



N OVA

NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DA TERRA

GEOQUÍMICA APLICADA A PERÍCIA AMBIENTAL

O CASO DE ESTUDO DOS SÍTIOS CONTAMINADOS

ERIKA VON ZUBEN

Bacharel em Química

DOUTORAMENTO EM ENGENHARIA GEOLÓGICA

Universidade NOVA de Lisboa

Outubro, 2024

GEOQUÍMICA APLICADA A PERÍCIA AMBIENTAL

O CASO DE ESTUDO DOS SÍTIOS CONTAMINADOS

ERIKA VON ZUBEN

Bacharel em Química

Orientadora: Paulo do Carmo de Sá Caetano,
Professor Associado com Agregação da Universidade NOVA de Lisboa

Coorientadores: Carlos Manuel de Sousa Nunes da Costa
Professor Auxiliar Aposentado da Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Fernando José Cebola Lidon
Professor Catedrático da Universidade NOVA de Lisboa

Arguentes: Heloísa Duarte de Oliveira,
Professora Auxiliar Convidada da Universidade de Lisboa
Maria da Graça Azevedo de Brito,
Professora Auxiliar da Universidade NOVA de Lisboa

Orientador: Paulo do Carmo de Sá Caetano,
Professor Associado com Agregação da Universidade NOVA de Lisboa

Membros: Eduardo Anselmo Ferreira da Silva,
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro
Joaquim Eduardo de Sousa Góis,
Professor Auxiliar da Universidade do Porto

Geoquímica aplicada a perícia ambiental

Copyright © Erika von Zuben, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta tese através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Este documento foi criado com o processador de texto Microsoft Word e o template NOVAtesis Word [11].

Dedico esta tese aos meus pais, Aquiles e Célia, por me terem ensinado nobres valores humanos, legando-me um dos maiores bens, a Educação. Seu apoio incondicional, exemplo de integridade e amor pelo conhecimento foram fundamentais na minha jornada.

AGRADECIMENTOS

A meu pai, Newton Aquiles von Zuben, minha carga genética mais forte e meu alicerce moral, expresso minha mais profunda gratidão pela educação que me proporcionou, pelos valores que me inculcou e pela disciplina que sempre me guiou. Seu exemplo de integridade, determinação e compromisso com o conhecimento foi essencial para que eu chegasse até aqui. À minha mãe, Célia von Zuben, meu porto seguro e minha maior incentivadora, sou eternamente grata pela sua dedicação, paciência e amor incondicional. Vocês sempre foram minha bússola, orientando-me nos momentos de incerteza. Obrigada por me encorajarem continuamente, por confiarem em mim e por estarem presentes em todos os momentos da minha vida. O profundo amor que vocês têm por mim é um presente que carrego com orgulho e gratidão.

Ao meu orientador, Paulo Sá Caetano, um verdadeiro exemplo de serenidade e diplomacia, expresso minha sincera gratidão. Como investigador, reúne os raros atributos de um profundo compromisso ético, honestidade e humildade intelectual. Desde o início, seu apoio pleno foi fundamental para minha jornada, assim como seu incentivo irrestrito, a interatividade nos diálogos e a liberdade intelectual que você proporcionou ao longo de toda a tese.

Ao meu estimado Paulo Affonso Leme Machado, amigo, mentor e grande incentivador, minha mais profunda gratidão. Obrigada por ser tanto, mesmo sem saber, e por compartilhar seu conhecimento com humildade. Agradeço pelo acolhimento e pelos momentos preciosos compartilhados. Você sempre será uma fonte de inspiração para mim. Suas aulas, que sempre privilegiaram o diálogo na construção do conhecimento, deixaram uma saudade imensa em meu coração.

Aos meus professores da vida, meus referenciais teóricos, geólogos apaixonados pela ciência da Terra, Ernesto Moeri e Carlos Costa. Embora minhas palavras nunca consigam expressar plenamente a admiração que sinto pela coragem visionária que demonstraram em um tempo em que poucos falavam sobre sítios contaminados, quero que saibam o impacto que

tiveram em minha trajetória. Vocês levaram consigo um pouco da minha história, mas deixaram um legado de paixão pela conservação ambiental, ética e profissionalismo. Sempre serão uma fonte de incentivo e inspiração em minha vida.

Carlos Costa, sou profundamente grata por me ter guiado nessa jornada. Vossos conselhos e encorajamento constante foram essenciais para intensificar o desafio e aprimorar a profundidade e a clareza desta tese. Foste um verdadeiro farol durante a minha navegação nas águas turvas desse tema em Portugal.

Agradeço a todos aqueles que me formaram desde cedo e se dispuseram a compartilhar seus conhecimentos. Um agradecimento especial ao professor que despertou minha paixão pela química durante o ensino médio. Sua influência foi decisiva para meu crescimento nesta área e me incentivou a fortalecer, cada vez mais, meu compromisso com esse campo do conhecimento.

Gratidão aos meus avós e todos meus ancestrais por terem tecido o meu caminho. Sinto profunda gratidão pela imensidão dos seus sonhos, que, de alguma forma, são hoje a minha realidade. Honro e agradeço a todos que foram meus alicerces, pois sou, hoje, o resultado de um futuro que eles sonharam. Graças a eles, pude renovar nossas raízes, incontáveis desejos reprimidos, sonhos não realizados, talentos frustrados se manifestam na minha teimosia em buscá-los. Aceitei, com honra a missão de explorar caminhos de libertação para minha árvore genealógica e seguirei honrando o sonho de todos vocês.

À amiga Sonia Pereira, agradeço profundamente por suas palavras sempre sábias, pelo apoio e orientação espiritual que me ofereceu. Sua presença tem sido fundamental para me ajudar a compreender o significado maior das coisas.

Ao meu marido, Paulo Sérgio Silvério Júnior, que esteve ao meu lado no final desta jornada, nos momentos mais desafiadores, e me inspirou a dar o meu melhor a cada passo. Sou eternamente grata por ter você ao meu lado, e juntos, celebramos não apenas esta conquista, mas a força do nosso amor.

A Deus e aos meus mestres espirituais por me guiarem e acompanharem ininterruptamente.

Minha Jornada na Ciência: A Investigadora do Invisível

A curiosidade é a força motriz do conhecimento. É ela que nos desafia a sair da zona de conforto, expandir nosso repertório e explorar o desconhecido. Essa incessante busca por respostas sempre inquietou meu espírito. Desde cedo, fui fascinada por narrativas de mistério e guiada por uma mente analítica, intuitiva e perspicaz. Esse impulso inato para decifrar enigmas me levou por um caminho repleto de descobertas e aprendizagens. Essas experiências enriqueceram o meu repertório e inspiraram-me a seguir o caminho da ciência.

O que eu jamais poderia imaginar era que, um dia, me tornaria uma verdadeira detetive, desvendando os crimes silenciosos que ameaçam a humanidade. Hoje, sinto-me privilegiada por aplicar minhas habilidades - aliadas ao rigor científico e à experiência adquirida - para trazer à luz os mistérios ocultos na contaminação ambiental. Exerço minha profissão com profundo orgulho, sabendo que, mesmo de forma modesta, contribuo para um futuro mais sustentável.

Se você se pergunta o que torna meu trabalho tão emocionante, permita-me explicar: assim como nas histórias clássicas de detetive, as investigações forenses ambientais começam com um crime de poluição, vestígios ocultos e alguns suspeitos. Por meio da análise minuciosa de indícios ambientais e do uso de técnicas científicas avançadas, buscamos identificar as fontes da contaminação, traçar a trajetória dos contaminantes e, por fim, responsabilizar os autores do dano. E o mais fascinante? Mesmo quando o crime foi cometido há décadas, o solo e a água ainda guardam segredos, permitindo que a ciência reconstitua o passado e revele a verdade. É essa missão que me move. E é por isso que meu mantra sempre foi e continuará sendo: *assim como os meus antepassados semearam para mim antes mesmo do meu nascimento, eu também sementarei para aqueles que se seguirem a mim*. E às futuras gerações, desejo que ainda tenham o privilégio de contemplar nosso planeta com a mesma admiração e gratidão que eu tive o privilégio de experimentar.

"No one is too small to make a difference." (Greta Thunberg)

RESUMO

A existência de sítios contaminados representa um dos maiores desafios ambientais da atualidade, tornando essencial uma gestão eficaz voltada à eliminação dos riscos para a população e o meio ambiente. Esse tema tem sido amplamente discutido no cenário global, e a caracterização e quantificação dos danos ambientais exigem uma metodologia faseada e estruturada, na qual cada etapa de investigação fornece subsídios para a fase seguinte. Um dos elementos centrais para a elaboração de um modelo conceptual preciso é a consideração do comportamento dos contaminantes em função das características geológicas do local. Em áreas de geologia complexa, as incertezas associadas à geoquímica e à heterogeneidade do solo dificultam o dimensionamento do dano ambiental, podendo comprometer a eficácia nas estratégias de remediação e, conseqüentemente, na mitigação dos riscos. Nesse contexto, a perícia ambiental assume um papel fundamental, permitindo a avaliação científica de dados químicos, geológicos e históricos que, quando sistematizados, possibilitam a reconstrução dos factos e a utilização dessas evidências para resolver litígios decorrentes da contaminação ambiental. Além de fornecer uma base científica robusta para embasar decisões judiciais, a perícia ambiental responde a questões essenciais, como: (i) qual é a extensão da contaminação; (ii) há receptores afetados; (iii) a que nível de contaminação os receptores estão expostos e por quanto tempo; (iv) quais substâncias químicas estão presentes e, (v) quais as ações necessárias para reparar o dano e eliminar o risco para a saúde humana? Assim, a geoquímica aplicada à perícia ambiental tem como principais objetivos determinar a existência, concentração, especiação, mobilidade potencial e migração efetiva das substâncias de origem antrópica nos diferentes compartimentos ambientais, contribuindo para a tomada de decisões técnicas e jurídicas mais assertivas e sustentáveis.

Palavras chave: perícia ambiental, geoquímica, sítio contaminado, avaliação da contaminação, hidrocarbonetos alifáticos clorados, DNAPL, dano ambiental.

ABSTRACT

The existence of contaminated sites represents one of the greatest environmental challenges today, making effective management essential to eliminate risks to both the population and the environment. This topic has been widely discussed globally, and the characterization and quantification of environmental damage requires a phased and structured methodology, where each stage of the investigation provides the foundation for the next. A key element in developing an accurate conceptual model is considering how contaminant behavior is directly influenced by the geological characteristics of the site. In areas with complex geology, uncertainties related to geochemistry and soil heterogeneity make damage assessment more challenging, potentially compromising the effectiveness of remediation strategies and, consequently, risk mitigation. In this context, environmental forensics plays a fundamental role, enabling the scientific evaluation of chemical, geological, and historical data, which, when systematized, allow for the reconstruction of facts and the use of this evidence in resolving disputes arising from environmental contamination. In addition to providing a robust scientific basis for supporting judicial decisions, environmental forensics answers essential questions such as: (i) what is the extent of contamination? (ii) are receptors affected? (iii) at what contamination levels and for how long are receptors exposed? (iv) what chemical substances are present? and (v) what actions are necessary to repair the damage and eliminate risks to human health? Thus, geochemistry applied to environmental forensics aims to determine the presence, concentration, speciation, potential mobility, and effective migration of anthropogenic substances across different environmental compartments, contributing to more accurate and sustainable technical and legal decision-making.

