de produtos de higiene pessoal e cosméticos contendo microesferas poliméricas;
- lavagem de tecidos sintéticos com liberação de fibras poliméricas;
- aporte de microfibras e microesferas no esgoto e entrada na estação de tratamento de esgoto (ETE);

- lançamento do esgoto diretamente no ambiente, sem nenhum tratamento;
- transporte de MP pelo ar na poeira de ambientes internos;
- transporte de MP pelo ar em ambientes externos via deposição seca e úmida;
- utilização de filmes plásticos na agricultura;
- perda logística nas atividades industriais com a utilização de pellets;
- uso de materiais plásticos em atividades pesqueiras; e
- desgaste de pinturas e revestimentos de embarcações.

Além do transporte hídrico, partículas de microplásticos também podem ser dispersas pela atmosfera, tanto em ambientes internos quanto externos, por meio de poeira, deposição seca e deposição úmida.

Após serem liberados para o meio ambiente, quando em contato direto com compostos tóxicos (contaminantes) presentes no ambiente, estes podem ser absorvidos ou adsorvidos junto a estrutura dos microplásticos. O processo de absorção é caracterizado pela entrada do poluente por entre as cadeias poliméricas, enquanto a adsorção ocorre quando o poluente se fixa na superfície da partícula. Ambas as situações resultam no mesmo fim, onde as partículas plásticas se comportam como vetores químicos, transportando e, eventualmente, liberando os contaminantes ao meio ambiente novamente.

Como consequência, os microplásticos podem atuar como vetores de transporte de contaminantes químicos e biológicos e, eventualmente, liberando esses contaminantes ao meio ambiente novamente.

Entre os principais contaminantes associados aos microplásticos destacam-se:

- compostos orgânicos como ftalatos, bisfenol A (BPA), éteres difenílicos polibromados, PCB, pesticidas, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) e dioxinas;
- compostos inorgânicos: metais;
- microrganismos: incluindo patógenos e espécies invasoras associadas à formação de biofilmes.

Adicionalmente, os próprios aditivos utilizados na fabricação de materiais plásticos podem ser liberados gradualmente ao meio ambiente durante os processos de degradação.

Os rios são considerados as principais fontes de poluição por microplásticos, uma vez que transportam grande parcela dos microplásticos advindos do ambiente terrestre até o ambiente

marinho. Entretanto, deve ser considerado que parte destes poluentes podem adentrar na cadeia trófica ou ainda ser alocados no sedimento destes ambientes, especialmente em pontos com menor turbulência das águas, como reservatórios. Assim, os ecossistemas de água doce desempenham fundamental papel na compreensão deste tipo de poluição. Estas evidências demonstram a importância de trabalhos que investiguem a poluição por microplásticos em corpos hídricos superficiais.

Nesse contexto, ecossistemas de água doce assumem importância estratégica para a compreensão dos mecanismos de transporte, deposição e transferência trófica associados aos microplásticos.

4.1.3 Riscos à saúde humana

Pelo fato de estarem presentes em corpos hídricos, os MP são amplamente ingeridos pela biota, direta ou indiretamente via cadeia alimentar, desde os plânctons até grandes vertebrados como tartarugas, aves marinhas, mamíferos aquáticos e peixes. Sua biodisponibilidade depende de fatores como tamanho, densidade e cor, que determinam em que compartimento aquático (superfície, coluna d'água ou sedimentos) eles afetam os organismos.

Devido à resistência à degradação, os MP podem bioacumular nos tecidos e biomagnificar ao longo dos níveis tróficos. Registros no Brasil, como no litoral do Rio Grande do Sul, mostram elevada presença de MPs em tartarugas (>70%) e aves marinhas (>95%). Evidências também foram encontradas em pinguins da Antártica, revelando a dispersão global dessas partículas.

A ingestão desses MP pela biota representa não apenas efeitos físicos (obstrução, sufocamento, estresse), mas também fisiológicos (alterações hormonais, distúrbios enzimáticos, impactos na reprodução e crescimento), ampliando os riscos ecológicos e de saúde associados à poluição por plásticos.

Os impactos nos organismos incluem:

- obstrução do trato digestivo, perda de apetite e dificuldade de locomoção;
- alteração comportamental,
- estresse fisiológico;
- efeitos inflamatórios;
- alterações reprodutivas;

- presença em brânquias de crustáceos e em sistemas circulatórios, causando lesões celulares;
- efeitos imunotóxicos observados em estudos in vitro.

Em seres humanos, a exposição poder principalmente por:

- ingestão de alimentos, sobretudo em peixes processados (ex.: sardinhas enlatadas), porém os MPs também têm sido encontrados em diversos alimentos presentes na dieta humana, como mel, sal, cerveja, vinho, refrigerante, leite, entre outros, estimando-se uma ingestão semanal de 0,1 a 5 g de MP por pessoa.
- inalação de partículas suspensas no ar, com estimativa de 170 partículas/dia em adultos, embora os efeitos respiratórios ainda sejam pouco compreendidos.

No contexto de áreas contaminadas, a exposição também pode ocorrer por meio de águas subterrâneas impactadas, especialmente em cenários associados à lixiviação de resíduos sólidos ou disposição inadequada de materiais plásticos. Nesses casos, potenciais vias de exposição incluem:

- consumo de água subterrânea;
- irrigação agrícola;
- transferência trófica;
- contato indireto com recursos ambientais impactados.

Embora exista crescente preocupação científica acerca dos possíveis efeitos dos microplásticos sobre a saúde humana, muitos mecanismos toxicológicos, níveis de exposição relevantes e efeitos crônicos ainda se encontram em processo de investigação e consolidação científica.

4.1.4 Amostragem

A amostragem de microplásticos pode ser realizada em diferentes matrizes ambientais, incluindo água, solo, sedimentos e organismos vivos, devendo considerar os objetivos do estudo, as características do meio e as limitações analíticas.

De forma geral, recomenda-se a adoção de medidas que minimizem contaminações externas e garantam a integridade das amostras.

- Águas superficiais

Os procedimentos de coleta de amostras de água variam conforme a profundidade dos objetivos da investigação. De forma geral, a amostragem de microplásticos pode ser realizada por duas abordagens principais: sem redução do volume *in situ* ou com redução do volume *in situ*.

No método sem redução do volume *in situ*, as amostras de água são coletadas diretamente em recipientes apropriados, armazenadas e posteriormente processadas em laboratório. Já o método com redução do volume *in situ* consiste na concentração das partículas durante a própria etapa de coleta, podendo ser realizado manualmente por meio do uso de uma peneira ou rede de mão, preferencialmente associadas a medidores de vazão de água (fluxômetro) e, quando aplicável, acopladas a embarcações motorizadas.

Outra metodologia que pode ser empregada utiliza bombas de sucção com apoio de gerador portátil. Essa abordagem apresenta vantagens importantes, como a possibilidade de obtenção de diferentes tamanhos de malha acoplados à saída da bomba, possibilitando a coleta de partículas em distintas faixas granulométricas.

- Solo e sedimento

As amostras de solo e sedimento superficiais podem ser coletadas manualmente com o auxílio de utensílios metálicos, como espátulas, pás, colheres e pinças. Para a amostragem de microplásticos em profundidade, normalmente são empregados equipamentos específicos para esse tipo de matriz ambiental, como trados, dragas e amostradores do tipo *corer* (*gravity corer*, *box corer*). Após a coleta, as amostras são submetidas a peneiramento granulométrico utilizando malha de diferentes aberturas, conforme os objetivos do estudo e a faixa granulométrica de interesse. Esses procedimentos podem ser realizados tanto *in situ* quanto no laboratório.

- Amostras vivas

Para a verificação da presença de microplásticos em organismos vivos, a coleta dos espécimes deve seguir protocolos pré-estabelecidos, de forma a garantir a integridade dos tecidos e estruturas biológicas de interesse até o momento da análise. Nesses casos, é importante assegurar a preservação do conteúdo estomacal e intestinal, bem como das condições bioquímicas e moleculares relacionadas aos principais *endpoints* (indicadores de resposta) avaliados nos estudos ecotoxicológicos. Assim, recomenda-se que os organismos sejam preparados e preservados o mais rapidamente possível após a coleta, minimizando alterações biológicas que possam comprometer a qualidade e a representatividade analítica das amostras.

4.1.5 Métodos de análise

O método conhecido como “Vermelho do Nilo” é amplamente utilizado para a identificação de microplásticos em amostras ambientais, baseando-se na coloração seletiva das partículas plásticas e na posterior análise por técnicas de imagem. Outro método frequentemente utilizado é a Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy – FTIR*), utilizada para caracterização química e identificação dos polímeros presentes nas amostras.

A aplicação desses e de outros métodos analíticos deve considerar as características da matriz investigada, os objetivos do estudo, os limites analíticos requeridos e as limitações laboratoriais existentes, sendo recomendada a utilização de protocolos reconhecidos e previamente validados.

Detalhes operacionais específicos, incluindo preparo de amostras, volumes analisados, condições analíticas e critérios de controle de qualidade, devem seguir referências técnicas aplicáveis e não constituem objeto deste documento.

4.1.6 Legislação

- União Europeia (UE)
 - ✓ Regulamento (UE) 2023/2055 (REACH): desde 17 de outubro de 2023, restringe microplásticos sintéticos (menores que 5 mm, insolúveis e degradáveis) adicionados intencionalmente em produtos como cosméticos, detergentes, glitter, fertilizantes, dispositivos médicos, tinta e superfícies esportivas. Há prazos de transição específicos conforme tipo de produto.
 - ✓ Processo legislativo sob REACH: iniciado em 2018 pela ECHA, foi aprovado em 2023 com expectativa de evitar a liberação de meio milhão de toneladas de microplásticos ao longo de 20 anos.
 - ✓ Diretiva-Quadro para Estratégia Marinha (MSFD): inclui microplásticos como categoria de lixo marinho sob o descriptor D10, sendo uma das primeiras legislações a tratar o tema diretamente.

- Tratado Global da ONU para Poluição Plástica
- Em curso, negociado por cerca de 175 países desde 2022. Visa estabelecer compromisso legal para redução da poluição por plásticos em todo o ciclo de vida, incluindo microplásticos.
- Convenção da Basileia
 - ✓ Emenda de 2019 incluiu resíduos plásticos como categoria regulada no controle transfronteiriço de resíduos perigosos, reforçando a gestão ambiental adequada do lixo plástico.
- Proibição de microesferas (*microbeads*)
 - ✓ Vários países já proibiram microesferas plásticas em produtos de higiene pessoal:
 - Estados Unidos: via Microbead-Free Waters Act (2015).
 - Outros países: Canadá, Reino Unido, Itália, França, Nova Zelândia, Coreia do Sul, Suécia, entre outros.
- Regiões específicas – Mediterrâneo
 - ✓ Convenção de Barcelona e seu Plano Regional de Gestão de Lixo Marinho (2013) buscam combater poluição plástica na região do Mediterrâneo.
- Legislação no Brasil

Atualmente, o Brasil ainda não possui legislação específica consolidada aplicável exclusivamente aos microplásticos.

Existem Projetos de lei em tramitação, sendo eles:

- ✓ PL 260/2024 (Senado): propõe metas para remoção de microplásticos e poluentes endócrinos de águas potáveis e residuais, inserindo diretrizes no Marco Legal do Saneamento.
- ✓ PL 2524/2022 (Congresso): estabelece metas de reuso e reciclagem de plástico descartável dentro de um modelo de economia circular.

Leis e normas aplicáveis de forma indireta

- ✓ Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010 + Decreto 10.936/2022): aplica-se ao ciclo de vida do plástico e logística reversa, servindo como base legal para futuros controles sobre microplásticos.

O Brasil participa das negociações do Tratado Global da ONU sobre Poluição Plástica e, de forma geral, tem defendido abordagem baseada em: economia circular, responsabilidade compartilhada, transição justa e instrumentos juridicamente vinculantes.

Entretanto, determinados temas, especialmente relacionados à limitação global da produção de plásticos, permanecem objeto de debate internacional e de divergências entre países participantes.