Keywords: environmental expertise, geochemistry, contaminated sites, contamination assessment, chlorinated aliphatic hydrocarbons, DNAPL, environmental damage.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Contexto e motivação.....	2
1.2	Problema e relevância.....	5
1.3	Objetivos.....	7
1.4	Metodologia.....	8
1.5	Organização da tese.....	9
2	ASPETOS LEGAIS DA PROTEÇÃO DO AMBIENTE.....	13
2.1	Aspetos relevantes do direito do ambiente em Portugal.....	17
2.2	Responsabilidade civil de reparação do dano ambiental no contexto português ...	26
2.2.1	Desafios e questões fundamentais sobre responsabilização ambiental.....	32
3	PERÍCIA AMBIENTAL.....	37
3.1	Perícia ambiental em sítios contaminados.....	37
3.2	A perícia ambiental em Portugal.....	43
4	GEOQUÍMICA AMBIENTAL.....	48
4.1	Solo e contaminação do solo.....	49
4.2	Fases do solo.....	54
4.2.1	Fase sólida.....	55
4.2.2	Fase líquida.....	56
4.2.3	Fase gasosa.....	57
4.3	Tipos de contaminantes.....	58
4.3.1	Metais pesados.....	59

4.3.2	Hidrocarbonetos de petróleo	62
4.3.3	Hidrocarboneto clorados.....	68
4.3.4	Radioativos	74
5	AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO.....	78
5.1	Atividade potencialmente poluidora	81
5.2	Avaliação preliminar	83
5.2.1	Modelo conceptual da contaminação	85
5.2.2	Plano de investigação exploratória	86
5.3	Investigação exploratória.....	89
5.4	Técnicas de investigação	90
5.4.1	Presença de fase livre	97
5.5	Investigação detalhada.....	99
5.6	Modelo conceptual da contaminação.....	104
5.7	Avaliação quantitativa de risco para saúde humana.....	105
5.8	Remediação.....	109
5.9	Monitorização para encerramento.....	111
5.10	Investigação de sítios contaminados em Portugal	111
6	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	116
6.1	Geoquímica ambiental dos sítios contaminados	117
6.1.1	Características e propriedades do solo.....	120
6.2	Propriedades dos hidrocarbonetos alifáticos clorados	124
6.3	Comportamento dos hidrocarbonetos alifáticos clorados em meio poroso	126
6.3.1	Fases dos hidrocarbonetos alifáticos clorados em meio poroso	127
6.3.2	Mecanismo de transporte de hidrocarbonetos alifáticos clorados em meio poroso	135
6.4	Degradação de hidrocarbonetos alifáticos em meio poroso	137
6.5	Estado da arte na obtenção de dados em aquífero sedimentar	145
7	DESAFIOS TÉCNICOS NA CARACTERIZAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO	154
7.1	Complexidade geológica.....	155

7.2	Dinâmica hidrogeológica	156
7.3	Influência da geoquímica	157
7.4	Característica da contaminação.....	161
7.5	Escala e extensão da contaminação	163
7.6	Complexidade da contaminação.....	163
8	CASO DE ESTUDO	167
8.1	Sítio de estudo	168
8.1.1	Enquadramento geológico e hidrogeológico.....	169
8.2	Estudos ambientais realizados no local	172
8.2.1	Resultados das investigações realizadas em 2021.....	202
8.2.1.1	Resultados da investigação	208
8.2.1.2	Refinamento do modelo conceptual	209
8.2.1.3	Pluma de contaminação e estimativa de massa de contaminante.....	210
8.3	Investigação pré-remediação.....	216
8.4	Conclusão dos estudos	222
8.5	Perícia ambiental	226
8.6	Quebra de paradigma: ressignificar as abordagens tradicionais	232
9	DISCUSSÃO.....	235
10	CONCLUSÃO	245

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.3.2.1 Classificação dos hidrocarbonetos alifáticos clorados.....	62
Figura 4.3.2.2 Estrutura molecular do BTEX.	64
Figura 4.3.2.3 Estrutura molecular dos 16 PAHs prioritários	67
Figura 4.3.3.1 Estrutura molecular dos hidrocarbonetos alifáticos clorados	69
Figura 4.3.3.2 Estrutura molecular dos hidrocarbonetos alifáticos clorados - clorofenóis	71
Figura 4.3.3.3 Representação genérica da estrutura molecular das bifenilas policloradas.....	72
Figura 4.3.3.4 Estrutura molecular dos hidrocarbonetos alifáticos clorados - DDT	73
Figura 5.1 Fluxograma das etapas de gestão de sítios contaminados.....	80
Figura 5.4.1 Elementos chave do modelo conceptual de intrusão de vapor.....	93
Figura 5.4.2 Amostrador passivo	94
Figura 5.4.3 Sequência de instalação de amostrador passivo na relva	94
Figura 5.4.4 Esquema da instalação dos amostradores passivos no betão e na relva.....	96
Figura 5.4.1.1 Modelo conceptual LNAPL.....	97
Figura 5.4.1.2 Modelo conceptual DNAPL	97
Figura 6.3.1.1 Modelo conceptual de migração de DNAPL	128
Figura 6.3.1.2 Modelo dos 14 compartimentos para distribuição de etenos clorados	135
Figura 6.4.1 Sequência de reações em etenos clorados	139
Figura 6.4.2 Indicadores de consumo de aceptores finais de eletrões.....	140
Figura 6.4.3 Processo de redução de compostos hidrocarbonetos alifáticos clorados.....	143
Figura 8.1.1 Localização do sítio investigado.....	168
Figura 8.1.1.1 Perfil geológico transversal A-A'	170
Figura 8.1.1.2 Perfil geológico longitudinal B-B'	171
Figura 8.1.1.3 Antigo curso do Rio Pinheiros antes da retificação em 1940	172
Figura 8.2.1 Cronograma dos estudos de investigação e remediação realizados	173
Figura 8.2.2 Perfil até o solo de alteração	200
Figura 8.2.1.1 Potenciometria – nível raso	205
Figura 8.2.1.2 Potenciometria – nível A.....	206

Figura 8.2.1.3 Potenciometria – nível intermediário.....	207
Figura 8.2.1.2.1 Modelo conceptual no perfil A-A'	209
Figura 8.2.1.2.2 Modelo conceptual no perfil B-B'	210
Figura 8.2.1.3.1 Pluma de PCE em planta	212
Figura 8.2.1.3.2 Pluma de PCE no perfil B-B'	213
Figura 8.2.1.3.3 Pluma de CV em planta	213
Figura 8.2.1.3.4 Pluma de CV no perfil B-B'	214
Figura 8.3.1 Pluma de PCE no perfil B-B'.....	217
Figura 8.3.2 Pluma de TCE no perfil B-B'	217
Figura 8.3.3 Pluma de DCE no perfil B-B'.....	218
Figura 8.3.4 Pluma de CV no perfil B-B'	218
Figura 8.3.5 Plumas de PCE no perfil B-B' (2021 e 2023)	220
Figura 8.3.6 Plumas de CV no perfil B-B' (2021 e 2023)	221

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 6.2.1 Propriedades físico-químicas dos hidrocarbonetos alifáticos clorados	124
Tabela 6.3.1.1 Distribuição dos etenos clorados de acordo com o estágio de contaminação, Inicial, Intermédio e Avançado	132
Tabela 6.4.1 Parâmetros analíticos degradação anaeróbica.....	141
Tabela 6.4.2 Relação entre processo oxidativo e potencial de oxirredução (Eh)	142
Tabela 6.4.3 Processos de degradação dos etenos clorados.....	144
Tabela 8.2.1 Resultados da investigação ambiental de 2004	174
Tabela 8.2.2 Resultados da avaliação de risco para saúde humana para PCE.....	176
Tabela 8.2.3 Resultados da avaliação de risco para saúde humana para TCE.....	177
Tabela 8.2.4 Resultados da avaliação de risco para saúde humana para DCE	177
Tabela 8.2.5 Resultados da avaliação de risco para saúde humana para CV.....	177
Tabela 8.2.6 Resultados obtidos na 4ª campanha de monitorização – 2009	183
Tabela 8.2.7 Resultados obtidos na investigação de 2015	188
Tabela 8.2.8 Resultados obtidos na investigação de 2018	194
Tabela 8.2.9 Resultados comparativo das campanhas de monitorização de 2015 e 2018	194
Tabela 8.2.1.1.1 Propriedades hidrogeológicas	204
Tabela 8.2.1.2.1 Patrâmetros in-situ	208
Tabela 8.2.1.1.1 Massa de contaminante	211
Tabela 8.2.1.3.2 Hidroestratigrafia dos aquíferos.....	214

SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ACP	Ação civil pública.
APA	Agência Portuguesa do Ambiente.
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials.</i>
CCDR	Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional.
CE	Condutividade elétrica.
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.
COVH	Compostos orgânicos voláteis halogenados
CPC	Código de Processo Civil
CRP	Constituição da República Portuguesa
CTC	Capacidade de troca catiónica
CV	Cloreto de vinilo
DCE	Dicloroetano
DNAPL	Dense Non-Aqueous Phase Liquid
EEA	<i>European Environment Agency</i>
E _h	Potencial de oxirredução
IPT	Instituto de Pesquisa Tecnológica
ITRC	<i>Interstate Technology and Regulatory Council</i>
LNAPL	<i>Light Non-aqueous Phase Liquid</i>
NAPL	<i>Non-aqueous Phase Liquid</i>

OD	Oxigénio dissolvido
PCB	Bifenila policlorada
PCE	Tetracloroetano
PID	Fotoionizador portátil
RJRA	Regime jurídico da responsabilidade por danos ambientais
RGGR	Regime Geral de Gestão de Resíduos
SEPNA	Serviço de Proteção da Natureza e do Ambiente
SSTL	<i>Site specific target levels</i>
TCE	Tricloroetano
TJSP	Tribunal de Justiça do Estado de São Paulo
UE	União Europeia
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>

ASPECTOS CONCEPTUAIS

Contaminação: presença de substância química resultante da atividade humana em concentrações superiores aos limites máximos estabelecidos.

Local contaminado: uma área delimitada de uma ou várias parcelas com presença confirmada de contaminação causada pela presença de uma substância ou de material no solo numa concentração que pode ser nociva para a saúde ou para o ambiente (UE, 2024).