4.2 Fármacos e Hormônios

4.2.1 O que são

Os Fármacos constituem uma classe de contaminantes de crescente preocupação em escala global. De forma geral, podem ser definidos como medicamentos ou ingredientes farmacêuticos ativos (IFAs) utilizados tanto na medicina humana, quanto veterinária. Esses compostos vêm sendo reconhecidos como substâncias de preocupação ambiental não apenas pelas características frequentemente associadas aos Contaminantes Emergentes (CE), como persistência, potencial toxicidade e ausência de padrões regulatórios consolidados para diversas matrizes ambientais, mas também em razão de sua introdução contínua no meio ambiente.

Eles podem ser entendidos como compostos sintéticos amplamente utilizados como itens de consumo, incluindo tanto medicamentos terapêuticos quanto cosméticos, comumente encontrados em todo o mundo. Em uma perspectiva mais ampla, fármacos são compostos biologicamente ativos empregados para prevenir, curar ou tratar doenças. A definição de fármacos neste contexto abrange uma vasta gama de substâncias, refletindo a diversidade de produtos farmacêuticos disponíveis e utilizados globalmente.

Os fármacos encontrados como CE pertencem a diversas classes terapêuticas, cada uma com suas próprias características e potenciais impactos ambientais. Em águas subterrâneas ao redor do mundo, foram detectados antibióticos, anti-inflamatórios não esteroides (AINE), medicamentos para controle de natalidade e muitos outros medicamentos prescritos. De forma geral, os produtos farmacêuticos podem incluir vários tipos de medicamentos, tais como antibióticos (ex. sulfonamidas, tetraciclina, penicilinas, β -lactâmicos, fluoroquinolonas, imidazóis), anti-inflamatórios e analgésicos (ex. ibuprofeno, paracetamol, diclofenaco), hormônios (estrone, etinilestradiol, progesterona), medicamentos anticâncer, antiepiléticos (ex.

carbamazepina), antidepressivos (ex. benzodiazepínicos) e β -bloqueadores (ex. metoprolol, atenolol, propranolol), e são encontrados em todos os ecossistemas, e suas concentrações variam em função da sazonalidade, localidade, condições socioeconômicas e gerenciamento sanitário.

A Tabela 2 abaixo, apresenta uma visão geral das principais classes terapêuticas de fármacos encontradas como contaminantes emergentes. Além dos medicamentos prescritos e de venda livre, estimulantes como a cafeína e a nicotina, bem como drogas recreativas, também podem ser encontrados em águas subterrâneas, ampliando o escopo das substâncias consideradas na avaliação da contaminação por fármacos.

Tabela 2 – Visão geral das principais classes terapêuticas dos fármacos	
Classe Terapêutica	Exemplos
Antibióticos	Sulfametoxazol, Ciprofloxacino, Amoxicilina
Anti-inflamatórios Não Esteroides (AINEs)	Ibuprofeno, Diclofenaco, Naproxeno
Betabloqueadores	Propranolol, Atenolol
Psicoativos	Fluoxetina, Carbamazepina
Hormônios	Estradiol, Etinilestradiol, Testosterona
Antidepressivos	Sertralina, Venlafaxina
Antiepiléticos	Carbamazepina, Fenitoína
Analgésicos	Paracetamol, Codeína
Estimulantes	Cafeína, Nicotina

- Classe dos Hormônios

Os hormônios representam uma classe de contaminantes farmacêuticos de elevada relevância ambiental devido à sua intensa atividade biológica, mesmo em concentrações muito baixas. Muitos desses compostos são classificados como desreguladores endócrinos (DE), em razão da sua capacidade de interferir no sistema endócrino de organismos vivos.

Os desreguladores endócrinos podem atuar alterando mecanismos hormonais naturais, afetando processos fisiológicos relacionados ao crescimento, desenvolvimento, metabolismo e reprodução.

Entre os diferentes hormônios identificados como contaminantes ambientais, destacam-se aqueles associados a potenciais efeitos adversos sobre organismos aquáticos e, potencialmente, sobre a saúde humana em cenários de exposição crônica.:

- ✓ Hormônios Estrogênicos (Femininos): São os mais estudados e que possuem os fatores de risco mais altos devido a ações negativas conhecidas, como alterações na capacidade de reprodução humana e de outros animais como peixes. Entre eles podemos observar as seguintes subclasses:
 - Estrona (E1): Hormônio natural produzido principalmente após a menopausa.
 - Estradiol (17 β -Estradiol, E2): O estrogênio mais potente, produzido nos ovários.
 - Estriol (E3): Hormônio natural produzido durante a gravidez.
 - Etinilestradiol (EE2): Hormônio sintético presente na maioria dos contraceptivos orais. É particularmente persistente e potente.
- ✓ Hormônios Androgênicos (Masculinos):
 - Testosterona: Hormônio natural.
 - Androstenediona: Precursor de testosterona e estrogênios.
- ✓ Outros Hormônios:
 - Progesterona: Hormônio relacionado à gestação.
 - Hormônios tireoidianos e seus análogos: Embora menos comuns como contaminantes em efluentes de origem humana direta, alguns compostos industriais ou pesticidas podem mimetizar ou interferir na função da tireoide.

4.2.2 Fontes, destino e transporte

No Brasil, a contaminação por fármacos representa uma preocupação crescente devido aos impactos sobre a biodiversidade aquática e a saúde pública. Estudos recentes demonstram a presença desses compostos em águas residuais, águas superficiais, águas subterrâneas e até mesmo em água destinada ao consumo humano em diversas regiões do país. Além disso, a expansão do mercado farmacêutico brasileiro implica maior potencial de introdução desses compostos no meio ambiente.

Diversos estudos têm sido conduzidos no Brasil para investigar a ocorrência de contaminação por fármacos. Na Bacia Amazônica, pesquisas detectaram cerca de 40 fármacos em importantes rios, como o Amazonas, Negro, Tapajós e Tocantins, em concentrações capazes de afetar uma grande proporção das espécies aquáticas locais. Córregos e tributários urbanos que deságuam no Rio Amazonas apresentaram elevada ocorrência de fármacos, incluindo analgésicos,

psicoestimulantes, antidiabéticos, antibióticos e anti-inflamatórios. Um estudo pioneiro na América Latina identificou a presença de metformina, medicamento utilizado no tratamento do diabetes, em águas superficiais da Amazônia. Na Região Metropolitana de São Paulo, pesquisas avaliaram os medicamentos mais consumidos, fornecendo indicativos do potencial de liberação desses compostos nos corpos d'água locais.

Uma revisão de estudos conduzidos no Brasil apontou hormônios, antibióticos e o triclosan como substâncias prioritárias para o estabelecimento de padrões de qualidade da água voltados à proteção da vida aquática. Na Baía de Santos, um estudo detectou sete fármacos, além de cocaína e seu principal metabólito, em amostras de água do mar. No estado de Santa Catarina, outra investigação identificou nove compostos em águas costeiras, incluindo cafeína, diclofenaco, atenolol, losartana, paracetamol e cocaína.

A contaminação por fármacos no meio ambiente é um fenômeno complexo, resultante de diversas atividades humanas. Uma das principais fontes é a excreção humana. Após a ingestão de medicamentos, nem sempre o corpo absorve completamente os compostos ativos, e uma porção é excretada na urina e nas fezes. Esses resíduos acabam chegando aos sistemas de esgoto e, posteriormente, às estações de tratamento de águas residuais. O descarte inadequado de medicamentos vencidos ou não utilizados é outra via significativa de contaminação. Jogar medicamentos no lixo pode levar à contaminação do solo e da água através do lixiviado gerado em aterros sanitários. Da mesma forma, descartar medicamentos no vaso sanitário ou na pia pode contaminar sistemas sépticos, águas subterrâneas e águas superficiais, especialmente porque as estações de tratamento de águas residuais (ETAR) convencionais não são projetadas para remover eficientemente muitos ingredientes farmacêuticos ativos (IFA). Consequentemente, esses IFA podem passar pelos sistemas de tratamento e serem descarregados em corpos d'água superficiais.

As próprias estações de tratamento de águas residuais (ETAR) são consideradas pontos de descarga de fármacos no ambiente. As tecnologias de tratamento tradicionalmente implementadas nas ETAR são projetadas para remover poluentes convencionais, como sólidos suspensos e compostos orgânicos biodegradáveis, mas muitas vezes não são eficazes na remoção de IFA. Em alguns casos, efluentes de ETAR que recebem descarga de instalações de fabricação de produtos farmacêuticos podem apresentar concentrações de fármacos até 10 a 1.000 vezes maiores do que efluentes de outras ETAR. Adicionalmente, as atividades agrícolas e pecuárias

também contribuem para a contaminação por fármacos. O uso de medicamentos veterinários em animais pode levar à liberação de resíduos no solo e na água através do esterco. Quando o esterco contendo resíduos de fármacos é utilizado como fertilizante em lavouras, pode ocorrer a contaminação do solo e até mesmo a absorção desses compostos pelas culturas alimentares. A aquicultura também é uma fonte de antibióticos em águas costeiras, devido ao uso de medicamentos para controlar doenças em criações marinhas.

Em regiões com sistemas de saneamento precários, o esgoto não tratado representa uma importante fonte de contaminação por fármacos. A falta de tratamento adequado do esgoto leva à liberação direta de fármacos e seus metabólitos em rios, lagos e águas costeiras. Mesmo em áreas com tratamento de esgoto, a descarga de efluentes contendo IFA pode contaminar águas subterrâneas, que por sua vez podem ser uma fonte de fármacos em águas costeiras.

A Tabela 3 a seguir, resume as principais fontes de contaminação por fármacos e suas respectivas vias de entrada no ambiente.

Tabela 3 – Principais Fontes de Contaminação por Fármacos	
Fonte de Contaminação	Via de Entrada no Ambiente
Excreção Humana	Sistemas de esgoto, ETAR, águas superficiais
Descarte Inadequado de Medicamentos	Lixiviado de aterros sanitários, sistemas sépticos, águas subterrâneas, ETAR, águas superficiais
Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR)	Descarga de efluentes contendo IFA em águas superficiais
Indústria Farmacêutica	Descarga de efluentes industriais em ETAR ou diretamente no ambiente
Agricultura e Pecuária	Uso de medicamentos veterinários, aplicação de esterco como fertilizante, aquicultura
Esgoto Não Tratado	Descarga direta em águas superficiais e costeiras, contaminação de águas subterrâneas

4.2.3 Riscos à saúde humana

Os produtos farmacêuticos são desenvolvidos para interagir com receptores biológicos específicos, sendo absorvidos e biodisponibilizados no organismo. Desta forma, os compostos

farmacologicamente ativos apresentam estruturas químicas complexas, com ampla variedade de composição e massas moleculares. Em sua maioria, são compostos polares, frequentemente contendo mais de um grupo ionizável, enquanto alguns também podem apresentar propriedades lipofílicas, solubilidade moderada em água e características quirais, podendo apresentar comportamentos distintos nos organismos vivos.

Após a ingestão, os fármacos podem sofrer transformações metabólicas, incluindo reações de hidrólise, redução e oxidação, que modificam o composto original. Como consequência, parte do ingrediente farmacêutico ativo (IFA) pode ser excretada sem alterações ou apenas parcialmente metabolizada.

Considerando essas características, um dos principais riscos associados à presença de fármacos no ambiente é o desenvolvimento de resistência antimicrobiana. A ocorrência de antibióticos em águas e solos pode favorecer a seleção de bactérias resistentes, tornando determinadas infecções mais difíceis de tratar.

Outro aspecto relevante é o potencial de desregulação endócrina, semelhante ao observado em outros contaminantes emergentes. Alguns fármacos, especialmente hormônios e substâncias com atividade hormonal, podem interferir no sistema endócrino de organismos vivos, estando associados a alterações reprodutivas, distúrbios hormonais e possíveis efeitos sobre o desenvolvimento.

Fármacos anticâncer presentes no ambiente também representam preocupação relevante devido ao seu potencial citotóxico, mutagênico, teratogênico e embriotóxico. Alguns desses compostos podem atravessar a barreira hematoencefálica e causar efeitos teratogênicos (malformações estruturais ou funcionais em fetos) e embriotóxicos, sendo especialmente perigosos para mulheres grávidas.

Outros organismos também podem ser impactados pela presença de fármacos no ambiente. Betabloqueadores e compostos psicoativos, por exemplo, podem provocar alterações neurocomportamentais e reprodutivas em diferentes espécies. O propranolol, um betabloqueador amplamente utilizado, já demonstrou efeitos sobre o crescimento e desenvolvimento de algas, mortalidade em crustáceos e alterações no desenvolvimento embrionário em peixes.

A exposição a múltiplos fármacos, mesmo em baixas concentrações, também representa motivo de preocupação. Os efeitos associados a misturas complexas ainda não são

completamente compreendidos, podendo ocorrer interações entre compostos capazes de potencializar efeitos adversos. Além disso, alguns estudos indicam que determinados fármacos podem apresentar potencial de bioacumulação em organismos vivos, ampliando a preocupação relacionada à exposição crônica.

A exposição humana pode ocorrer por meio do consumo de água contaminada e de alimentos que absorveram esses compostos do ambiente. A persistência de resíduos farmacêuticos em matrizes ambientais está diretamente relacionada, entre outros fatores, à deficiência ou ausência de tratamento adequado de águas residuais. Outra via importante de exposição está relacionada ao processo de biomagnificação (aumento progressivo) ao longo da cadeia trófica, possibilitando a ingestão indireta desses compostos por meio do consumo de vegetais, peixes, carnes e outros alimentos contaminados

A complexidade dos impactos associados à contaminação por fármacos reforça a necessidade de aprofundamento técnico-científico acerca dos efeitos da exposição prolongada a baixas concentrações desses compostos em diferentes organismos e ecossistemas. A classe dos hormônios apresenta mecanismos específicos de ação nos organismos vivos e, entre as principais preocupações ambientais associadas a essa classe de contaminantes, destaca-se sua capacidade de atuar como desreguladores endócrinos. Considerando esse mecanismo de ação, os principais efeitos associados a esses compostos incluem:

- **Mimetização hormonal:** ligação entre receptores celulares e ativação de respostas biológicas indevidas, mesmo em baixas concentrações. Estrogênios sintéticos, por exemplo, podem ativar receptores de estrogênio em organismos aquáticos.
- **Bloqueio à ação hormonal:** Impedimento da ligação dos hormônios naturais aos seus respectivos receptores.
- **Alterar a síntese, transporte ou metabolismo hormonal:** Interferência nos processos de produção, degradação ou transporte de hormônios.
- **Alteração da sensibilidade dos tecidos aos hormônios:** modificação das respostas fisiológicas normais dos organismos.

Nos organismos aquáticos, os impactos associados aos hormônios e desreguladores endócrinos tendem a ser mais evidentes devido à exposição contínua decorrente da presença desses compostos em águas superficiais, frequentemente associada ao lançamento inadequado

de efluentes, descarte indevido de resíduos e ausência ou deficiência de tratamento sanitário adequado.

Entre os principais efeitos observados em organismos aquáticos destacam-se:

- Feminização de peixes machos: um dos efeitos mais estudado. A exposição a estrogênios naturais ou sintéticos, mesmo em concentrações da ordem de nanogramas por litro (ng/L), pode induzir a síntese de vitelogenina (proteína precursora da gema do ovo, produzida por fêmeas) em peixes machos, promover a formação de ovotestis (tecido ovariano e testicular no mesmo indivíduo) e causar alterações reprodutivas capazes de reduzir a fertilidade. Isso impacta diretamente as populações de peixes.
- Masculinização de fêmeas: efeito menos frequente, mas associado à exposição a compostos androgênicos.
- Alterações comportamentais: com potencial impacto sobre alimentação, reprodução e sobrevivência.
- Disfunções imunológicas: aumentando a suscetibilidade a doenças;
- Alterações no desenvolvimento: especialmente em embriões e larvas, podendo afetar a formação de órgãos e sistemas biológicos.

Para os seres humanos, os potenciais impactos associados à exposição a desreguladores endócrinos apresentam mecanismos semelhantes, embora geralmente em concentrações ambientais muito baixas. A principal preocupação está relacionada à exposição crônica a múltiplos compostos com atividade endócrina. Os efeitos de longo prazo e as interações entre diferentes desreguladores endócrinos ainda constituem áreas de intensa investigação científica. Entretanto, alguns estudos já apontam possíveis associações com:

- Problemas reprodutivos, incluindo infertilidade e redução da qualidade do esperma).
- Aumento do risco de determinados tipos de câncer hormônio-dependentes como mama e próstata.
- Distúrbios metabólicos.
- Potenciais impactos no desenvolvimento neurológico em crianças expostas durante a gestação

4.2.4 Amostragem

A amostragem de fármacos em matrizes ambientais deve ser planejada considerando as características físico-químicas dos compostos, as concentrações esperadas e os objetivos do estudo.

De forma geral, concentrações mais baixas no ambiente podem demandar maiores volumes de amostra ou maior número de pontos de coleta, especialmente em águas superficiais e subterrâneas com baixa carga de contaminantes. Em contrapartida, em matrizes mais concentradas, como efluentes sanitários ou industriais, volumes menores podem ser suficientes para análise.

A coleta pode ser realizada por amostragem pontual ou composta, conforme o tipo de matriz, a variabilidade esperada e os objetivos da investigação.

Para matrizes aquosas, recomenda-se o uso de recipientes adequados que minimizem perdas por degradação, adsorção ou contaminação das amostras.

A preservação e o armazenamento das amostras devem considerar a estabilidade dos compostos de interesse, sendo usual a manutenção sob refrigeração e proteção contra a luz até a realização das análises laboratoriais.

Para matrizes sólidas, semissólidas ou de fase mista, os procedimentos de amostragem devem assegurar representatividade e quantidade suficiente de material para análise, sendo os procedimentos específicos definidos conforme protocolos técnicos reconhecidos.

De modo geral, recomenda-se que os procedimentos de coleta, preservação, armazenamento e transporte das amostras sigam métodos validados e referências técnicas aplicáveis, considerando as limitações analíticas, a disponibilidade laboratorial e as condições locais de investigação.

4.2.5 Métodos de análise

Métodos como o EPA, 1694 são frequentemente utilizados como referência para a análise de fármacos, hormônios e produtos de cuidado pessoal em matrizes ambientais, empregando técnicas analíticas avançadas, como cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massa em tandem (LC-MS/MS).

Entretanto, a aplicação desses métodos deve considerar a disponibilidade de infraestrutura analítica, os limites de detecção requeridos, as características das matrizes investigadas e a adequação metodológica aos compostos de interesse, especialmente no contexto brasileiro.

Recomenda-se que a definição dos procedimentos analíticos seja realizada por laboratórios qualificados, utilizando métodos validados e reconhecidos para os compostos e matrizes de interesse.

Detalhes operacionais específicos, incluindo preparo de amostras, preservação, extração, limites analíticos e critérios de controle de qualidade, devem seguir referências técnicas aplicáveis e não constituem objeto deste documento.

4.2.6 Legislação

No Brasil, quanto em nível global, observa-se uma falta de diretrizes e regulamentações específicas sobre a contaminação por fármacos no meio ambiente. A maioria dos países ainda não possui uma regulamentação abrangente para o descarte ambiental dessas substâncias.

Em relação à gestão de resíduos de medicamentos, o Brasil possui legislação recente, com o Decreto nº 10.388/2020 que institui o sistema de logística reversa de medicamentos, mas ainda com algumas falhas, como se aplicar somente a medicamentos apenas de uso humano, e domiciliar, que podem dificultar a gestão mais abrangente e efetiva da legislação. Atualmente, farmácias e drogarias não são obrigadas a coletar medicamentos domésticos não utilizados. Reconhece-se que o Brasil ainda carece de políticas públicas eficazes e de uma maior conscientização das partes interessadas sobre a questão da contaminação por fármacos.

A Portaria GM/MS nº 888, de 2021 que dispõe sobre a os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de qualidade, traz, de forma ainda discreta, alguns fármacos como o Lindano, utilizado no passado no controle de piolhos, ou a N-nitrosodimetilamina (NDMA) observada como impurezas em diversos medicamentos de função anti-hipertensiva ou antidiabéticos.

A análise do NDMA na Portaria GM/MS nº 888 de 2021 é facultativa e aplicada somente quando do uso da cloraminação como processo de desinfecção da água, tanto é que ele aparece apenas na parte dos subprodutos da desinfecção.

O Ministério da Saúde coordena o Programa Nacional de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (Vigiagua), que visa monitorar a qualidade da água potável no Brasil.

Trata-se de um programa brasileiro para água potável que inclui o monitoramento outras classes de contaminantes, como por exemplo, 27 ingredientes ativos de pesticidas, mas ainda não especifica fármacos em sua listagem. Há uma reconhecida necessidade de programas de monitoramento mais abrangentes para a detecção de fármacos no Brasil.

Por muito tempo, a distinção regulatória entre resíduos perigosos (conforme definido na lei e pela *Environmental Protection Agency (EPA)* e *Department of toxic Substances Control (DTSC)* dos EUA na regulamentação) e resíduos médicos (com suas próprias definições) dificultou a gestão combinada destes compostos. Atualmente, essa visão vem sendo reavaliada, e vem evoluindo com os estudos para que as novas diretrizes reflitam uma gestão unificada.

O desenvolvimento de padrões e diretrizes ainda é embrionário e relativamente limitado para a presença de fármacos em matrizes ambientais. Há muito o que se desenvolver sobre os seus efeitos tóxicos na flora e na fauna para criação de diretrizes e normativas mais apropriadas para cada matriz e cenário de exposição. Contudo, algumas ações vêm sendo feitas no cenário alimentício ao redor do mundo.

As primeiras normativas e padrões legais estabelecidos foram criados com foco em consumo de alimentos, a exemplo da União Europeia, em 1990, estabeleceu um dos primeiros limites legais para antibióticos no leite (4-1500 µg / kg) e para alguns outros produtos alimentícios de origem animal (25-6000 µg / kg). Nesta mesma linha de pensamento, atualmente as diretrizes da *Food and Drug Administration (USFDA)*, dos Estados Unidos, para avaliações de medicamentos em humanos exigem que os candidatos dos EUA forneçam um relatório de Avaliação de Impacto Ambiental (EIA) quando as concentrações esperadas para um ingrediente farmacêutico ativo em um ambiente aquático forem de >1 µg/L. A concentração total de produtos farmacêuticos veterinários no solo foi limitada a ≤100 µg/kg pela "Cooperação Internacional sobre a Harmonização dos Requisitos Técnicos para o Registro de Produtos Médicos Veterinários". Este limite foi definido com base nos efeitos ecotóxicos em minhocas, plantas e micróbios.

A Agência Europeia de Medicamentos (EMA) emitiu diretrizes em 2006 sobre Avaliação de Risco Ambiental (ERA) para produtos farmacêuticos com base em ameaças graves que podem representar para o meio ambiente. O objetivo era melhorar a avaliação de risco farmacêutico no meio ambiente. As Diretivas-Quadro Europeias da Água sobre Substâncias Prioritárias incluem diclofenaco, ibuprofeno, α-estradiol e β-etinilestradiol. A USEPA também adicionou eritromicina, hormônios estrogênicos e vários outros ingredientes farmacêuticos em sua terceira Lista de

Candidatos a Contaminantes (CCL3) e novamente na quarta lista (CCL4). Ainda não existem limites máximos legais em todo o mundo para compostos farmacêuticos ativos na água potável.

Não existem diretrizes para fármacos em água potável ou água de reuso. No entanto, de acordo com as regras da USFDA, a avaliação e os testes ecológicos são exigidos nos EUA se a concentração ambiental prevista na água e no solo exceder 1 µg/L ou 100 µg/kg, respectivamente. Esse limite foi estabelecido para possíveis efeitos agudos com base no conhecimento limitado de toxicidade disponível. A União Europeia estabeleceu um valor limite de 0,01 µg/L com base na extrapolação das concentrações ambientais previstas no meio ambiente (PEC) ou na medida de concentrações farmacêuticas no ambiente (MEC).

O governo australiano deu um primeiro passo ao introduzir diretrizes farmacêuticas na água potável em 2008. Essas diretrizes usaram as doses terapêuticas mais baixas recomendadas (LRTD) para estabelecer níveis aceitáveis.