Solo contaminado: é aquele que contém substâncias químicas em concentrações superiores aos níveis considerados seguros, resultantes de atividades humanas, podendo representar risco para a saúde humana, aos ecossistemas e aos recursos hídricos, exigindo medidas de controlo, monitorização e remediação.

Gestão de sítios contaminados: é o conjunto de ações e estratégias técnicas, jurídicas e administrativas aplicadas para identificar, avaliar, monitorar e remediar sítios impactados por contaminação, garantindo a mitigação dos riscos para a saúde humana e para o ambiente.

Atividade potencialmente poluidora: é qualquer atividade industrial, agrícola ou comercial que, por sua natureza, pode gerar impactes ambientais adversos, resultando na contaminação do solo, da água ou do ar, exigindo medidas de controlo e monitorização para prevenir ou mitigar danos ao meio ambiente e para a saúde pública.

Dano ambiental: é qualquer alteração adversa ao meio ambiente, resultante de atividades humanas ou naturais, que comprometa a qualidade do solo, da água, do ar, da fauna ou da flora, afetando o equilíbrio ecológico e causando prejuízos para a saúde pública ou aos ecossistemas.

Passivo ambiental: é o conjunto de impactes negativos acumulados no meio ambiente devido a atividades humanas passadas ou presentes, resultando em danos ao solo, à água, ao ar e à biodiversidade.

Perícia ambiental: é a análise técnica e científica realizada por especialistas para investigar, diagnosticar e quantificar danos ambientais, identificando suas causas, impactes e responsáveis. É uma ferramenta fundamental em processos judiciais, administrativos e de gestão ambiental, subsidiando a tomada de decisões e a aplicação da legislação ambiental.

Área fonte: é o principal ponto de origem da migração de contaminantes para o solo, a água subterrânea e o ar.

Fonte primária de contaminação: é a origem direta da contaminação, caracterizada pela presença do contaminante em sua forma original. Representa o principal ponto de liberação de substâncias química para o solo, a água subterrânea e a atmosfera.

Fonte secundária de contaminação: meio físico na qual os contaminantes ficam armazenados ou retidos no solo, sedimentos, água subterrânea ou materiais estruturais. Esses contaminantes podem ser liberados gradualmente ao longo do tempo, atuando como uma fonte contínua de contaminação, mesmo após a remoção da fonte primária.

Indício de contaminação: é qualquer evidência preliminar que sugira a possível presença de substâncias contaminantes no solo, na água subterrânea, no ar ou em outros compartimentos ambientais. Pode ser identificado por alterações visíveis, como manchas, odores, vegetação afetada ou mudanças na qualidade da água

Via de exposição: é o caminho pelo qual um contaminante entra em contato com um receptor, seja ele humano ou ecológico.

Valor objetivo de remediação (VOR): concentração de contaminante que deve ser alcançado nos compartimentos do meio físico através da execução de medida de remediação.

Valor de referência: concentração de um contaminante no meio acima da qual pode haver risco inaceitável para a saúde humana e/ou para o ambiente (APA, 2019).

Modelo conceptual: é a representação simplificada da dinâmica de contaminação em um sítio, que descreve a origem dos contaminantes, suas vias de migração e os potenciais receptores expostos. Ele integra dados geológicos, hidrogeológicos, químicos e ambientais, permitindo a compreensão do comportamento dos contaminantes no meio físico.

Unidade hidroestratigráfica: é um corpo geológico definido com base em suas propriedades hidráulicas, determinando sua capacidade de armazenar e transmitir água subterrânea. Essas unidades são classificadas de acordo com sua permeabilidade.

Risco: é a probabilidade de ocorrência de efeitos adversos para a saúde humana ou ao meio ambiente resultantes da exposição à contaminação do solo.

Avaliação de risco: é o processo sistemático de identificação, quantificação e caracterização dos perigos potenciais associados à presença de contaminantes no meio ambiente. Esse processo busca determinar a probabilidade e a gravidade dos impactos para a saúde humana e aos ecossistemas, considerando fatores como tipo e concentração dos contaminantes, vias de exposição e vulnerabilidade dos recetores.

Recetor: é qualquer organismo, sistema ambiental ou grupo populacional que pode ser afetado pela exposição a contaminantes presentes no solo, na água, no ar ou em outras matrizes ambientais.

Via de Ingresso: é o mecanismo pelo qual um contaminante entra no organismo de um recetor, podendo causar impactos para a saúde humana ou biota.

Remediação: técnica ou conjunto de técnicas de tratamento biológico, físico-químico ou térmico, confinamento e gestão, realizadas para controlar, confinar, reduzir ou eliminar os contaminantes ou as vias de exposição, para que um solo contaminado deixe de constituir um risco inaceitável para a saúde humana e/ou para o ambiente, tendo em conta o seu uso atual ou futuro (APA, 2019).

INTRODUÇÃO

Parafraseando Garcia (2010), se traçarmos um paralelo entre questões ambientais e o célebre anúncio da marca de relógios Patek Philippe lançada em 1996: *“You never actually own a Patek Philippe. You merely look after it for the next generation”*, podemos afirmar que *“Ninguém é, de fato, proprietário da Terra. Limita-se a conservá-la para as futuras gerações”*.

Os passivos ambientais decorrentes da contaminação têm sido uma preocupação constante nas políticas de proteção ambiental da União Europeia (UE). Contudo, a criação de uma legislação específica e vinculativa para a proteção do solo contaminado no espaço europeu não foi concretizada, ao contrário do que ocorre com a água e o ar. Isso se deve a diversos fatores, entre eles:

- Diversidade geológica e socioeconômica entre os Estados-Membros: o solo é um recurso altamente variável entre os países da UE, tanto em termos geológicos quanto em relação ao uso e ocupação do território. As diferenças socioeconômicas também influenciam a forma como cada país gerencia seus solos, tornando difícil a criação de uma legislação única e abrangente que atenda a todos os Estados-Membros;
- Princípio da Subsidiariedade: a União Europeia segue o princípio da subsidiariedade, que determina que a regulamentação de determinadas questões deve ser feita no nível mais próximo do cidadão. Como os solos estão profundamente ligados às políticas nacionais de uso da terra, muitos Estados-Membros argumentam que a regulamentação do solo contaminado deve ser uma competência nacional, e não da EU;
- Tentativas frustradas de regulamentação: a Diretiva de Proteção do Solo foi proposta pela Comissão Europeia em 2006, mas encontrou forte oposição de alguns países, como Reino Unido, Alemanha, França, Holanda e Áustria, que alegavam

que a proposta geraria custos excessivos e burocracia adicional. Em 2014, após quase uma década sem consenso, a proposta foi retirada;

- Iniciativas voluntárias e cooperação entre os países: sem uma diretiva específica, a UE optou por incentivar a troca de boas práticas e a criação de estratégias voluntárias, como o Pacto Verde Europeu, a Estratégia do Solo 2030 e a Missão da UE para a Saúde dos Solos. No entanto, essas iniciativas não têm força legal, cabendo a cada país decidir se adota ou não diretrizes para a proteção do solo contaminado.

A ausência de uma legislação europeia específica para solos contaminados resulta de uma combinação de desafios políticos, econômicos e técnicos, além da resistência de alguns Estados-Membros. No entanto, o tema tem ganhado relevância nos últimos anos, e é possível que novas propostas legislativas sejam discutidas no futuro, especialmente no contexto do Pacto Verde Europeu e da meta de alcançar a neutralidade climática até 2050.

Nesse contexto, Portugal deve assumir um papel proativo na gestão de solos contaminados, alinhando-se às boas práticas adotadas por outros Estados-Membros. Embora a União Europeia não disponha de uma legislação específica sobre o tema, cabe ao país reforçar seus mecanismos preventivos e corretivos, seja por meio de políticas públicas eficazes, seja ao responsabilizar poluidores e proprietários pela reabilitação dessas áreas. Dessa forma, Portugal pode avançar na proteção do solo e dos recursos naturais, promovendo uma gestão ambiental mais sustentável e alinhada aos desafios globais.

1.1 Contexto e motivação

As questões relativas aos danos ambientais e os meios para mitigá-los têm ganhado crescente relevância no cenário científico e jurídico global, especialmente porque o ambiente é vital para a existência de todos os seres vivos. Recursos naturais como o ar, o solo e a água são fundamentais para manutenção da vida, e essa consciência tem intensificado a preocupação mundial com os impactos adversos dos contaminantes na saúde humana.

Nesse contexto, torna-se evidente que a proteção ambiental está assumindo um papel cada vez mais central, sendo reconhecida como um valor ético fundamental para a sociedade. A preservação do ambiente deixou de ser apenas uma responsabilidade exclusivamente individual, passando a constituir uma obrigação coletiva. Dessa forma, a cooperação entre todos

os setores da sociedade torna-se essencial para enfrentar os desafios ambientais presentes e futuros de maneira eficaz e sustentável.

É nesse cenário que emerge a preocupação com a proteção jurídica do ambiente, cuja objetivo é garantir condições de vida dignas tanto para as gerações atuais quanto para as futuras. No entanto, a efetiva tutela ambiental por parte do Estado é uma questão de interesse público, formalizada por um extenso arcabouço de normas do Direito Ambiental. Na prática, a implementação dessas normas enfrenta diversos desafios, sendo um dos principais a necessidade de compreender uma realidade complexa que exige conhecimentos técnicos e científicos sobre o meio ambiente.

Não há dúvida de que a ação humana tem comprometido a manutenção deste equilíbrio, uma vez que a contaminação do solo e da água subterrânea apresenta efeitos cumulativos, e, em muitos casos, a regeneração natural desses recursos torna-se inviável, resultando em impactos adversos para toda forma de vida.

A magnitude dos danos históricos serviu como um catalisador para despertar a consciência da população sobre a degradação do meio ambiente, impulsionando os governantes a regulamentar e disciplinar as atividades humanas prejudiciais ao ambiente. Esse movimento tem se refletido tanto nas legislações nacionais quanto em iniciativas no âmbito das comunidades internacionais.

Nesta tese, adotou-se o conceito de dano ambiental baseado nas discussões de Mirra (2004), que o define como qualquer alteração na qualidade química, física e/ou biológica das matrizes ambientais (solo, água e ar), que corrobora o que enuncia o Decreto-Lei 147-2008 - Regime Jurídico da Responsabilidade por Danos Ambientais -, que caracteriza o dano ambiental como toda alteração adversa ou deterioração mensurável do recuso ambiental. Dessa forma, o dano ambiental representa a violação de um direito *erga omnes*, isto é, um direito de todos ao equilíbrio ecológico. Esse direito é fundamental, intergeracional, indivisível e de natureza difusa, sendo reconhecido como um bem de uso comum do povo.