4.3 Pesticidas

4.3.1 O que são

Os pesticidas emergentes representam uma categoria de contaminantes ambientais que vem despertando crescente preocupação na comunidade científica e regulatória. Estes compostos, embora não sejam necessariamente novos, ganharam destaque recente em função do aumento da sua detecção em matrizes ambientais, da identificação de novos efeitos tóxicos e da reavaliação de seus potenciais riscos ambientais e à saúde humana.

Conforme já apresentado, o conceito de "emergente" no contexto de pesticidas, não se refere exclusivamente à introdução recente dessas substâncias no mercado, mas ao reconhecimento mais recente de sua presença, persistência e potencial impacto no ambiente. Muitos desses compostos são utilizados há décadas, porém passaram a ser identificados como contaminantes de preocupação em razão do avanço dos métodos analíticos, da ampliação dos estudos ecotoxicológicos e das mudanças nos padrões de uso agrícola.

No Brasil, o tema possui especial relevância, considerando que o país figura entre os maiores produtores agropecuários do mundo e entre os principais consumidores de agrotóxicos. Esse cenário amplia o potencial de introdução desses compostos no solo, na água e em outros compartimentos ambientais, seja por escoamento superficial, lixiviação, dispersão atmosférica

ou descarte inadequado. Além disso, a diversidade de substâncias utilizadas, associadas às condições climáticas e de uso intensivo em determinadas culturas agrícolas, pode favorecer a ocorrência de resíduos e metabólitos em concentrações ambientalmente relevantes, reforçando a importância de estratégias adequadas de monitoramento, gestão e controle no contexto brasileiro.

A relevância dos pesticidas emergentes no contexto do gerenciamento de áreas contaminadas está associada primeiramente à sua mobilidade, persistência e potencial toxicidade, incluindo efeitos observados em concentrações inferiores às anteriormente consideradas seguras, o que vem exigindo a reavaliação de critérios de qualidade ambiental. Adicionalmente, a crescente resistência de pragas a pesticidas convencionais tem contribuído para o aumento do uso de compostos alternativos, alguns dos quais passaram a integrar o grupo de substâncias classificadas como contaminantes emergentes.

Os pesticidas emergentes podem ser definidos como compostos químicos utilizados para controle de pragas que passaram a receber maior atenção científica e regulatória em função da sua detecção em matrizes ambientais, identificação de novos efeitos adversos, e reavaliação de riscos anteriormente subestimados.

Esta definição engloba tanto compostos recentemente introduzidos quanto substâncias já amplamente utilizadas, mas que passaram a ser consideradas de preocupação ambiental.

Entre os principais grupos de pesticidas emergentes destacam-se:

- **Neonicotinóides:** inseticidas sistêmicos, altamente solúveis em água e amplamente utilizados, incluindo imidacloprid, thiamethoxam, clothianidin, acetamiprid, thiacloprid, dinotefuran e nitenpyram.
- **Fenilpirazóis (como o fipronil):** associados à elevada toxicidade para organismos aquáticos e polinizadores.
- **Organofosforados em reavaliação (como o chlorpyrifos):** associados à efeitos neurotóxicos.
- **Herbicidas persistentes (como atrazina e diuron):** associados ao potencial de contaminação de águas subterrâneas.

- Herbicidas de ampla utilização e relevância regulatória (como glifosato e paraquat): frequentemente envolvidos em discussões técnicas e regulatórias relacionadas à toxicidade, persistência e exposição ambiental.

A ausência de uma classificação regulatória universalmente harmonizada para pesticidas emergentes reflete a complexidade do tema e reforça a necessidade de abordagens integradas para avaliação, monitoramento e gerenciamento desses compostos.

4.3.2 Fontes, destino e transporte

O uso agrícola constitui a principal fonte de introdução de pesticidas no ambiente, incluindo aplicação direta em culturas, tratamento de sementes e controle de pragas no solo e na folhagem. O tratamento de sementes, especialmente com neonicotinóides, tem se expandido significativamente, resultando na exposição de organismos não-alvo por meio de pólen, néctar e exsudatos radiculares.

Outras fontes relevantes incluem:

- uso veterinário (ex.: fipronil em produtos antiparasitários)
- aplicações domissanitárias (controle de pragas urbanas)
- manejo florestal
- instalações de formulação e armazenamento
- lavagem de equipamentos

uso ilegal de pesticidas

Fontes pontuais podem gerar contaminação localizada, enquanto fontes difusas, especialmente aquelas associadas à aplicação agrícola, estão relacionadas a processos como deriva, escoamento superficial, lixiviação e deposição atmosférica.

A compreensão das fontes e dos padrões de uso é essencial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de prevenção da contaminação, bem como para a identificação de áreas prioritárias para investigação, monitoramento e remediação ambiental

O comportamento ambiental dos pesticidas emergentes depende de suas propriedades físico-químicas e das condições ambientais do meio em que são liberados, conforme apresentado a seguir.

- Adsorção e mobilidade

A adsorção à matéria orgânica e às argilas tende a reduzir a mobilidade dos compostos, ou seja, pesticidas com baixa adsorção apresentam maior potencial de migração para camadas mais profundas do solo. O glifosato, por exemplo, tende a apresentar forte adsorção ao solo, enquanto neonicotinóides podem apresentar comportamento mais variável, dependendo do tipo de solo e das condições locais.

- Dessorção

A dessorção pode promover a liberação gradual de resíduos previamente retidos no solo ou nos sedimentos. Esse processo prolonga a permanência do pesticida no ambiente e pode contribuir para manutenção da contaminação ao longo do tempo.

- Volatilização

Compostos com maior pressão de vapor podem volatilizar após a aplicação. Esse mecanismo favorece o transporte atmosférico e contribui para a ocorrência de pesticidas em locais distantes da fonte original.

- Degradação

A degradação no solo pode ocorrer por duas vias: biótica, principalmente por atividade microbiana e abiótica, como hidrólise, fotólise e oxidação. A velocidade desses processos depende de fatores como: temperatura, umidade, pH, tipo de solo e disponibilidade de oxigênio. Em muitos casos, a degradação gera metabólitos com comportamento ambiental relevante, podendo apresentar maior mobilidade, persistência ou toxicidade em comparação ao composto original.

Em solos estruturados, o transporte por macroporos pode acelerar a migração para águas subterrâneas. Nesses casos, parte do pesticida contorna mecanismos de adsorção e degradação na matriz do solo.

Especificamente no ambiente aquático, o transporte dos pesticidas emergentes é fortemente influenciado por propriedades físico-químicas como: solubilidade em água, coeficiente de partição octanol-água ($\log K_{ow}$), pressão de vapor, constante de Henry e pK_a .

A presença de pesticidas em corpos d'água pode decorrer por:

- ✓ escoamento superficial;
- ✓ drenagem agrícola;

- ✓ erosão de partículas contaminadas;
- ✓ deposição atmosférica;
- ✓ lixiviação para aquíferos.
- ✓ Lixiviação

A migração para águas subterrâneas tende a ser favorecida por:

- ✓ alta solubilidade;
- ✓ baixa adsorção ao solo;
- ✓ textura mais arenosa;
- ✓ baixo teor de matéria orgânica;
- ✓ elevada recarga hídrica.

Pesticidas com baixa adsorção e alta solubilidade apresentam maior potencial de lixiviação, como observado para alguns neonicotinóides.

O destino dos pesticidas emergentes em ecossistemas aquáticos resulta da interação entre suas características intrínsecas e os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no meio. Esses processos determinam sua permanência, degradação, transporte e potencial redistribuição entre diferentes compartimentos, como coluna d'água, sedimentos e biota, influenciando diretamente sua dinâmica e comportamento ao longo do tempo.

Cabe ressaltar que a degradação dos pesticidas não deve ser interpretada apenas como mecanismo de atenuação, pois em muitos casos:

- ✓ o composto original é transformado;
- ✓ os produtos formados permanecem ambientalmente relevantes;
- ✓ metabólitos podem manter o modo de ação ou apresentar maior persistência.

Esse aspecto é particularmente importante, pois a redução da concentração do composto original não significa, necessariamente, redução ou eliminação do risco ambiental. Dessa forma, a definição do escopo investigativo deve considerar, sempre que pertinente, os principais produtos de transformação associados à substância de interesse.

Sendo assim, a avaliação de fontes, do destino e do transporte de pesticidas deve considerar, de forma integrada:

- ✓ histórico de uso e substâncias aplicadas;

- ✓ potencial de formação de metabólitos relevantes;
- ✓ características do solo e do aquífero;
- ✓ mobilidade do composto e de seus produtos de transformação;
- ✓ persistência em solo, água e sedimento;
- ✓ potencial de exposição humana e ecológica.

Essa análise é essencial para o desenvolvimento do modelo conceitual da área, definição do escopo analítico e interpretação dos resultados obtidos.

4.3.3 Riscos à Saúde Humana

Os pesticidas emergentes apresentam uma ampla gama de efeitos tóxicos adversos, capazes de afetar tanto a saúde humana quanto os ecossistemas. A compreensão desses riscos é fundamental para a avaliação de risco e para a definição de estratégias adequadas de proteção ambiental e à saúde.

Os pesticidas emergentes atuam por diferentes mecanismos, interferindo em processos biológicos essenciais de organismos não-alvo.

De forma geral, apesar das diferenças entre classes de compostos, os pesticidas emergentes podem induzir efeitos relevantes, como neurotoxicidade, disfunção endócrina e danos a órgãos-alvo, reforçando a necessidade de avaliação integrada de seus impactos.

A exposição aguda pode provocar efeitos imediatos, incluindo:

- manifestações neurológicas (convulsões, tremores)
- sintomas gastrointestinais (náuseas, vômitos)
- complicações respiratórias

Casos mais graves podem ocorrer com compostos de alta toxicidade, como o paraquat, associado a desfechos fatais em exposições intensas.

A exposição crônica a baixas concentrações tem sido associada a:

- distúrbios neurológicos
- efeitos reprodutivos
- alterações hormonais
- possíveis efeitos carcinogênicos

Estudos indicam, por exemplo, associações entre neonicotinóides e efeitos neurológicos, bem como entre atrazina e alterações hormonais e reprodutivas.

A exposição durante períodos críticos do desenvolvimento, como gestação e infância, é particularmente relevante, uma vez que compostos como chlorpyrifos podem atravessar a barreira placentária. Estudos associam essa exposição a déficits cognitivos e alterações comportamentais

Esses efeitos são especialmente preocupantes em populações vulneráveis.

Diversos pesticidas emergentes apresentam potencial de interferência em sistemas hormonais. A atrazina pode alterar níveis hormonais e afetar o sistema reprodutivo, enquanto os neonicotinóides têm sido associados a alterações em hormônios tireoidianos e reprodutivos.

Esses efeitos podem comprometer o equilíbrio fisiológico e a função reprodutiva dos organismos expostos.

A carcinogenicidade de alguns pesticidas permanece em avaliação. O glifosato foi classificado pela *International Agency for Research on Cancer (IARC)* como “provável carcinógeno humano” (Grupo 2A), enquanto outros compostos seguem sob investigação.

Esse tema permanece como ponto de debate científico e regulatório.

Os impactos ecotoxicológicos incluem:

- efeitos subletais em polinizadores, como desorientação, redução da capacidade de forrageamento, comprometimento da memória e diminuição da imunidade;
- alterações na estrutura das comunidades aquáticas, com impactos sobre invertebrados sensíveis;
- efeitos comportamentais, reprodutivos e no desenvolvimento de peixes e anfíbios;
- impactos em aves, especialmente pela ingestão de sementes tratadas, com redução do sucesso reprodutivo e alterações comportamentais;
- alterações na microbiota do solo e nos processos de ciclagem de nutrientes, incluindo efeitos sobre a fixação de nitrogênio.

O potencial de bioacumulação depende principalmente da afinidade do composto por tecidos lipídicos. Compostos mais hidrofóbicos tendem a apresentar maior potencial de acúmulo em organismos, enquanto compostos mais polares, embora menos propensos à bioacumulação clássica, também podem causar efeitos crônicos em exposições contínuas.

A biomagnificação ao longo da cadeia alimentar representa uma preocupação adicional para compostos persistentes ou metabólitos ambientalmente estáveis, podendo resultar em concentrações mais elevadas em predadores de topo.

Esses efeitos podem comprometer serviços ecossistêmicos e provocar alterações nas dinâmicas tróficas.