Neste contexto, a perícia ambiental se configura como uma ciência interdisciplinar, integrando conhecimentos químicos, geológicos e históricos para investigar e compreender os impactos ambientais. Ao combinar a análise detalhada de evidências com a precisão científica exigida nos tribunais, essa área alia o rigor técnico à dinâmica de uma investigação forense. Embora muitas vezes despercebidos por muitos, os danos ambientais não afetam apenas o presente, mas também comprometem a qualidade de vida das gerações futuras.

O dano ambiental é uma das questões socioambientais mais críticas da sociedade contemporânea, e a perícia desempenha um papel fundamental na elucidação de tais danos. Sua função é reconstituir eventos e condições ambientais, permitindo a identificação das responsabilidades e viabilizando a reparação dos danos causados. Dessa forma, a perícia ambiental contribui para a promoção da justiça e proteção ao meio ambiente.

Portanto, a perícia ambiental desempenha um papel fundamental na identificação e análise de cenários complexos, sejam eles litigiosos ou não, especialmente quando envolvem múltiplas fontes de contaminação. Essa contaminação pode ocorrer devido à presença simultânea de diferentes contaminantes em um mesmo local ou à ação de diversas fontes ao longo do tempo e do espaço, tornando a investigação ainda mais desafiadora. Ao desvendar essas interações, a perícia ambiental contribui significativamente para a avaliação de riscos à saúde humana, fornecendo subsídios técnicos para implementação de medidas corretivas e preventivas eficazes.

Acredita-se, portanto, que a aplicação de técnicas estruturadas de investigação seja uma ferramenta essencial para a caracterização de um sítio contaminado, pois permite o desenvolvimento de modelos conceituais robustos e representativos. Esses modelos viabilizam a eliminação de alternativas de remediação ineficazes, tornando o processo de reabilitação mais eficiente a longo prazo e prevenindo perdas económicas, especialmente aquelas associadas a transações imobiliárias.

Um dos aspetos centrais dessa abordagem é a integração de dados históricos, químicos e geológicos para formular um modelo conceptual de contaminação tecnicamente defensável e que seja capaz de dirimir questões relacionadas à exposição da comunidade a riscos ambientais.

Como será demonstrado, Portugal já dispõe um quadro legal que poderia ser amplamente aproveitado. O que se faz necessário, no entanto, é um maior comprometimento político por parte do Poder Legislativo, do Poder Judiciário e da Administração Pública, não apenas na criação de leis e metodologias específicas, mas também na fiscalização efetiva e na responsabilização dos agentes envolvidos.

Em síntese, esta pesquisa busca discutir o atual cenário de governança do risco em Portugal, considerando a complexidade e as incertezas científicas que envolvem de exposição da população a riscos ambientais. É evidente que ainda há um longo caminho a percorrer para

que a abordagem dessas situações em locais contaminados seja mais eficaz, garantindo a proteção e a segurança da comunidade de forma consciente e sustentável.

1.2 Problema e relevância

O cerne da tese está em responder às questões fundamentais que orientam a investigação ambiental de sítios contaminados. No início desse processo, alguns dos principais pontos a serem discutidos são:

- Qual a extensão da contaminação? Determinar a área impactada e a profundidade da contaminação no solo e na água subterrânea;
- Existem recetores afetados? Identificar se populações humanas, ecossistemas ou recursos hídricos estão em risco;
- Em que nível de contaminação os recetores estão expostos e por quanto tempo? Avaliar a concentração dos contaminantes, as vias de exposição e a duração da exposição;
- Quais as substâncias químicas envolvidas? Caracterizar os compostos presentes, suas propriedades físico-químicas e sua interação com o meio;
- Quais são as medidas necessárias para reparar o dano e eliminar o risco para a saúde humana? Definir estratégias de remediação eficazes para mitigar os impactos e restaurar a qualidade ambiental.

Essas questões estruturam a investigação e fundamentam as decisões técnicas e regulatórias, garantindo uma abordagem científica e baseada em evidências na gestão de sítios contaminados.

Importa referir que nesta tese será dado particular destaque aos hidrocarbonetos alifáticos clorados, também conhecidos como solventes clorados, devido à sua ampla utilização industrial e ao impacto significativo que podem causar. Esses compostos são de elevada toxicidade, persistentes no ambiente, apresentam alta estabilidade química e baixa solubilidade em água, o que resulta em uma contaminação invisível, porém amplamente disseminadas.

Nesse contexto, o tema se torna relevante à luz dos recentes estudos em geoquímica e pelo desenvolvimento de métodos e técnicas aplicados pelas geociências na realização de perícias ambientais. A relevância científica desta abordagem reside não apenas na sua originalidade, mas também no fato de ser um campo ainda pouco explorado em Portugal. Dessa forma, esta pesquisa contribui para preencher lacunas no conhecimento e aprimorar as práticas periciais no contexto da contaminação ambiental.

A questão norteadora desta tese é como dimensionar um dano ambiental de forma eficaz e garantir que a comunidade na sua envolvente não esteja exposta a riscos invisíveis?

Essa indagação orienta a pesquisa ao abordar a necessidade de métodos precisos para quantificar o impacto ambiental e definir estratégias que garantam a proteção da saúde pública. Além disso, destaca a importância de ferramentas técnico-científicas avançadas na identificação e mitigação de contaminações que, muitas vezes, não são perceptíveis de imediato, mas representam ameaças significativas ao meio ambiente e à qualidade de vida das populações afetadas.

No âmbito académico, esta tese baseia-se em experiências internacionais para desenvolver um protocolo de caracterização e reabilitação de sítios contaminados em Portugal. Espera-se que essa abordagem contribua para a formulação de instrumentos eficazes de políticas públicas e para o aprimoramento das ações já implementadas pelos órgãos governamentais portugueses com jurisdição na área ambiental. Além disso, a pesquisa busca sensibilizar a comunidade científica e a sociedade sobre a responsabilidade do Estado na proteção ambiental, reforçando a necessidade de políticas mais estruturadas e eficientes. O objetivo final é promover melhorias na qualidade de vida da população, garantindo um ambiente mais seguro para todos.

Nesta perspetiva, busca-se evidenciar o valor agregado que os tribunais podem obter ao dispor de análises desenvolvidas dentro dessa métrica, possibilitando o julgamento de causas ambientais fundamentados em dados técnico-científicos que reflitam fielmente a realidade. No entanto, é indiscutível que a maturidade necessária só será alcançada por meio da criação de instrumentos legais e do avanço rumo a uma legislação robusta, que viabiliza e exija a implementação obrigatória dessa metodologia, garantindo maior segurança jurídica e eficácia na responsabilização ambiental.

Considerando que a contaminação compromete as funções naturais do solo e representa um risco tanto para o ambiente quanto para a saúde humana, a relevância social da pesquisa fica assim demonstrada, uma vez que a reabilitação eficaz de um sítio contaminado é do interesse de toda a sociedade. O abandono de áreas urbanas, especialmente em regiões de alta densidade populacional é uma realizada inaceitável. Por isso, a proteção da saúde pública deve ser prioridade, sobretudo para aqueles que vivem nas proximidades e estão expostos, direta ou indiretamente, ao risco decorrente da contaminação. Portanto, o principal desafio é o reabilitar esses locais para reduzir o risco para a saúde pública a um nível aceitável.

1.3 Objetivos

Diante da magnitude do tema abordado e das inquietações que ele suscita, esta tese tem como um de seus principais objetivos compreender e buscar respostas para as questões levantadas, por meio de uma revisão da literatura, da legislação vigente e da experiência profissional da autora.

Embora a perícia seja frequentemente discutida apenas em contextos jurídicos, esta tese propõe uma análise interdisciplinar e transdisciplinar do seu papel, ampliando a perspectiva sobre o ambiente. A complexidade é uma característica intrínseca dos conflitos ambientais e só pode ser plenamente compreendida por meio de avaliações que considerem as múltiplas interações e interesses envolvidos.

Para responder à questão norteadora, definimos como objetivo geral desta tese, abordar a perícia ambiental sob a ótica da gestão do conhecimento científico e da sustentabilidade. A inter-relação entre os saberes jurídico e científico é essencial para garantir um julgamento eficaz de conflitos ambientais e fundamentar decisões que promovam a justiça ambiental.

Para alcançar esse objetivo, a pesquisa busca:

- i. Produzir conhecimento técnico-jurídico sistemático sobre caracterização e dimensionamento de dano ambiental, com foco na contaminação de solo e de água subterrânea;
- ii. Adotar procedimentos metodológicos faseados de investigação científica para a elaboração de um laudo pericial ambiental aplicável à contaminação de solo e água subterrânea;
- iii. Descrever e conceituar a importância das perícias ambientais como prova técnica em disputas processuais.

O diferencial desta tese está em enfatizar que a identificação do dano ambiental deve seguir uma sequência rigorosa de etapas pré-determinadas. Caso contrário, as conclusões obtidas não podem ser consideradas válidas para a determinação de responsabilidades civis e administrativas em matéria de dano ambiental.

Assim, o desafio é superar as limitações político-econômicas, apresentando uma abordagem baseada em critérios técnico-científicos que fortaleçam a fundamentação e a confiabilidade dos processos periciais.

1.4 Metodologia

A metodologia adotada, nesta pesquisa baseia-se em uma abordagem rigorosa e estruturada, fundamentada em uma ampla revisão da literatura e na análise crítica de conceitos que definem o estado da arte no campo do conhecimento. Esse processo abrange desde a legislação que regulamenta a matéria na União Europeia e em Portugal até os conceitos consolidados pela comunidade científica internacional.

Dada a complexidade do tema, foi necessário recorrer a diferentes metodologias para identificar e caracterizar os danos ambientais. Assim, a pesquisa combina abordagens exploratórias, descritivas e críticas, essenciais para a produção da prova pericial capaz de elucidar os factos relevantes.

Os estudos exploratórios têm como objetivo fornecer uma visão inicial do problema, fenómeno ou situação, auxiliando na formulação de questões mais precisas e no desenvolvimento de hipóteses para investigações subsequentes. Por sua vez, os estudos descritivos concentram-se na caracterização detalhada dos fenómenos analisados, utilizando métodos como observação, entrevistas estruturadas e questionários. Ambos desempenham papéis essenciais na pesquisa científica, enquanto os estudos exploratórios fornecem uma base inicial de entendimento, os descritivos aprofundam a análise e permitem uma compreensão mais precisa da realidade investigada.

Além disso, adotou-se uma abordagem crítica e reflexiva em relação aos referenciais teóricos reconhecidos, considerando o estado da arte sobre a gestão de sítios contaminados e os impactes dos danos ambientais. Essa abordagem incluiu uma análise detalhada dos principais avanços científicos na área, bem como a avaliação das limitações dos estudos existentes e a identificação de lacunas que possam orientar futuras pesquisas.