4.3.4 Amostragem

Devido à elevada diversidade química desses compostos, que incluem desde organoclorados persistentes a herbicidas altamente polares e móveis, a estratégia de amostragem deve ser planejada de forma a minimizar perdas por volatilização, biodegradação e, principalmente, evitar a contaminação cruzada.

Os métodos de coleta são, em geral, aqueles normalmente utilizados em investigações ambientais. Para solos, por exemplo, pode utilizar o método de multi incremento, quando o modelo conceitual da área identificar essa necessidade, além de amostradores do tipo liner. Para a água subterrânea, as coletas podem ser realizadas pelo método de baixa vazão e para identificação dos vapores do solo, amostradores passivos.

Um dos principais desafios na coleta de pesticidas é evitar tanto a introdução inadvertida de contaminantes quanto a perda de analitos durante as etapas de amostragens e armazenamento. Dessa forma, deve-se evitar a utilização de determinados materiais plásticos, como o PVC e LDPE, uma vez que alguns pesticidas podem ser adsorvidos por esses materiais. Recomenda-se a utilização de frascos de vidro âmbar com o objetivo de minimizar processos de degradação induzidos pela radiação ultravioleta. As tampas devem possuir septos revestidos de politetrafluoretileno (PTFE/Teflon®).

O resfriamento deve ser realizado imediatamente após a coleta, uma vez que a redução da temperatura auxilia na inibição da atividade microbiana e na preservação dos compostos de interesse

4.3.5 Métodos de análise

A determinação analítica de pesticidas emergentes requer métodos sensíveis e seletivos, capazes de detectar concentrações em níveis traço em matrizes como água, solo e sedimento. Essas análises são fundamentais para o monitoramento ambiental e para a interpretação técnica em estudos de áreas contaminadas.

De modo geral, as principais técnicas utilizadas incluem:

- LC-MS/MS, especialmente para compostos polares e termolábeis, como neonicotinóides;
- GC-MS/MS, mais aplicável a compostos voláteis ou semivoláteis, como alguns organofosforados e herbicidas.

A preparação das amostras varia conforme a matriz investigada e os analitos de interesse. Para amostras aquosas, a extração em fase sólida (*Solid Phase Extraction – SPE*) é amplamente utilizada. Já para matrizes sólidas, pode ser empregada a abordagem QuEChERS (*Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged and Safe* — rápido, fácil, barato, eficiente, robusto e seguro), além de outras técnicas de extração compatíveis com o escopo analítico.

Entre os principais desafios analíticos, destacam-se:

- dificuldade de determinação de compostos altamente polares;
- necessidade de incluir metabólitos ambientalmente relevantes;
- interferências de matriz;
- diferenças entre laboratórios quanto ao escopo analítico e limites de quantificação.

A escolha do método deve considerar:

- a compatibilidade com os compostos de interesse,
- a inclusão de metabólitos relevantes
- a adequação dos limites de detecção ao cenário avaliado;
- as características da matriz investigada;
- a disponibilidade de infraestrutura laboratorial.

4.3.6 Legislação

O arcabouço regulatório aplicável aos pesticidas no Brasil é amplo, porém nem sempre diretamente alinhado ao contexto do gerenciamento de áreas contaminadas.

Grande parte das normas existentes está associada ao registro, uso e controle de resíduos em alimentos, com atuação de órgãos como ANVISA e MAPA, enquanto a avaliação ambiental é conduzida pelo IBAMA. No entanto, essas esferas regulatórias não estabelecem, necessariamente, critérios diretamente aplicáveis à avaliação de risco em áreas contaminadas.

Nesse contexto, é importante distinguir entre normas voltadas ao uso, registro e comercialização de pesticidas e aquelas que podem ser utilizadas como referência para avaliação de exposição e risco à saúde humana.

A Portaria GM/MS nº 888/2021, que estabelece os padrões de potabilidade da água para consumo humano, representa uma das principais referências aplicáveis ao gerenciamento de áreas contaminadas, na medida em que define valores máximos permitidos (VMP) para diversos pesticidas com base em critérios de proteção à saúde.

Essa portaria inclui substâncias amplamente utilizadas ou frequentemente detectadas no ambiente, como atrazina, simazina, diuron, glifosato e seus metabólitos, entre outras, sendo particularmente relevante em cenários onde há potencial de exposição humana por ingestão de água.

Adicionalmente, o processo regulatório brasileiro vem passando por revisões importantes nos últimos anos, com destaque para:

- restrições ao uso de chlorpyrifos, associadas a evidências de neurotoxicidade
- proibição do paraquat, devido à sua elevada toxicidade
- reavaliações de compostos como imidacloprid, thiamethoxam e fipronil, relacionadas a impactos ambientais, especialmente sobre polinizadores

Apesar dessas iniciativas, observa-se que muitos pesticidas considerados emergentes ainda não possuem valores de referência específicos para solo e água subterrânea no contexto de áreas contaminadas, o que reforça a necessidade de abordagens baseadas em avaliação de risco, uso de referências complementares e interpretação técnica criteriosa.

Assim, no contexto deste guia, a análise de pesticidas deve considerar não apenas a existência de regulamentação, mas também sua aplicabilidade ao cenário avaliado, priorizando referências que estejam diretamente relacionadas à proteção da saúde humana e à avaliação de exposição.

4.4 Produtos de Uso Pessoal (PCPs)

4.4.1 O que são

Os PCPs (*Personal Care Products*) representam um dos maiores grupos de contaminantes emergentes com potencial de causar impactos ambientais e à saúde humana. Esses compostos

podem atingir diferentes matrizes ambientais, incluindo águas superficiais e subterrâneas, sedimentos e solos, além de alcançar a biota aquática e terrestre.

Devido ao seu uso crescente e disseminado, os PCPs são continuamente liberados no ambiente, o que representa um desafio crescente para a gestão ambiental. Apesar dos potenciais efeitos adversos associados a essa classe de substâncias, ainda há a necessidade de aprimoramento das metodologias analíticas voltadas à sua detecção e quantificação, bem como do desenvolvimento de abordagens mais específicas para regulamentação, investigação e tratamento ambiental.

Alguns PCP apresentam baixa taxa de degradação, enquanto outros, embora degradáveis, são continuamente introduzidos no ambiente e, por esses motivos, classificados como "pseudo-persistentes". Essa característica favorece sua persistência nas matrizes ambientais, podendo contribuir para processos de bioacumulação e interferência em sistemas biológicos, mesmo em baixas concentrações, incluindo potenciais efeitos de disrupção endócrina e o desenvolvimento de resistência antimicrobiana. Dessa forma, além das medidas de monitoramento, investigação e controle ambientais, ações voltadas à conscientização, substituição de compostos de maior preocupação e desenvolvimento de produtos biodegradáveis tornam-se importantes estratégias para mitigação de impactos ambientais associados aos PCPs.

Diversos estudos vêm sendo conduzidos em diferentes regiões do mundo com foco na ocorrência, nos efeitos ecotoxicológicos e nas técnicas de remoção desses compostos. No entanto, ainda persistem lacunas significativas relacionadas à toxicidade, persistência, comportamento ambiental e interação dos PCP em diferentes matrizes ambientais.

Os PCPs incluem:

- Fragrâncias sintéticas (ex: almíscares sintéticos, como musk tonalide e galaxolide)
- Conservantes (ex: parabenos)
- Filtros solares (ex: benzofenona-3 e octocrileno)
- Antissépticos (ex: triclosan e triclocarban)

4.4.2 Fontes, destino e transporte

Os produtos de cuidado pessoal (PCPs) entram no ambiente principalmente por meio de:

- Descargas de estações de tratamento de esgoto (ETE): muitos compostos não são completamente removidos durante o tratamento convencional.

- Uso doméstico e hospitalar: lavagem de produtos aplicados na pele, como protetores solares, cremes e loções, que são então direcionados para o sistema de esgoto.
- Escoamento superficial urbano: transporte de resíduos contendo PCPs a partir de superfícies pavimentadas, ruas e áreas de descarte inadequado.
- Aplicação de lodo de esgoto: uso agrícola de biossólidos contaminados, provenientes do tratamento de águas residuais.
- Lixiviados de aterros sanitários: resultantes do descarte de embalagens e resíduos de produtos no lixo comum.
- Dispersão atmosférica: considerada uma via secundária, mas relevante para alguns compostos voláteis, como determinadas fragrâncias sintéticas, que podem ser transportadas para locais distantes da fonte original.

A distribuição desses contaminantes no meio ambiente depende de suas propriedades físico-químicas, incluindo:

- Solubilidade em água que influencia sua mobilidade e presença em corpos hídricos.
- Coeficiente de partição octanol/água (K_{ow}) relacionado ao potencial de bioacumulação em organismos.
- Meia-vida ambiental: associada à persistência do composto em diferentes compartimentos ambientais.
- Volatilidade: pode favorecer o transporte atmosférico e posterior deposição em locais distantes da fonte.

Produtos cosméticos e de cuidados pessoais aplicados na pele são removidos durante o banho ou lavagem, seguindo para as ETEs, que frequentemente não apresentam eficiência suficiente para sua eliminação completa. Parte desses compostos pode ser removida e acumulada no lodo de esgoto, que, quando utilizado como fertilizante agrícola, pode introduzir esses contaminantes no solo e na cadeia alimentar.

Dentre os PCPs, os fenóis derivados de produtos de cuidado pessoal, como triclosan (TCS), triclocarban (TCC) e parabenos, estão entre os compostos mais persistentes e ambientalmente relevantes em ambiente aquático. Esses compostos são amplamente utilizados em sabonetes, antissépticos, cosméticos, loções e cremes, sendo continuamente liberados nos sistemas de esgoto e apresentando resistência aos tratamentos convencionais.

Estudos indicam que concentrações superiores a 2 µg/L de triclosan já foram detectadas em águas superficiais urbanas. Mesmo em concentrações abaixo de 1 µg/L, algum desses compostos demonstram toxicidade para algas, peixes e invertebrados aquáticos. Além disso, fenóis clorados podem gerar subprodutos tóxicos durante processos de cloração da água.

Pesquisas também demonstram que compostos como carbamazepina e sulfametoxazol apresentam elevada persistência ambiental. Em sistemas aquáticos, esses compostos podem depositar-se nos sedimentos, que passam a atuar como reservatórios secundários de PCPs, possibilitando sua posterior remobilização para coluna d'água. Esse processo pode afetar diretamente organismos bentônicos e contribuir para a manutenção da toxicidade ambiental ao longo do tempo.

Assim, devido à limitada eficiência de remoção em sistemas convencionais de tratamento, os PCPs são frequentemente detectados em águas residuais tratadas, ainda que em concentrações baixas, alcançando os corpos d'água superficiais e, conseqüentemente, a biota aquática.

Os corpos d'água superficiais e subterrâneos também podem ser impactados por escoamento superficial e lixiviação do solo, respectivamente. Nessas situações, os PCPs podem atingir aquíferos, dificultando sua remoção e aumentando o risco de exposição humana.

As embalagens e resíduos de PCPs descartados como lixo comum também contribuem significativamente para a introdução dessas substâncias no ambiente. Em aterros sanitários, o lixiviado gerado pode transportar esses compostos para o solo e águas subterrâneas. Os lixiviados de aterros, juntamente com as descargas de ETEs e estações de tratamento de águas residuais, representam importantes fontes de introdução de PCP no ambiente.

4.4.3 Principais Riscos à Saúde Humana

Filtros UV têm sido associados a efeitos como a feminização de peixes, branqueamento de corais e bioacumulação em aves e invertebrados aquáticos. A exposição crônica a PCPs em baixas concentrações têm sido relacionada a alterações reprodutivas, neurocomportamentais e imunotóxicas em organismos não-alvo.

PCPs como triclosan, parabenos, bisfenol A e retardantes de chama bromados demonstraram efeitos significativos sobre a saúde humana e organismos aquáticos. Entre os principais efeitos observados destacam-se:

- Disrupção endócrina, afetando fertilidade, desenvolvimento fetal e funções hormonais;

- Estresse oxidativo e apoptose (morte) celular em organismos aquáticos;
- Genotoxicidade, neurotoxicidade e impacto sobre o desenvolvimento embrionário, associados a compostos como sertralina, fluoxetina e carbamazepina.