A estrutura metodológica desta pesquisa envolveu várias etapas essenciais para garantir a solidez teórica e a aplicabilidade dos conhecimentos gerados:

- Revisão crítica da literatura – Permitiu uma compreensão aprofundada dos referenciais teóricos disponíveis, posicionando-os no contexto da pesquisa e identificando lacunas ou divergências;

- Construção de um quadro conceptual robusto – Integrando a análise crítica dos referenciais teóricos e combinando diferentes modelos e abordagens, resultando em um arcabouço teórico que reflete o estado atual do conhecimento.

Essa abordagem crítica e reflexiva foi fundamental para assegurar que a pesquisa fosse rigorosa, bem fundamentada e capaz de oferecer contribuições significativas para a compreensão e a solução de problemas relacionados à gestão de sítios contaminados e danos ao ambiente.

Em termos de enfoque metodológico, adotou-se uma abordagem quantitativa, estruturada em duas fases principais: descritiva e explicativa, culminando na análise de um caso de estudo representativo dos temas abordados. Na fase descritiva, foi realizado um extenso levantamento do referencial teórico para caracterizar os marcos legais e os aspetos técnicos associados ao tema. Já na parte explicativa, buscou-se aprofundar a análise, tendo em consideração todo o enquadramento teórico global e apresentar reflexões sobre as lacunas existentes em Portugal.

Para demonstrar que a perícia ambiental pode contribuir significativamente para a solução de questões ambientalmente relevantes, é essencial compreender que a produção da prova pericial deve atender a critérios rigorosos de qualidade. Nesse sentido a química forense desempenha um papel central, pois a caracterização de danos ambientais exige análises químicas precisas, capazes de quantificar as concentrações dos compostos químicos presentes no solo, no vapor do solo e nas águas subterrâneas.

Portanto, esta pesquisa defende a necessidade de adotar procedimentos metodológicos que respondam a essas questões, possibilitando a construção de um modelo conceptual capaz de gerar soluções efetivas para proteger a sociedade dos riscos associados aos danos ambientais.

1.5 Organização da tese

A estrutura da tese segue uma abordagem progressiva, iniciando com uma introdução que contextualiza o tema e apresenta a motivação para sua escolha. Em seguida, são delineados os objetivos da pesquisa, a metodologia adotada e uma visão geral da organização da tese.

No Capítulo 2, são abordados os aspetos legais da proteção do ambiente em Portugal, destacando o arcabouço jurídico existente. Analisa-se a legislação vigente, as diretrizes e

normativas que regem a gestão dos sítios contaminados, bem como o papel das instituições responsáveis pela fiscalização e aplicação dessas normas. Além disso, discute-se os desafios e avanços na implementação dessas políticas, considerando seu alinhamento com regulamentações internacionais e as especificidades do contexto português.

No Capítulo 3 apresenta uma análise abrangente da perícia ambiental, abordando tanto os aspectos técnicos e científicos quanto os aspectos jurídicos. Explora-se o papel do perito, suas responsabilidades e obrigações éticas, bem como sua relevância na produção de provas e na avaliação de danos ambientais. Também são examinadas as implicações legais da perícia, incluindo sua importância nos processos judiciais e administrativos e a necessidade de um conhecimento aprofundado das normas e regulamentos aplicáveis.

O Capítulo 4, discute-se a geoquímica ambiental no contexto dos sítios contaminados, com foco nos processos físico-químicos que influenciam o comportamento e a mobilidade dos contaminantes no solo e na água subterrânea. São analisados os principais tipos de contaminantes, suas fontes e interações com os diferentes componentes do meio, incluindo minerais e matéria orgânica.

O Capítulo 5 aborda as etapas fundamentais da gestão de sítios contaminados, apresentando um processo sistemático que compromete desde a avaliação preliminar até a remediação e a monitorização a longo prazo. São detalhadas as metodologias utilizadas em cada fase, incluindo as técnicas de investigação, a identificação da presença de fase livre e a construção do modelo conceptual.

O Capítulo 6, apresenta-se uma fundamentação teórica aprofundada sobre geoquímica, com ênfase nos mecanismos de transporte de contaminantes e no comportamento dos hidrocarbonetos alifáticos clorados. Exploram-se os processos de degradação dos contaminantes, considerando fatores como reações químicas, interações com minerais do solo e biodegradação. Também são discutidos avanços recente na obtenção de dados que permitem uma caracterização mais detalhada da contaminação.

O Capítulo 7 trata dos desafios na caracterização de sítios contaminados, destacando as dificuldades associadas à determinação da extensão da contaminação, à variabilidade dos solos e às interações complexas entre os contaminantes e o meio. Examina-se a limitação das abordagens convencionais e os avanços recentes que possibilitam a obtenção de dados mais precisos e representativos.

No Capítulo 8, apresenta-se um caso de estudo que exemplifica a aplicação prática dos conceitos discutidos ao longo da tese. Analisa-se uma situação real de contaminação, detalhando as etapas de gestão do sítio contaminado, desde a caracterização inicial até as estratégias de remediação e monitorização. São avaliados os desafios enfrentados, as metodologias empregadas e os resultados obtidos, permitindo uma compreensão aprofundada da efetividade das abordagens adotadas e das lições aprendidas para futuras intervenções em sítios contaminados.

O Capítulo 9 traz uma discussão crítica sobre a investigação de danos ambientais, analisando os desafios e limitações enfrentados tanto em perícias ambientais quanto em estudos técnicos não judiciais. São exploradas as principais dificuldades na obtenção e interpretação de dados, a adequação das metodologias utilizadas e o impacto das normas regulatórias na condução dessas investigações.

Finalmente, no Capítulo 10, apresenta-se as conclusões da pesquisa, sintetizando os principais achados da tese. Destacam-se as implicações das descobertas, reforçando a necessidade de uma abordagem integrada entre os aspetos técnicos e jurídicos na perícia ambiental, além da importância de um quadro regulatório robusto para a gestão de sítios contaminados. Também são delineadas direções futuras para pesquisas no sítio, enfatizando o potencial de técnicas avançadas para aprimorar a caracterização e remediação de contaminantes. O capítulo finaliza consolidando as reflexões realizadas ao longo do estudo, ressaltando a urgência de ações efetivas para a mitigação de impactos ambientais e o aperfeiçoamento das práticas de gestão de danos ambientais em Portugal.

ASPETOS LEGAIS DA PROTEÇÃO DO AMBIENTE

Este capítulo aborda o direito fundamental a um ambiente seguro e ecologicamente equilibrado, reconhecido constitucionalmente como um direito difuso, pertencente a toda a coletividade. Esse direito deriva de princípios estabelecidos em importantes declarações internacionais, como a Declaração de Estocolmo de 1972 e a Declaração do Rio de Janeiro de 1992, que enfatizam tanto o direito humano fundamental de viver num ambiente não poluído quanto a necessidade de equidade entre as necessidades das gerações presentes e futuras.

Um dos desafios centrais na proteção ambiental é garantir a compreensão e implementação efetiva desse direito difuso e intergeracional. O princípio da equidade intergeracional, que fundamenta os direitos das futuras gerações, é respaldado por diversos instrumentos internacionais, incluindo a Carta das Nações Unidas, a Declaração Universal dos Direitos Humanos e a Carta Mundial do Solo. Além disso, o Direito tem fomentado teorias de gestão de risco, que priorizam o princípio da precaução diante das incertezas científicas. Esse princípio impõe a obrigação de não poluir, evitando a degradação ambiental mesmo na ausência de provas conclusivas sobre os impactos adversos.

A Carta Mundial do Solo, elaborada pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) e adotada em 1982, estabelece os princípios fundamentais para a proteção e o uso sustentável do solo. Ela reconhece o solo como um recurso vital para a produção de alimentos, a biodiversidade, a mitigação das mudanças climáticas e a saúde humana.

A Carta destaca a importância da prevenção como prioridade máxima na gestão do solo, recomendando:

- A aplicação de medidas regulatórias rigorosas para controlar a introdução de substâncias potencialmente contaminantes, como fertilizantes, pesticidas, resíduos industriais e emissões urbanas;
- O desenvolvimento de sistemas de monitorização contínua e avaliação de risco ambiental, a fim de identificar fontes potenciais de contaminação antes que causem danos significativos;
- A responsabilização legal dos poluidores, seguindo o princípio do poluidor-pagador, especialmente no contexto dos sítios industriais e urbanas.

Em síntese, a Carta Mundial do Solo reforça a necessidade de uma abordagem integrada e preventiva para proteger os solos da contaminação, garantindo sua sustentabilidade a longo prazo. Esse enfoque é particularmente relevante para Portugal, onde as políticas ambientais podem ser fortalecidas para prevenir e remediar a contaminação.

Para avançar nessa direção, o direito, reconhecendo a complexidade do tema, vem desenvolvendo teorias de gestão de risco, privilegiando a precaução em relação aonexo causal ou a prova cabal, o que favorece a obrigação de não fazer (não poluir) diante das incertezas científicas (Leite, 2000).

O conceito de sociedade de risco, desenvolvido por Ulrich Beck (2011), destaca a perda de controle sobre os riscos ambientais gerados pelo progresso tecnológico. Segundo Beck, essa realidade resultou no fenómeno da "irresponsabilidade organizada", em que as instituições criam mecanismos de justificação dos riscos, perpetuando a crença no controlo dos impactes ambientais, mesmo quando esses riscos são desconhecidos ou imensuráveis. No entanto, ao aceitar apenas provas visíveis, fecham-se os olhos às relações de causa-efeito sistémicas e complexas que envolvem a contaminação de solo e da água subterrânea, negando, assim, seus efeitos nocivos.

No contexto da contaminação do solo e da água subterrânea, essa lógica se manifesta na dificuldade de estabelecer o nexocausal entre fontes poluidoras e danos ambientais, o que frequentemente resulta na não-ação do Estado. Muitas vezes, os tribunais exigem provas visíveis e quantificáveis, ignorando as complexas interações sistémicas que caracterizam os processos de degradação ambiental.

Diante desse desafio, Machado (2017) argumenta que o princípio do desenvolvimento sustentável introduz um novo paradigma na sociedade e no sistema jurídico-político, no qual

o Estado assume responsabilidade objetiva na prevenção e na mitigação de danos ambientais. Segundo o autor, a proteção ambiental não pode depender exclusivamente de provas concretas e quantificáveis de dano, pois muitas vezes os efeitos da degradação ambiental são cumulativos, difusos e de longo prazo, tornando sua comprovação judicial um obstáculo para a efetivação da tutela ambiental.

Machado enfatiza que a responsabilização estatal e empresarial deve considerar a potencialidade de risco e não apenas os danos efetivamente ocorridos. Nesse sentido, ele defende a aplicação rigorosa do princípio da precaução, que impõe ao Estado e aos agentes privados a obrigação de prevenir a degradação ambiental antes que seus impactos sejam irreversíveis.