Os PCP podem apresentar efeitos tóxicos devido à bioacumulação e a ação como desreguladores endócrinos causando:

- Alterações hormonais/disruptores endócrinos: parabenos e triclosan podem interferir na regulação hormonal, afetando o sistema reprodutivo.
- Efeitos reprodutivos: almíscares sintéticos (synthetic musks) podem impactar fertilidade e desenvolvimento fetal.
- Resistência antimicrobiana: antimicrobianos, como triclosan, presentes em baixas concentrações no ambiente contribuem para a resistência bacteriana, favorecendo a seleção de bactérias resistentes.

Além disso, a exposição crônica a essas substâncias pode resultar em efeitos cumulativos no organismo humano.

Os impactos à fauna aquática incluem a bioacumulação em organismos aquáticos, aumentando riscos para a cadeia alimentar, além de alterações comportamentais e reprodutivas em organismos aquáticos expostos a PCPs.

4.4.4 Amostragem

A coleta de amostras para análise de Produtos de Cuidado Pessoal (PCPs) deve seguir protocolos rigorosos, de forma a evitar perdas por degradação, contaminação cruzada e garantir representatividade das amostras. Os cuidados incluem o tipo de amostrador, acondicionamento e preservação da amostra, conforme a matriz ambiental.

A amostragem de amostras de águas superficiais e subterrâneas deve ser realizada em frascos de vidro ou polipropileno previamente lavados e com tampa de fluoropolímero. A adição de conservantes, como EDTA, pode ser utilizada para estabilizar metais complexantes e inibir reações químicas que possam degradar os analitos de interesse.

Amostragem de sedimentos e solos deve priorizar técnicas que garantam integridade estratigráfica e mínima perturbação das amostras. Para isso recomenda-se:

- *Core sampler* para coleta de sedimentos e solos em profundidade, permitindo avaliação de perfis verticais;

- Pá de aço inoxidável ou colher revestidas com PTFE/Teflon® para amostragens de solos e sedimentos superficiais.

As amostras devem ser armazenadas em frascos de vidro âmbar com tampa de rosca revestida com PTFE. Após a coleta, recomenda-se que as amostras sejam mantidas refrigeradas ($\leq 4\text{ }^{\circ}\text{C}$), transportadas em caixas térmicas e, quando necessário, congeladas até a análise. Também é fundamental evitar exposição à luz e ao ar, considerando que muitos PCPs apresentam sensibilidade à fotodegradação e perdas por volatilização.

Para programas de monitoramento de longo prazo, dispositivos como POCIS (*Polar Organic Chemical Integrative Sampler*) e SPMD (*Semi-Permeable Membrane Devices*) podem ser instalados em corpos d'água por períodos prolongados, geralmente entre 14 e 30 dias. Esses métodos permitem o acúmulo gradual de compostos ao longo do tempo e são especialmente úteis para detectar contaminantes presentes em concentrações muito baixas.

4.4.5 Métodos de análise

A identificação e quantificação de PCPs em matrizes ambientais exigem técnicas analíticas sensíveis e seletivas, devido às baixas concentrações em que esses compostos geralmente ocorrem (ng L^{-1} ou ng g^{-1}). Os principais métodos incluem:

- Técnicas de extração para amostras sólidas:
 - ✓ *QuEChERS* (*Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged and Safe* — rápido, fácil, barato, eficiente, robusto e seguro): método originalmente desenvolvido para pesticidas, mas atualmente adaptado para diversos contaminantes emergentes, incluindo PCP. Envolve extração com acetonitrila e partição salina, seguido de limpeza com sorventes como PSA e MgSO_4 .
 - ✓ UAE (Ultrasound-Assisted Extraction); PLE (Pressurized Liquid Extraction), MAE (Microwave-Assisted Extraction) e MSPD (Matrix Solid-Phase Dispersion)

Estas técnicas são independentes entre si e aplicadas principalmente em amostras sólidas e semissólidas, como solos, sedimentos e biota. Utilizam mecanismos físicos, como pressão, ultrassom ou micro-ondas, para facilitar a liberação dos analitos da matriz, frequentemente com menor consumo de solventes, redução do tempo de extração e bom desempenho analítico em comparação com métodos convencionais.

- Técnicas de extração para amostras líquidas:

No caso de amostras aquosas, emprega-se amplamente a extração em fase sólida (*Solid Phase Extraction –SPE*), sendo fundamental a seleção adequada de cartuchos e sorventes utilizados, como Oasis HLB, MCX, C18, conforme a polaridade dos compostos. Além disso, o pH das amostras pode necessitar de ajuste (ácido ou básico), dependendo do grupo de compostos alvo, visando otimizar a retenção dos analitos na fase sólida e aumentar a eficiência da extração.

Entre as técnicas de determinação, destacam-se:

- Cromatografia Líquida Acoplada à Espectrometria de Massas (LC-MS/MS): técnica amplamente utilizada para a detecção de compostos como parabenos (metil, etil, propil), triclosan e fragrâncias sintéticas. Apresenta elevada sensibilidade e seletividade, com limites de detecção (LOD) na faixa de 0,01 a 10 ng/L. sendo frequentemente associada à etapa prévia de SPE.
- Cromatografia Gasosa com Espectrometria de Massas (GC-MS/MS): indicada para compostos voláteis ou semivoláteis, frequentemente após derivatização (por exemplo, utilizando BSTFA + TMCS), incluindo determinados parabenos e triclosan. Pode ser aplicada tanto em amostras aquosas quanto sólidas, apresentando bons desempenhos de recuperação (56–117%) e limites de quantificação entre 3 e 49 ng/L.

A escolha dos métodos analíticos depende diretamente da matriz ambiental investigada (água, solo, sedimento, biota) e das propriedades físico-químicas dos analitos, como solubilidade, log Kow, pKa e estabilidade térmica. Em muitos casos, pode ser necessária a combinação de diferentes técnicas analíticas para obtenção de um panorama mais abrangente da presença de PCPs, especialmente em ambientes complexos.

Compostos altamente persistentes podem resistir a tratamentos convencionais e exigir abordagens integradas de detecção, frequentemente associadas ao uso de LC-MS/MS em modo tandem e técnicas otimizadas de pré-concentração.

Além disso, limitações associadas à matriz ambiental e à complexidade química dos PCP tornam essencial o uso de controles de qualidade rigorosos, validação de métodos e atualização contínua dos protocolos analíticos. Observa-se uma tendência crescente de aplicação de abordagens alinhadas aos princípios da Química Analítica Verde, com foco em sustentabilidade, redução do uso de solventes tóxicos e minimização da geração de resíduos laboratoriais.

4.4.6 Legislação

Dentre as substâncias incluídas nesta classe, algumas já possuem regulamentação no Brasil ou valores de referência internacionais como os *Regional Screening Levels* (RSL) da US EPA. Estes compostos estão discriminados na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Compostos legislados no Brasil e pela US EPA		
Substância	CAS	Uso
Bis(2-etilhexil) ftalato (DEHP)	117-81-7	Plastificantes, embalagens de cosméticos
Butilbenzilftalato	85-68-7	Fixadores de fragrâncias, plásticos
Dibutilftalato (DBP)	84-74-2	Esmaltes, fragrâncias
Dietilftalato (DEP)	84-66-2	Fragrâncias, solvente
Dimetiltereftalato	120-61-6	Intermediário em polímeros de embalagens
Anidrido ftálico	85-44-9	Plastificantes e fragrâncias
Ácido perfluorooctanoico (PFOA)	335-67-1	Cosméticos resistentes à água
Perfluorooctanosulfonato (PFOS)	1763-23-1	Cosméticos, produtos de limpeza
Perfluorobutanoato de potássio	422-51-5	Tensoativo em cosméticos
Fenol	108-95-2	Antisséptico, conservante
Cresóis (m-, o-, p-)	1319-77-3	Antisséptico, fragrância
Clorocresol	59-50-7	Conservante em cosméticos
Ácido benzóico	65-85-0	Conservante (E210)
Álcool benzílico	100-51-6	Fragrância, conservante
Cloreto de benzila	100-44-7	Intermediário químico, fragrância

Entretanto, a regulamentação aplicável aos PCPs ainda é limitada, especialmente no contexto brasileiro. Nesse cenário, destacam-se algumas diretrizes e iniciativas regulatórias em evolução:

- União Europeia: inclui determinados PCPs na lista de substâncias prioritárias para monitoramento da Diretiva Quadro da Água (*Water Framework Directive* – WFD).
- Estados Unidos: por meio do *Contaminant Candidate List* (CCL) e do *Unregulated Contaminant Monitoring Rule* (UCMR), monitora diferentes PCPs em água destinada ao consumo humano, embora muitos compostos ainda não possuam limites legais obrigatórios.

- Canadá e Austrália: já publicaram diretrizes relacionadas a concentrações consideradas seguras para determinados PCPs em ambientes aquáticos.

A inclusão desses compostos em programas nacionais de monitoramento é fundamental para subsidiar políticas públicas e estratégias de gestão de risco ambiental e à saúde humana.

Para enfrentar os desafios associados à presença de PCPs no ambiente, destacam-se as seguintes necessidades:

- Ampliação do conhecimento toxicológico relacionado aos PCPs, ainda limitado para diversos compostos, o que compromete avaliações de risco mais precisas aos bens a proteger;
- Desenvolvimento de metodologias analíticas mais sensíveis e específicas para detecção em níveis traço;
- Estabelecimento de valores orientadores para compostos prioritários em diferentes matrizes ambientais;
- Adoção de tecnologias avançadas de tratamento em estações de tratamento de esgoto;
- Incentivo à pesquisa e desenvolvimento de alternativas biodegradáveis;
- Realização de campanhas educativas voltadas ao descarte adequado de produtos de uso pessoal e medicamentos vencidos;
- Integração de bases de dados ambientais com foco em contaminantes emergentes;
- ampliação da articulação entre órgãos ambientais, setor acadêmico e indústria para formulação de políticas públicas, estratégias de mitigação e diretrizes ambientais voltadas à proteção da qualidade da água e da saúde pública.

4.5 PFAS

4.5.1 O que são:

Os PFAS (compostos perfluoroalquil e polifluoroalquil) constituem um grupo de produtos químicos manufaturados utilizados na indústria e em produtos de consumo desde a década de 1940, principalmente em razão de suas propriedades de resistência térmica, estabilidade química e características hidrofóbicas e oleofóbicas. Atualmente estima-se a existência de pelo menos 9

mil substâncias classificadas como PFAS, tornando esse grupo um dos conjuntos de compostos sintéticos mais disseminados no ambiente.

Os PFAS são compostos predominantemente alifáticos, caracterizados pela presença de ligação carbono-flúor (C-F), consideradas entre as mais fortes da química orgânica. Essa estrutura confere elevada estabilidade físico-química a essas substâncias, tornando-as extremamente resistentes à degradação química, biológica e térmica.

Devido a essa elevada resistência, os PFAS podem percorrer longas distâncias no solo, na atmosfera e nas águas subterrâneas e superficiais. No contexto hidrogeológico, plumas de contaminação por PFAS provenientes de fontes industriais ou áreas de treinamento de combate a incêndio podem atingir extensões de até 5 km, representando um desafio complexo para o gerenciamento de áreas contaminadas.

O ácido perfluorooctanóico (PFOA) e o perfluorooctanossulfonato (PFOS) estão entre os compostos historicamente mais utilizados e estudados no grupo dos PFAS. Em diversos países, especialmente nos Estados Unidos, esses compostos vêm sendo progressivamente substituídos por outros PFAS nos últimos anos, embora persistam preocupações relacionadas aos compostos substitutos.

Uma característica de preocupação comum aos PFAS é sua elevada persistência ambiental. Muitos desses compostos degradam-se muito lentamente e podem se acumular em organismos vivos, incluindo seres humano e animais, além de persistirem no ambiente por longos períodos.