Para o autor, o desenvolvimento sustentável não pode ser apenas um conceito teórico, mas deve refletir-se em políticas públicas concretas, como:

- Adoção de normas ambientais mais rigorosas, que considerem os riscos potenciais e não apenas os impactos já materializados;
- Ampliação dos mecanismos de fiscalização e monitorização ambiental, garantindo uma resposta rápida a ameaças à qualidade do solo e da água;
- Criação de mecanismos legais que facilitem a responsabilização por danos ambientais, eliminando barreiras jurídicas que dificultam a comprovação do nexo causal;
- Implementação de estratégias preventivas, que estimulem a remediação ambiental antes da judicialização dos casos.

Segundo Leme Machado, a atuação preventiva do Estado deve ser um pressuposto fundamental da governança ambiental, e a não observância desse dever pode configurar omissão estatal, passível de responsabilização jurídica. Além disso, o autor destaca que, ao não agir diante da iminência de um dano ambiental, o Estado compromete não apenas os direitos das gerações presentes, mas também os direitos fundamentais das futuras gerações, violando princípios basilares do Direito Ambiental.

Dessa forma, o pensamento de Paulo Affonso Leme Machado reforça a necessidade de modernizar o arcabouço jurídico e institucional, assegurando que a governança ambiental seja orientada pela precaução, pela prevenção e pela reparação efetiva dos danos ambientais. Esse paradigma exige que o Direito Ambiental evolua para garantir instrumentos eficazes de proteção dos recursos naturais, de forma que a sociedade de risco não perpetue um modelo de irresponsabilidade organizada, mas sim um modelo de responsabilidade compartilhada e de gestão sustentável do meio ambiente.

A proteção do direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado é assegurada tanto pelo Direito Constitucional Português quanto pelo Direito Ambiental Internacional. A União Europeia (UE) tem instrumentalizado essa necessidade por meio de declarações, diretivas e tratados multilaterais, que servem de base para a elaboração da legislação ambiental dos Estados-Membros.

Entre os principais instrumentos regulatórios europeus, destaca-se a Estratégia Temática de Proteção do Solo, lançada em 2006. Essa estratégia visa:

- Prevenir e mitigar a degradação do solo, incluindo a contaminação, a erosão e a desertificação;
- Promover a recuperação de solos degradados, especialmente em sítios agrícolas e urbanas afetadas por atividades industriais;
- Criar um inventário de sítios contaminados, identificando sítios críticos para priorizar ações de remediação.

A implementação dessa estratégia em Portugal está diretamente relacionada à gestão sustentável do solo, abrangendo:

- A avaliação da qualidade do solo;
- O planeamento territorial para evitar novos impactes ambientais;
- A adoção de ações de remediação em sítios contaminados.

No entanto, um dos desafios persistentes no país é a falta de jurisprudência consolidada sobre a responsabilidade por contaminação de solo e águas subterrâneas. Embora o Decreto-Lei nº 147/2008 que estabelece o regime jurídico da responsabilidade por danos ambientais esteja em vigor desde 2008, não há registos de decisões judiciais emblemáticas aplicando essa legislação de forma eficaz.

A contaminação do solo e das águas subterrâneas representa uma ameaça significativa para a saúde pública, pois muitos sítios contaminados não são mapeadas e possuem múltiplos contaminantes, expondo a população a riscos invisíveis. Essa realidade gera uma crescente preocupação na comunidade científica, que frequentemente se depara com a inércia política e regulatória diante das evidências científicas. A desconexão entre as evidências científicas e a formulação de políticas eficazes representa um desafio significativo que poderia ser abordado em Portugal.

Além do debate acadêmico, é essencial estabelecer mecanismos legais e institucionais mais eficazes para garantir os direitos das gerações presentes e futuras. Um modelo a ser explorado é a criação de um Conselho das Gerações Futuras¹, semelhante ao modelo francês, que atuaria como instância de controlo e orientação, assegurando que decisões políticas e jurídicas considerem os interesses das gerações que ainda estão por vir, prevenindo danos irreversíveis ao meio ambiente.

Contudo, para que essa iniciativa se concretize, é necessário:

- Reforçar o arcabouço legislativo e jurídico, garantindo que os tribunais adotem princípios de prevenção e precaução ao julgar casos ambientais;
- Fortalecer a articulação entre Estado, setor privado e sociedade civil, assegurando maior comprometimento na aplicação das leis ambientais;
- Criar incentivos para a remediação ambiental, reduzindo a dependência de medidas judiciais e promovendo a recuperação de sítios contaminados de maneira proativa.

A governança ambiental em Portugal ainda enfrenta desafios na implementação de mecanismos eficazes para a responsabilização por danos ambientais. Embora exista um arcabouço legal, a ausência de jurisprudência consolidada e a falta de uma lei específica para sítios contaminados impedem uma atuação eficaz. Assim, urge a necessidade de aprimorar a legislação, fortalecer os órgãos reguladores e garantir que a proteção ambiental seja tratada como prioridade política e social. Somente com ações concretas será possível assegurar um ambiente equilibrado e saudável para as futuras gerações.

2.1 Aspectos relevantes do direito do ambiente em Portugal

O direito do ambiente em Portugal é, em grande medida, um subproduto do direito comunitário, tendo sido moldado pelas políticas e regulamentações da União Europeia (UE). No entanto, o país demonstrou um reconhecimento precoce da importância das questões ambientais ao criar, em 1971, a Comissão Nacional de Ambiente, em preparação para a Conferência de Estocolmo de 1972. Esse marco inicial representou um passo fundamental para a estruturação de políticas ambientais em Portugal.

¹ O Conselho das Gerações Futuras, criado na França em 1993 e extinto em 2003, é um exemplo de uma tentativa de institucionalizar a consideração dos interesses das gerações futuras na formulação de políticas públicas. Estabelecido pela Lei Francesa n.º 93-949 de 1993 com o objetivo principal era garantir que as políticas públicas e decisões políticas considerassem não apenas os interesses presentes, mas também os efeitos a longo prazo sobre as gerações futuras. Embora tenha enfrentado desafios e tenha sido extinto, a ideia de incorporar perspectivas intergeracionais continua relevante e pode ser aprimorada com base nas lições aprendidas (UNESCO, 1997).

O desenvolvimento das políticas ambientais no país ganhou crescente relevância nas últimas décadas, sobretudo após a sua adesão à União Europeia em 1986. A integração ao bloco europeu proporcionou um impulso regulatório e institucional significativo, exigindo que Portugal adotasse padrões ambientais mais rigorosos. No entanto, apesar dessa pressão externa, a implementação de políticas ambientais eficazes tem sido insuficiente, especialmente no que se refere à proteção dos solos (Ferreira, 2015).

A Constituição da República Portuguesa de 1976 (Portugal, 2005) consagra princípios fundamentais de proteção ambiental, reconhecendo o direito a um ambiente saudável e ecologicamente equilibrado como um direito fundamental de todos os cidadãos. Além disso, a Constituição estabelece o dever do Estado de proteger o meio ambiente, promover o uso sustentável dos recursos naturais e garantir a solidariedade intergeracional, assegurando a proteção dos interesses individuais, coletivos e difusos relacionados ao ambiente.

O artigo 66 da Constituição consagra os princípios da precaução, da cooperação e da solidariedade intergeracional, refletindo o compromisso de Portugal com o desenvolvimento sustentável. No entanto, a efetividade desses princípios depende da sua aplicação prática, o que requer instrumentos normativos robustos e mecanismos eficientes de fiscalização. Sem esses elementos, o equilíbrio entre desenvolvimento econômico e conservação ambiental continua a ser um desafio.

Além disso, a Constituição portuguesa reflete a crescente preocupação da sociedade pós-industrial com a justiça ambiental e a equidade intergeracional. No entanto, na prática, a aplicação efetiva desses princípios enfrenta dificuldades, especialmente no que se refere à reabilitação de sítios contaminados. Para que Portugal consiga avançar nessa agenda, é essencial que o país adote uma visão intergeracional e um compromisso ético sólido com as futuras gerações, garantindo uma gestão ambiental mais responsável e sustentável.

No ordenamento jurídico português, o princípio da prevenção — um dos pilares do Direito Ambiental — está consagrado na Constituição e na Lei de Bases do Ambiente. Esse princípio, associado aos princípios da reparação e do poluidor-pagador, estabelece que o responsável pela contaminação deve arcar com os custos da sua prevenção e remediação.

A Lei de Bases do Ambiente, instituída pela Lei n.º 11/87, de 7 de abril, foi um marco na consolidação da legislação ambiental portuguesa. Essa norma estabeleceu os princípios fundamentais para a proteção do ambiente, abordando questões como a avaliação dos impactes

ambientais das atividades humanas; a definição de padrões de qualidade ambiental e a recuperação de sítios degradados. A sua atualização em 2014, por meio da Lei n 19/2014, de 14 de abril, trouxe inovações significativas, como o direito de acesso à informação ambiental detida por entidades públicas, possibilidade de exigir a cessação imediata de atividades prejudiciais ao ambiente e a compensação pelos danos ambientais, o que fortalece os mecanismos de proteção e transparência na gestão dos recursos naturais.

Com essas mudanças, a legislação portuguesa aumentou seu compromisso contínuo com a conservação ambiental e o desenvolvimento sustentável, alinhando-se progressivamente às normas e diretrizes da União Europeia.

A criação da Agência Portuguesa do Ambiente (APA) em 2007, foi uma tentativa de centralizar e coordenar as políticas ambientais do país. Essa reformulação administrativa visava:

- Garantir maior eficácia na proteção ambiental;
- Atuar como órgão de supervisão e implementação das políticas ambientais;
- Promover a sustentabilidade e mitigar os impactos das mudanças climáticas.

A APA desempenha um papel central na implementação das diretrizes nacionais e na reparação dos danos ambientais, assegurando a conformidade com os instrumentos jurídicos vigentes. No entanto, a agência continua a enfrentar desafios, especialmente no que se refere à gestão de sítios contaminados, devido à ausência de uma regulamentação específica para solos contaminados.

No que se refere à proteção das águas subterrâneas contra a contaminação, o Decreto-Lei n.º 208/2008, de 28 de outubro, que transpõe para o direito nacional a Diretiva 2006/118/CE, adota uma abordagem essencialmente voltada para a gestão das bacias hidrográficas, deixando em segundo plano a contaminação decorrente de atividades industriais. Essa limitação evidencia uma lacuna na legislação, uma vez que a regulamentação existente não contempla de forma abrangente mecanismos específicos de proteção das águas subterrâneas contra fontes industriais de poluição. Dada a relevância desses recursos hídricos para o abastecimento público e a manutenção dos ecossistemas, torna-se fundamental uma revisão legislativa que promova uma abordagem mais abrangente e eficaz. Tal revisão deveria estabelecer critérios mais rigorosos para a monitorização e controlo da qualidade das águas subterrâneas, garantindo sua adequada salvaguarda contra riscos associados à contaminação química e industrial.