4.5.2 Fontes, Destino e transporte

Os PFAS podem estar presentes na água, no solo, no ar e nos alimentos e em diversos materiais encontrados em ambientes domésticos e ocupacionais, incluindo:

- Água potável –sistemas públicos de água potável e poços privados;
- Solo e água próximos de aterros sanitários, áreas de descarte e locais contaminados, incluindo áreas enquadradas em programas como *Superfund* e *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA);
- Espuma extintora de incêndio - espumas formadoras de película aquosa (*Aqueous Film-Forming Foams* – AFFF)) utilizadas no combate a incêndios envolvendo líquidos inflamáveis em aeroportos, bases militares, refinarias, instalações industriais e centros de treinamento;

- Instalações industriais incluindo unidades de produção química ou de manufatura que produzem ou utilizam PFAS em indústrias, como cromagem, eletrônica, fabricação de papel e produção têxtil;
- Alimentos –peixes provenientes de água contaminada e produtos de origem animal oriundos de áreas impactadas;
- Embalagens de alimentos como papéis resistentes à gordura, embalagens de fast food, sacos de pipoca para micro-ondas, caixas de pizza e embalagens de doces.
- Produtos domésticos incluindo tira-manchas e repelentes de água usados em carpetes, estofados, roupas e outros tecidos, produtos de limpeza, utensílios antiaderentes, tintas, vernizes e selantes.
- Produtos de cuidados pessoais presentes em determinados cosméticos, xampus e fios dentais.
- Biossólidos, especialmente provenientes de estações de tratamento de águas residuais, cujo uso agrícola pode resultar na contaminação do solo, águas subterrâneas e superficiais, além de potencial exposição de animais em área de pastagem.

Os principais processos envolvidos no transporte dos PFAS incluem: advecção, dispersão, difusão, deposição atmosférica e lixiviação. O transporte atmosférico, seguido de deposição seca ou úmida, pode resultar em acúmulo mensurável de PFAS em regiões distantes da fonte. A lixiviação de PFAS em solos não saturados durante eventos de precipitação ou irrigação depende das características do meio físico e das propriedades específicas de cada composto. Em determinadas condições e concentrações, alguns PFAS podem formar micelas, o que pode influenciar os mecanismos de transporte de adsorção em carbono orgânico e superfícies minerais, alterando seu comportamento de transporte no ambiente.

4.5.3 Riscos à saúde humana

Estudos científicos atuais têm demonstrado que a exposição a determinados níveis de PFAS pode estar associada a:

- Efeitos reprodutivos, como diminuição da fertilidade ou aumento da pressão alta em mulheres grávidas;
- Efeitos sobre o desenvolvimento infantil, incluindo baixo peso ao nascer, puberdade precoce, alterações ósseas e alterações comportamentais;

- Aumento do risco de alguns tipos de câncer, incluindo câncer de próstata, rim e testicular;
- Redução da capacidade do sistema imunológico de responder adequadamente a infecções, incluindo diminuição da resposta vacinal;
- Interferência em hormônios naturais do organismo;
- Aumento dos níveis de colesterol e potencial associação com a obesidade.

Pesquisadores da US EPA, de outras agências federais dos Estados Unidos, do meio acadêmico e da indústria Americana, continuam conduzindo e revisando estudos relacionados aos PFAS. Entretanto, a avaliação dos efeitos à saúde associados à exposição a esses compostos ainda apresenta desafios importantes, entre os quais destacam-se:

- Existência de milhares de compostos classificados como PFAS, com propriedades e níveis de toxicidade potencialmente distintos, enquanto a maior parte dos estudos ainda se concentra em um número limitado de compostos mais conhecidos;
- A possibilidade de exposição aos PFAS por diferentes vias e em diferentes fases da vida;
- a constante evolução dos tipos e aplicações dos PFAS ao longo do tempo, dificultando o rastreamento das fontes de exposição e a compreensão de seus efeitos sobre a saúde humana.

4.5.4 Amostragem

A amostragem de PFAS requer cuidados específicos para evitar contaminação cruzada, considerando a ampla presença desses compostos em materiais utilizados frequentemente em atividades de campo e laboratório.

Para a amostragem das matrizes ambientais destinadas a análises dos PFAS, recomenda-se a observância das diretrizes estabelecidas no guia “Orientação Geral para Amostragem de Substâncias Per e Polifluoralquiladas (PFAS)”, desenvolvido pelo Grupo de Trabalho (GT) de Contaminantes Emergentes da AESAS.

4.5.5 Métodos de análise

A escolha do método para a análise química dos PFAS depende da matriz a ser analisada (água, solo, efluente, biota) e da finalidade do projeto. Os principais métodos atualmente utilizados por laboratórios comerciais, considerando as diretrizes da USEPA, incluem:

- EPA 537.1: contempla a análise de 18 compostos, utilizando extração em fase sólida (SPE) associada à cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massa tandem (LC-MS/MS).
- EPA 533: complementa o método EPA 537.1, com escopo analítico para 25 compostos.
- EPA 1633: finalizado e promulgado com a versão 1633A de dezembro de 2024. Atualmente um dos métodos mais robustos e abrangente para análise de PFAS. Aplica-se a diversas matrizes, incluindo água subterrânea, água superficial, efluentes, solos, sedimentos e tecidos biológicos, abrangendo até 40 compostos de PFAS.

4.5.6 Legislação

Ratificada pelo Brasil em 2004, a Convenção de Estocolmo constitui o principal instrumento internacional voltado à gestão de Poluentes Orgânicos Persistentes (POP). A inclusão dos PFAS ocorreu de forma gradual:

- Anexo B (Restrição): em 2009, o PFOS, seus sais e o POSF foram listados, permitindo uso restrito onde não há substitutos eficazes (ex: sulfluramida na agricultura e processos de galvanoplastia).
- Anexo A (Eliminação): o PFOA (2019) e o PFHxS (2022) foram adicionados para eliminação global, sendo que o PFHxS não possui exceções que permitam seu uso.

No âmbito federal, os PFAS passaram a ser incorporados em normas técnicas específicas, especialmente relacionadas à classificação de resíduos:

- Coprocessamento (CONAMA 499/2020): estabelece limite máximo de 50 mg/kg para PFOS e derivados em resíduos destinados a fornos de clínquer.
- Classificação de Resíduos (ABNT NBR 10004:2024): A recente revisão da norma consolidou valores-limite relevantes para a caracterização de resíduos sólidos, incluindo:
 - ✓ PFOS e derivados: 50 mg/kg.
 - ✓ PFOA, PFHxS e seus sais: 1 mg/kg.
 - ✓ Compostos afins (Soma): 40 mg/kg (tanto para PFOA quanto para PFHxS).

Embora ainda não existam Valores de Intervenção (VI) federais ou estaduais aplicáveis à totalidade dos compostos PFAS, os mecanismos de avaliação de risco já vêm sendo utilizados em diferentes contextos regulatórios.

Destaca-se, nesse contexto:

- CETESB (2024): as planilhas de avaliação de risco à saúde humana já contemplam 14 compostos PFAS, incluindo PFBS, PFHxS, PFOS, PFOA, PFNA e Gen-X, Possibilitando a definição de Concentrações Máximas Aceitáveis (CMA) para projetos específicos,
- Referências Internacionais: em conformidade com a DD 038/2017/C, podem ser utilizados de forma subsidiária, os *Regional Screening Levels* (RSL) da USEPA (nov/2024), que contemplam 23 compostos PFAS para solo e água subterrânea.

O arcabouço regulatório brasileiro relacionado aos PFAS encontra-se em processo de consolidação, destacando-se o Projeto de Lei 2726/2023, que propõe a criação da Política Nacional de Controle dos PFAS. Atualmente, o projeto encontra-se em tramitação na Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (CMADS), representando importante avanço para a governança ambiental dessas substâncias no país.

4.6 Outros POPs

4.6.1 O que são

Inicialmente, a Convenção de Estocolmo, firmada em 2001, concentrou-se nos Poluentes Orgânicos Persistentes (POP) chamados "doze sujos" (*dirty dozen*), incluindo compostos como DDT, PCB e dioxinas. Contudo, com os avanços científicos e a identificação de novos riscos ambientais elevaram à ampliação da lista, incorporando compostos adicionais que atendem aos critérios estabelecidos para classificação como POP, os quais passaram a ser denominados "outros POPs".

Assim, os chamados "outros POPs" correspondem a compostos químicos que atendem aos critérios estabelecidos pela Convenção de Estocolmo, ou seja, persistência ambiental, bioacumulação, potencial de transporte atmosférico a longas distâncias e toxicidade, mas que foram reconhecidos ou incorporados posteriormente à adoção inicial da Convenção.

A classificação desses compostos pode ser realizada de acordo com sua origem, status regulatório, propriedades físico-químicas e mecanismos de ação tóxica.

Quanto à origem, destacam-se:

- produtos de transformação ambiental, como o 6PPD-quinona, formado pela oxidação do 6PPD presente em pneus, cuja formação contínua e elevada toxicidade tem sido amplamente discutidas;

- retardantes de chama, como PBDE, HBCDD e SCCP, amplamente utilizados em têxteis e eletrônicos, com reconhecida persistência e bioacumulação;
- aditivos industriais, como estabilizadores UV (ex.: UV-328) e plastificantes, liberados ao longo do ciclo de vida dos produtos;
- contaminantes farmacêuticos, cuja persistência em ambientes aquáticos tem sido objeto de preocupação.

Do ponto de vista das propriedades físico-químicas, podem ser observados diferentes comportamentos, tais como:

- POPs voláteis, que apresentam maior pressão de vapor, favorecendo transporte atmosférico a longas distâncias;
- POPs semi-voláteis, que combinam capacidade de dispersão atmosférica associada à adsorção em partículas;
- POPs polares, como determinados contaminantes farmacêuticos, que apresentam maior solubilidade em água, influenciando seus padrões de transporte e distribuição ambiental.

Os mecanismos de ação tóxica variam conforme o composto, podendo incluir efeitos como disfunção endócrina, toxicidade aguda, carcinogenicidade e efeitos imunotoxicológicos.

A diversidade de origens, aplicações e mecanismos de toxicidade dos “outros POP”, associadas às incertezas relacionadas às suas propriedades ambientais e aos desafios regulatórios, reforça a necessidade de monitoramento contínuo e de pesquisas voltadas à compreensão de seus impactos ambientais e à saúde humana.

4.6.2 Fontes, destino e transporte

Os “outros POPs” emergentes apresentam fontes amplas e diversificada, refletindo seu uso industrial, comercial e doméstico contínuo ou recente. Entre as principais fontes destacam-se:

- atividades industriais, incluindo produção de retardantes de chama (como c-decaBDE) e parafinas cloradas de cadeia curta (SCCP), com liberação por efluentes, emissões atmosféricas e processos produtivos;
- efluentes de estações de tratamento e de hospitais, particularmente relevantes para contaminantes farmacêuticos, frequentemente encontrados em concentrações superiores às do esgoto doméstico;

- uso veterinário na pecuária e aquicultura, com transporte para solos e corpos d'água por escoamento;
- resíduos sólidos, incluindo aterros e solos tratados com lodo de esgoto, que atuam como fontes secundárias por lixiviação, volatilização e ressuspensão;
- esgotos urbanos, nos quais também podem ser detectadas substâncias associadas ao consumo de drogas ilícitas.

Do ponto de vista temporal, observa-se redução das concentrações ambientais de alguns compostos, como PBDE, em função de restrições regulatórias, enquanto contaminantes farmacêuticos apresentam tendência de aumento, acompanhando o crescimento do consumo dessas substâncias. A sazonalidade também influencia as concentrações ambientais, especialmente para compostos associados ao escoamento superficial em períodos chuvosos.

Uma vez liberados no ambiente terrestre ou aquático, o comportamento dos “outros POPs” depende diretamente de suas propriedades físico-químicas.

No ambiente terrestre:

- compostos hidrofóbicos, como PBDE, apresentam elevada sorção à matéria orgânica do solo, reduzindo sua mobilidade;
- compostos mais solúveis, apresentam maior potencial de mobilidade e de migração para águas subterrâneas;
- compostos como a 6PPD-quinona podem ser transportados por escoamento superficial, especialmente em áreas urbanas e rodoviárias.

No ambiente aquático:

- compostos hidrofóbicos tendem a se acumular em sedimentos;
- compostos mais solúveis permanecem predominantemente na fase dissolvida;
- condições físico-químicas locais, como salinidade e dinâmica de partículas, influenciam a distribuição entre água e sedimento.

A degradação dos POP varia significativamente entre os diferentes compostos. Alguns sofrem transformações ambientais relevantes, como a fotodegradação de PBDE, enquanto outros apresentam elevada estabilidade, como o UV-328. Há ainda compostos resistentes à biodegradação, além da ocorrência de processos abióticos capazes de gerar produtos potencialmente mais tóxicos, como a formação de 6PPD-quinona.