A transposição da Diretiva 2010/75/EU, de 24 de novembro, que regula as emissões industriais e a prevenção e controlo integrados da contaminação, representou um avanço significativo no ordenamento jurídico português, consolidado por meio do Decreto-Lei n.º 127/2013, de 30 de agosto. Esse diploma introduziu obrigações ambientais mais rigorosas para instalações industriais licenciadas, incluindo a exigência da apresentação de um relatório de base, instrumento fundamental para a avaliação prévia do estado de contaminação do solo e das águas subterrâneas antes do início de atividades potencialmente contaminantes. Além disso, o Decreto-Lei definiu as competências das entidades fiscalizadoras e gestoras do ambiente, tais como a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) e as Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCDR), visando garantir uma abordagem mais coordenada e integrada na proteção ambiental e na promoção de práticas industriais sustentáveis.

Esse diploma também consolidou e modernizou o regime de prevenção e controlo integrado da contaminação, promovendo uma abordagem sistêmica e sustentável para o licenciamento ambiental das instalações industriais. Ao estabelecer requisitos técnicos mais exigentes, o Decreto-Lei reforça o compromisso de Portugal com a proteção ambiental, a saúde pública e a mitigação dos impactos negativos das atividades industriais.

Uma das principais inovações introduzidas por esse diploma foi a adoção obrigatória das Melhores Técnicas Disponíveis (MTD) como referência normativa para o funcionamento das instalações industriais. As MTD, estabelecidas com base em *benchmarks* europeus, determinam padrões tecnológicos e operacionais avançados que as empresas devem obrigatoriamente adotar para minimizar as emissões para o ar, água e solo. Além disso, o Decreto-Lei reforçou os mecanismos de monitorização e fiscalização ambiental, estabelecendo a obrigatoriedade de relatórios periódicos sobre as emissões e avaliações regulares da conformidade das instalações com os limites estabelecidos.

Outro avanço significativo desse diploma foi o fortalecimento da transparência e da participação pública no acompanhamento das atividades industriais. O regulamento impõe a obrigatoriedade de divulgação de informações detalhadas sobre as emissões industriais, bem como sobre as medidas de mitigação adotadas para minimizar seus impactos ambientais. Esse aspeto é fundamental para promover maior envolvimento da sociedade civil e de outras partes interessadas no processo decisório ambiental, garantindo maior controlo sobre as atividades industriais e incentivando práticas mais sustentáveis.

Dessa forma, o Decreto-Lei n.º 127/2013 consolidou-se como um instrumento relevante para a gestão e prevenção da contaminação ambiental em Portugal, contribuindo para maior eficiência na regulação das emissões industriais e para a adoção de padrões mais rigorosos na proteção dos recursos naturais. No entanto, ainda persistem desafios na implementação e fiscalização das diretrizes estabelecidas, especialmente no que concerne à efetividade das ações de monitorização da contaminação dos solos e águas subterrâneas. Esses desafios reforçam a necessidade de aprimoramento contínuo da regulamentação ambiental, de forma a assegurar uma proteção mais eficaz e preventiva desses recursos essenciais.

O Regime Geral de Gestão de Resíduos (RGGR), instituído pelo Decreto-Lei n.º 102-D/2020, representa um marco regulatório fundamental para a gestão sustentável e eficiente dos resíduos em Portugal. Esse diploma estabelece princípios, objetivos, obrigações e responsabilidades para entidades públicas e privadas, com o propósito de promover a prevenção, redução, reutilização, reciclagem e outras formas de valorização de resíduos. O regime visa minimizar a deposição de resíduos em aterros, garantindo simultaneamente a proteção ambiental e a salvaguarda da saúde pública.

O RGGR transpôs para o ordenamento jurídico português as diretrizes europeias sobre economia circular, reforçando o princípio da responsabilidade alargada do produtor, a hierarquia de gestão de resíduos e o acompanhamento rigoroso dos fluxos específicos de resíduos. Entre os dispositivos normativos do RGGR, destaca-se o Artigo 77, que regula as operações de remediação de solos, estabelecendo que essa atividade está sujeita à obtenção de licença ambiental e à realização de vistorias de acompanhamento ao final da operação. Isso significa que os produtores de resíduos têm responsabilidade direta pela sua gestão adequada, seja por meio de tratamento próprio, seja por meio da transferência para operadores devidamente licenciados.

Outro instrumento relevante na proteção ambiental em Portugal é o Regime Jurídico de Avaliação de Impacte Ambiental (RJAIA), estabelecido pelo Decreto-Lei n.º 151-B/2013, de 31 de outubro. Este diploma, atualizado para incorporar as disposições da Diretiva 2011/92/UE, alterada pela Diretiva 2014/52/UE, representa o principal mecanismo legal para avaliar os efeitos ambientais de projetos públicos e privados antes de sua implementação. O RJAIA tem como objetivo prevenir, reduzir e, sempre que possível, compensar os impactes ambientais adversos, assegurando que o desenvolvimento económico ocorra de maneira sustentável.

O regime estabelece critérios e procedimentos rigorosos para a identificação, descrição e avaliação dos efeitos ambientais de determinados projetos. Entre os fatores analisados,

destacam-se as alterações climáticas, a biodiversidade, o uso do solo, os recursos hídricos, o patrimônio cultural e a saúde humana. A AIA (Avaliação de Impacte Ambiental) é obrigatória para projetos considerados de grande dimensão ou que possuam um elevado potencial de impacte ambiental, tais como infraestruturas energéticas, obras hidráulicas, operações mineiras e empreendimentos industriais.

Uma das principais inovações do RJAIA é o reforço da participação pública ao longo do processo de avaliação. O regime assegura o direito de acesso à informação ambiental, permitindo que as comunidades afetadas sejam consultadas, expressem preocupações e contribuam para a tomada de decisão. Esse mecanismo participativo fortalece a legitimidade dos processos decisórios, promovendo transparência, *accountability* e confiança entre os diferentes *stakeholders* envolvidos.

Além disso, o Decreto-Lei reforça as competências das autoridades ambientais responsáveis pela avaliação e fiscalização dos projetos sujeitos à AIA. Órgãos como a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) são incumbidos de analisar os estudos de impacte ambiental apresentados pelos promotores, garantindo a conformidade com os requisitos legais e técnicos vigentes. Ao alinhar-se com as diretrizes ambientais europeias e adotar uma abordagem mais robusta e integrada na avaliação ambiental, o RJAIA fortalece a proteção dos recursos naturais e promove um modelo de desenvolvimento que considera não apenas os benefícios económicos, mas também os imperativos de sustentabilidade ambiental e social.

Com o fortalecimento de regimes como o Regime Jurídico de Avaliação de Impacte Ambiental (RJAIA), torna-se ainda mais evidente a necessidade de aprovação do ProSolo, um projeto de Decreto-Lei que visa estabelecer um quadro legal específico para a gestão da contaminação e remediação de solos em Portugal. Esse regime normativo fundamenta-se em três pilares principais:

- i. a avaliação da qualidade do solo,
- ii. a remediação de sítios contaminados e
- iii. a responsabilização pelos danos ambientais causados.

A sua implementação permitiria preencher uma lacuna regulatória significativa no ordenamento jurídico nacional, garantindo uma resposta mais eficaz aos compromissos assumidos por Portugal no contexto europeu e internacional.

O ProSolo propõe regulamentar a gestão da contaminação e os processos de remediação de solos, estabelecendo diretrizes claras para a avaliação da qualidade do solo, a identificação e priorização de sítios contaminados e a responsabilização dos agentes poluidores. No entanto, apesar da sua relevância estratégica e ambiental, o projeto, concebido em 2015, ainda não foi aprovado, representando um entrave crítico à evolução das políticas públicas voltadas para a reabilitação de sítios contaminados no país.

Esse regime normativo baseia-se em dois princípios fundamentais do direito ambiental: o princípio do poluidor-pagador, que impõe a responsabilidade financeira ao agente causador da contaminação, e o princípio da responsabilidade objetiva, que assegura a obrigatoriedade da implementação de ações corretivas, independentemente da comprovação de dolo ou culpa. Dessa forma, o ProSolo não se limita apenas à remediação de solos contaminados, mas também incentiva práticas preventivas para evitar novas contaminações.

Além disso, o ProSolo propõe a padronização do processo técnico e legal para a identificação e recuperação de sítios contaminados, estabelecendo critérios rigorosos para a avaliação da qualidade do solo e das medidas corretivas necessárias para sua reabilitação. Esse enquadramento inclui a obrigatoriedade de estudos técnicos detalhados, sistemas de monitorização contínua e a implementação de soluções de remediação adequadas às especificidades de cada sítio contaminado.

A ausência de um marco regulatório consolidado, como o ProSolo, compromete a gestão eficiente dos sítios contaminados em Portugal, tornando o processo dependente de diretrizes fragmentadas e, muitas vezes, desatualizadas. Essa lacuna dificulta a identificação e priorização das áreas críticas que necessitam de intervenção urgente, comprometendo a eficácia das políticas ambientais e ampliando a exposição da população e dos ecossistemas a substâncias contaminantes. Em um contexto global no qual a contaminação do solo é amplamente reconhecida como uma ameaça para a saúde humana, à biodiversidade e aos recursos hídricos, a ausência de regulamentação específica representa um obstáculo considerável para a implementação de soluções eficazes e sustentáveis.

Apesar de sua relevância ambiental e estratégica, o ProSolo permanece sem aprovação desde sua concepção em 2015, o que levanta preocupações significativas sobre a prioridade dada à gestão de sítios contaminados em Portugal. Esse atraso não apenas compromete a recuperação de sítios degradados, mas também dificulta o cumprimento das obrigações internacionais assumidas pelo país, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da

Organização das Nações Unidas (ONU), que enfatizam a preservação dos solos e a mitigação dos efeitos da contaminação ambiental.

Além disso, a ausência de aprovação do ProSolo reflete uma falta de priorização política e financeira em relação à gestão dos riscos ambientais. Embora esse tema seja reconhecido como crítico em fóruns ambientais nacionais e internacionais, o atraso na sua implementação demonstra um desalinhamento entre o discurso e a prática, colocando Portugal em desvantagem em relação a outros países europeus. Exemplos como França e Alemanha demonstram como a adoção de inventários nacionais de solos contaminados fortalece a governança ambiental e a tomada de decisão informada em projetos de reabilitação e infraestrutura. Em contraste, Portugal carece de uma ferramenta integrada para monitorar e gerir essa questão, resultando em políticas públicas fragmentadas e ações pontuais que dificultam uma abordagem sistêmica e baseada em evidências científicas.

Sem a implementação do ProSolo, Portugal permanece dependente de regulamentações dispersas e insuficientes, o que afeta a capacidade do país de enfrentar de forma eficaz desafios ambientais e socioeconômicos relacionados à degradação do solo, à desertificação e à perda de produtividade agrícola. A não aprovação desse projeto compromete não apenas a qualidade ambiental do território nacional, mas também a competitividade do país em relação à implementação de práticas sustentáveis alinhadas às exigências globais de prevenção e recuperação ambiental.