Fatores ambientais como temperatura, disponibilidade de oxigênio, pH e atividade microbiana influenciam diretamente esses processos de transformação e degradação.

A bioacumulação e a biomagnificação constituem processos-chave para compreensão da persistência e dos impactos dos “outros POPs” nos ecossistemas e na saúde humana. Compostos lipofílicos, como PBDEs e SCCP, apresentam alta afinidade por tecidos ricos em lipídios, favorecendo o acúmulo ao longo das cadeias alimentares. Dessa forma, organismos de níveis tróficos superiores podem apresentar concentrações significativamente elevadas. Por outro lado, contaminantes farmacêuticos, embora geralmente menos bioacumulativos, permanecem ambientalmente relevantes devido à exposição contínua e persistente.

Esses processos contribuem para a persistência dos POP nos ecossistemas e reforçam sua relevância no contexto da proteção ambiental e da saúde humana.

4.6.3 Riscos à Saúde Humana

A avaliação dos riscos associados aos “outros POPs” é fundamental para a proteção da saúde humana e do meio ambiente, considerando sua persistência, capacidade de bioacumulação e potencial de exposição por múltiplas vias.

A exposição humana a esses compostos ocorre principalmente por:

- ingestão de alimentos contaminados;
- consumo de água contaminada;
- inalação de poeira ou partículas contendo essas substâncias;
- contato com materiais e produtos contendo essas substâncias.

Conforme apresentado anteriormente, devido à sua natureza lipofílica, muitos POP tendem a se acumular em tecidos adiposos, apresentando longos tempos de permanência no organismo.

Diversos efeitos adversos têm sido associados à exposição a POPs, variando em função do composto, da dose, da duração da exposição e da suscetibilidade individual. Estudos indicam, por exemplo, que a exposição pré-natal a compostos como PBDEs está associada a déficits cognitivos e alterações comportamentais em crianças.

Alguns desses “outros POPs” também interferem na regulação hormonal. Os PBDE, por exemplo, têm sido associados a alterações da função tireoidiana, incluindo reduções dos hormônios T3 e T4. Há ainda evidências de efeitos sobre o sistema reprodutivo, incluindo alterações na qualidade do sêmen e aumento do tempo necessário para a concepção.

Embora os dados epidemiológicos em humanos ainda sejam limitados para diversos compostos, estudos experimentais também indicam potencial carcinogênico para alguns compostos, como SCCP e determinados retardantes de chama.

Além disso, a exposição a “outros POPs” tem sido associada a alterações no sistema imunológico, incluindo redução da resposta vacinal e aumento da suscetibilidade a infecções, especialmente populações mais vulneráveis, como crianças.

Os outros POP também apresentam impactos significativos sobre os ecossistemas, destacando-se:

- compostos como a 6PPD-quinona, que apresentam elevada toxicidade para peixes;
- efeitos adversos em invertebrados aquáticos expostos a diferentes POPs;
- acúmulo de PBDEs em sedimentos, com impacto sobre organismos bentônicos;
- alterações reprodutivas em aves;
- bioacumulação em mamíferos marinhos, com potenciais efeitos imunológicos e reprodutivos.

4.6.4 Amostragem

A amostragem desses “outros POPs” emergentes em matrizes ambientais como solo, água e sedimentos, deve ser planejada de forma a garantir a representatividade dos dados obtidos e sua adequação aos objetivos do estudo.

A definição dos pontos de amostragem deve considerar:

- histórico de uso e ocupação da área;
- proximidade de fontes potenciais de contaminação, como indústrias, vias urbanas, áreas de disposição de resíduos;
- características hidrogeológicas e ambientais locais.

De forma geral:

- em solos, podem ser coletadas amostras superficiais e em profundidade, conforme o potencial de contaminação e o modelo conceitual da área;
- em águas superficiais e subterrâneas, a amostragem pode contemplar pontos a montante e jusante de fontes potenciais de contaminação, além de considerar variações sazonais e, quando aplicável, diferentes profundidades de coleta.

A coleta deve ser realizada de forma a minimizar contaminação cruzada e perdas de analitos, utilizando recipientes adequados e condições de preservação e armazenamento compatíveis com a estabilidade dos compostos investigados.

Em determinados contextos, podem ser utilizados métodos complementares, como amostradores passivos, especialmente para compostos presentes em baixas concentrações ou com elevada mobilidade.

O controle de qualidade constitui etapa essencial do processo amostral, podendo incluir amostras de branco, duplicatas, amostras de controle e outros procedimentos destinados a assegurar a confiabilidade, rastreabilidade e representatividade dos resultados obtidos.

4.6.5 Métodos de análise

A análise desses “outros POPs” emergentes apresenta desafios significativos em razão das baixas concentrações normalmente encontradas no ambiente, da diversidade de matrizes investigadas e da ampla variação de suas propriedades físico-químicas. Neste contexto, técnicas cromatográficas acopladas à espectrometria de massa desempenham papel fundamental na identificação e quantificação desses compostos, enquanto a seleção adequada dos métodos de extração é essencial para garantir precisão, exatidão e reprodutibilidade dos resultados.

De modo geral, destacam-se:

- GC-MS/MS, amplamente empregada para compostos menos polares e mais voláteis, como PBDEs e SCCP;
- LC-MS/MS, essencial para compostos mais polares e termolábeis, incluindo contaminantes farmacêuticos e produtos de transformação como a 6PPD-quinona;
- técnicas cromatográficas com detecção alternativa (ex.: HPLC-UV/DAD), que podem ser utilizadas em contextos específicos, embora com menor sensibilidade.

A preparação de amostras constitui uma etapa determinante para a qualidade dos resultados analíticos e deve ser compatível tanto com a matriz investigada quanto com os compostos de interesse. Diferentes abordagens podem ser empregadas, incluindo extração em fase sólida para amostras aquosas e métodos de extração aplicáveis a matrizes sólidas e biológicas, abrangendo métodos tradicionais e alternativas mais recentes.

Entre os principais desafios analíticos, destacam-se:

- diversidade estrutural dos compostos e seus metabólitos;

- necessidade de detectar concentrações em níveis traço;
- interferências associadas à matriz ambiental;
- diferença entre métodos, escopos analíticos e limites de quantificação disponíveis em diferentes laboratórios.

No contexto do gerenciamento de áreas contaminadas, a escolha dos métodos analíticos deve considerar a compatibilidade com os compostos de interesse, a inclusão de substâncias ambientalmente relevantes, incluindo produtos de transformação, e a adequação dos limites de detecção aos objetivos e ao cenário avaliado.

4.6.6 Legislação

Sob a perspectiva regulatória, alguns desses compostos já se encontram formalmente listados na Convenção de Estocolmo, como o c-decaBDE e os SCCPs, incluídos em 2017. Outros compostos encontram-se em avaliação pelo Comitê de Revisão Poluentes Orgânicos Persistentes (*Persistent Organic Pollutants Review Committee – POPRC*), como o metoxicloro. Há ainda substâncias emergentes que apresentam características compatíveis com POPs, mas que ainda não foram formalmente avaliadas ou incorporadas ao tratado internacional.

A regulamentação desses “outros POP” está estruturada principalmente em nível internacional, com destaque para a Convenção de Estocolmo, que estabelece critérios para identificação, restrição e eliminação de substâncias persistentes, bioacumulativas, tóxicas e com potencial de transporte a longas distâncias.

Ao longo do tempo, a lista de substâncias contempladas pela Convenção foi ampliada para incluir compostos adicionais, como PBDE e SCCP, refletindo o avanço do conhecimento científico e a identificação de novos contaminantes de preocupação ambiental.

No Brasil, a regulamentação aplicável aos “outros POPs” no contexto de áreas contaminadas já contempla parte dessas substâncias. A Resolução CONAMA nº 420 (atualmente em revisão) estabelece valores orientadores para solo e água subterrânea para alguns compostos orgânicos persistentes, e alguns órgãos ambientais estaduais também dispõem de valores orientadores complementares.

No entanto, considerando a diversidade de substâncias enquadradas como POP, especialmente aquelas recentemente identificadas ou ainda em processo de avaliação internacional, a cobertura regulatória permanece parcial. Assim, embora existam referências

nacionais e estaduais para parte desses compostos, ainda não há critérios específicos disponíveis para todos os POPs de interesse.

Nessas situações, a avaliação pode demandar a utilização de referências complementares, incluindo valores orientadores e abordagens desenvolvidos por organismos internacionais e agências reguladores, como a US EPA, além da aplicação de ferramentas de avaliação de risco adequadas ao cenário investigado.

Diante desse cenário, a avaliação de “outros POPs” em áreas contaminadas deve considerar não apenas o status regulatório das substâncias, mas também sua relevância ambiental, persistência, potencial de bioacumulação e possíveis vias de exposição, priorizando abordagens técnicas fundamentadas em avaliação de risco quando inexistirem critérios regulatórios específicos.

5 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A avaliação de contaminantes emergentes no contexto ambiental envolve desafios técnicos, analíticos e regulatórios que ainda estão em evolução.

Diferentemente de contaminantes tradicionalmente regulados, muitos desses compostos não possuem valores orientadores estabelecidos, o que demanda uma abordagem baseada em linhas de evidência, contexto de uso e interpretação criteriosa dos dados disponíveis.

A inclusão desses contaminantes em estudos ambientais deve ser realizada de forma fundamentada, considerando:

- relevância para o contexto da área avaliada
- potencial de ocorrência com base no histórico de uso
- viabilidade analítica
- objetivos do estudo

Adicionalmente, é importante reconhecer que limitações metodológicas ainda estão presentes para diversos grupos de substâncias, especialmente no que se refere à padronização de métodos e à comparabilidade de resultados.

Nesse sentido, os dados obtidos devem ser interpretados com cautela, sempre considerando as incertezas associadas às técnicas utilizadas e ao estágio atual de conhecimento científico.

Por fim, ressalta-se que a gestão de contaminantes emergentes deve evoluir de forma integrada ao avanço do conhecimento técnico e ao desenvolvimento de marcos regulatórios, evitando a adoção de abordagens desproporcionais ou desalinhadas com o contexto nacional.

6 REFERÊNCIAS

- AESAS, 2024. Boletim Técnico - Orientação para revisão de dados para fins de estudos ambientais-análises de PFAS. Fonte: GT laboratórios.
- AESAS, 2024. Orientação técnica para solicitação de análise de PFAS em matrizes ambientais. Fonte: GT laboratórios
- AESAS, 2024. Orientação geral para amostragem de substâncias Per e Poli-Fluoralquiladas (PFAS). Fonte: GT Contaminantes Emergentes
- ECHA. Assessment of Regulatory Needs (ARN) Reports: Addressing groups of substances of concern. Helsinki, 2025.
- ECHA. Substances of Very High Concern (SVHC) Identification. Disponível em: <https://echa.europa.eu/candidate-list-table>.
- ITRC. Emerging Contaminants: Framework for Identification and Management. Washington, D.C.: Environmental Council of the States. Disponível em: <https://itrcweb.org>.
- ITRC. Strategies for Preventing and Managing Emerging Contaminants in Environmental Media. Washington, D.C., 2024.
- OECD. Global Database on Chemicals and Environment: Persistent Organic Pollutants and Emerging Risks. Paris, 2025.
- OECD. Series on Risk Management: Emerging Contaminants and Chemical Safety. Paris: OECD Publishing. Disponível em: <https://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/>.
- USEPA. Contaminant Candidate List (CCL 5): Draft and Final Chemicals for Regulatory Consideration. Washington, D.C.: Office of Water. Disponível em: <https://www.epa.gov/ccl>.
- USEPA. Emerging Contaminants and Chemicals of Concern (ECCs) in Environmental Media. Technical Fact Sheets. Washington, D.C., 2024.
- WHO. Emerging Chemicals in Water and Sanitation: Global health risks and monitoring protocols. Geneva, 2024.
- WHO. Guidelines for Drinking-water Quality: 4th Edition incorporating the 1st and 2nd addenda. Geneva: World Health Organization, 2022.

PARTICIPANTES NA ELABORAÇÃO DO GUIA