Dessa forma, é imperativo que o ProSolo seja finalmente aprovado e implementado, pois representa uma oportunidade essencial para impulsionar o desenvolvimento de tecnologias inovadoras de remediação para a proteção da saúde humana e garantir a proteção dos recursos naturais para as gerações futuras. A inércia nesse processo não só compromete a qualidade ambiental e a saúde pública, mas também limita o potencial de Portugal em adotar políticas públicas eficazes e sustentáveis, que garantam a gestão racional dos solos e a mitigação dos impactos ambientais decorrentes da atividade industrial e urbana.

É evidente que, embora o quadro legal português possibilite, em teoria, a proteção do solo e das águas subterrâneas, a sua implementação tem sido lenta e, muitas vezes, ineficaz. A falta de clareza na articulação entre as diversas normas jurídicas, aliada à ausência de uma legislação específica e abrangente para a contaminação de solos e águas subterrâneas, compromete a eficácia das políticas ambientais e dificulta a aplicação de medidas corretivas e preventivas adequadas. Esse cenário gera repercussões negativas tanto para a comunidade

portuguesa quanto para o cumprimento dos objetivos ambientais da União Europeia, uma vez que a proteção desses recursos naturais é essencial para a sustentabilidade ambiental e a saúde pública.

Diante desse contexto, torna-se imperativo que o Poder Legislativo, o Poder Judiciário e a Administração Pública reconheçam a necessidade de um regime jurídico específico para a contaminação ambiental, capaz de estabelecer metodologias padronizadas e abordagens técnicas precisas para a caracterização e remediação dos impactes ambientais. A definição de diretrizes claras e objetivas para a investigação de sítios contaminados é fundamental para assegurar uma gestão eficiente e estruturada desses passivos ambientais, garantindo que as intervenções sejam tecnicamente embasadas e juridicamente consistentes.

É importante destacar ainda que, embora a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) tenha desenvolvido guias, recomendações e documentos orientadores sobre a temática, essas iniciativas ainda estão aquém do necessário para garantir a implementação das melhores práticas e técnicas disponíveis no estudo e na reabilitação de sítios contaminados. A falta de regulamentação específica e obrigatória para a caracterização e remediação de solos contaminados contribui para a disparidade na qualidade dos estudos realizados, podendo resultar em ações remediadoras ineficazes, atrasos na mitigação dos riscos e prolongamento da exposição da população a contaminantes.

Nesse cenário, a perícia ambiental emerge como um instrumento essencial na identificação, avaliação e quantificação do dano ambiental, fornecendo aos decisores elementos técnicos robustos para embasar a responsabilização dos agentes poluidores e a implementação de medidas de recuperação ambiental. O laudo pericial ambiental desempenha um papel central na materialização da prova técnica sobre os danos ambientais, permitindo uma análise objetiva e sistemática dos impactes causados, das ações de remediação necessárias e da valoração do dano remanescente. Essa base técnico-científica é fundamental para garantir que as decisões jurídicas e administrativas sejam tomadas com rigor, equidade e fundamentação científica, promovendo uma justiça ambiental mais eficaz e coerente com os princípios do direito ambiental moderno.

Para fortalecer o arcabouço normativo e garantir uma resposta mais eficaz à contaminação do solo e das águas subterrâneas, Portugal precisa avançar na revisão e consolidação de seus instrumentos legais e regulatórios, de modo a assegurar a aplicação efetiva do dever constitucional de reparar os bens ambientais degradados. A ausência de uma definição clara sobre

os mecanismos e procedimentos para essa reparação compromete a implementação dos princípios fundamentais da proteção ambiental nos níveis constitucional, europeu e internacional.

Assim, torna-se imperativo aprofundar a análise da responsabilidade civil no contexto da reparação do dano ambiental, garantindo que o direito ambiental português evolua para um modelo mais integrado, preventivo e eficiente na proteção dos recursos naturais e na mitigação dos impactos da contaminação.

2.2 Responsabilidade civil de reparação do dano ambiental no contexto português

Todos os seres humanos partilham a obrigação de continuar a espécie humana (mesmo que, individualmente, não sejam obrigados a procriar). Assim, é dever do presente assegurar as possibilidades para que as gerações futuras cumpram esse mesmo dever.

A responsabilidade civil ambiental em Portugal constitui um dos pilares fundamentais da política ambiental, estabelecendo os deveres de reparação dos danos causados ao ambiente e garantindo a responsabilização dos agentes poluidores. O ordenamento jurídico português reflete o princípio do poluidor-pagador, consagrado na Lei de Bases do Ambiente (Lei n.º 19/2014, de 14 de abril) e no Decreto-Lei n.º 147/2008, de 29 de julho, que transpõe para o direito nacional a Diretiva 2004/35/CE sobre responsabilidade ambiental. Esse regime jurídico estabelece que qualquer pessoa, singular ou coletiva, que cause danos ao meio ambiente é obrigada a preveni-los, minimizá-los e, sempre que necessário, repará-los.

O regime jurídico português da responsabilidade civil ambiental assenta-se nos seguintes princípios fundamentais:

- Princípio do Poluidor-Pagador – Determina que o agente poluidor deve arcar com os custos da remediação e das medidas preventivas e corretivas;
- Princípio da Prevenção – Estabelece que ações devem ser tomadas para evitar a ocorrência de danos ambientais antes que estes se concretizem;
- Princípio da Precaução – Aplica-se nos casos de incerteza científica sobre os efeitos ambientais de determinadas atividades, impondo restrições e medidas preventivas sempre que houver risco de dano significativo;
- Princípio da Reparação Integrada – Sempre que houver dano ambiental, a recuperação do meio ambiente deve ser priorizada em relação a compensações financeiras;

- Princípio da Responsabilidade Objetiva – Para atividades classificadas como de risco elevado para o meio ambiente, o agente poluidor pode ser responsabilizado independentemente da existência de culpa.

O ordenamento jurídico português prevê dois regimes principais de responsabilidade civil ambiental:

- Responsabilidade Objetiva – Aplicável a atividades classificadas como de risco elevado, independentemente da comprovação de culpa. Ou seja, basta demonstrar a ocorrência do dano e o nexo de causalidade com a atividade para que haja responsabilização do agente poluidor.
- Responsabilidade Subjetiva – Aplicável a outras situações em que a responsabilidade depende da comprovação de culpa ou negligência do agente na produção do dano ambiental.

Uma leitura contemporânea da responsabilidade civil no âmbito da reparação do dano ambiental pode ser encontrada na obra de Hans Jonas, *O Princípio Responsabilidade: Ensaio de uma Ética para a Civilização Tecnológica*. O autor propõe uma ética da responsabilidade que transcende as consequências imediatas das ações humanas, enfatizando a necessidade de considerar os impactos a longo prazo, especialmente no que diz respeito à preservação ambiental e à proteção das necessidades das gerações futuras. Jonas formula esse princípio de maneira objetiva ao afirmar que:

"Aja de tal modo que os efeitos da tua ação sejam compatíveis com a possibilidade futura de vida" (Jonas, 2006, p. 47).

No entanto, apesar da crescente necessidade e urgência de incorporar essa perspectiva no contexto das políticas ambientais, a sua implementação em escala global ainda enfrenta obstáculos estruturais. Entre as principais dificuldades destacam-se interesses económicos conflitantes, lacunas regulatórias, resistência política e limitações tecnológicas, fatores que dificultam a adoção de práticas sustentáveis e a mitigação efetiva dos impactos ambientais. A superação desses desafios exige um compromisso coletivo e interdisciplinar, sustentado por políticas públicas integradas, cooperação internacional e inovação científica, de modo a transformar a proteção ambiental de um ideal abstrato para uma realidade concreta e duradoura.

A complexidade e a interconexão dos problemas ambientais são fatores determinantes nesse impasse. A degradação ambiental frequentemente envolve múltiplos agentes e interesses divergentes, o que demanda soluções abrangentes e multidisciplinares. Questões económicas, sociais e políticas muitas vezes dificultam a adoção de medidas eficazes, na medida em

que os impactes ambientais tendem a ser percebidos como problemas difusos e de difícil quantificação. Além disso, a falta de consciência e educação ambiental ainda constitui um entrave significativo para a construção de uma cultura de responsabilidade ambiental. Em muitas partes do mundo, a exploração dos recursos naturais ocorre sem qualquer avaliação dos impactes de longo prazo, comprometendo a biodiversidade, a qualidade dos solos e das águas subterrâneas, além do equilíbrio dos ecossistemas.

Para enfrentar esses desafios, torna-se essencial um esforço conjunto que envolva governos, empresas, instituições educacionais e a sociedade civil, promovendo um compromisso coletivo em prol da sustentabilidade e da justiça intergeracional. A educação ambiental desempenha um papel fundamental nesse processo, capacitando indivíduos e comunidades a participarem ativamente na preservação dos recursos naturais e na mitigação dos impactes ambientais.

A abordagem proposta por Hans Jonas oferece um referencial teórico relevante para orientar ações voltadas à sustentabilidade e à equidade intergeracional. No entanto, sua implementação requer um compromisso ético e político profundo, assim como uma mudança de paradigma sobre o papel e a responsabilidade do ser humano perante o meio ambiente.

Nessa linha de pensamento, Jonas também enfatiza que a ética da preocupação do Estado deve ser orientada para o futuro da sociedade, considerando os riscos e ameaças potenciais que podem comprometer sua continuidade. Isso significa que as decisões políticas e as estratégias de desenvolvimento económico não devem ser guiadas apenas por interesses imediatistas, mas sim por um olhar preventivo e de longo prazo, assegurando que o bem-estar das futuras gerações seja protegido por meio de uma governança ambiental mais eficaz e responsável.

Nesta perspetiva, e considerando que a contaminação do solo e das águas subterrâneas está amplamente difundida no quotidiano, muitas vezes representando riscos invisíveis e significativos para a saúde humana e o ambiente, tornou-se imperativo estabelecer mecanismos eficazes de responsabilização para os agentes causadores desses danos.

Portugal já possuía uma regulamentação para a responsabilidade civil por danos causados ao ambiente, estabelecida pela Lei de Bases do Ambiente (Lei n.º 11/87 de 7 de abril). De acordo com o artigo 41º dessa lei, a obrigação de indenizar por danos significativos ao meio

ambiente é imposta independentemente de culpa, ou seja, mesmo que não haja intenção ou negligência por parte do agente, este é responsável por reparar os danos causados.

Mas foi, após a transposição da Diretiva 2004/35/CE, de 29 de abril, que Portugal fortaleceu a responsabilização dos agentes causadores de danos ambientais, assegurando a reparação dos impactes gerados e consolidando a aplicação do princípio do poluidor-pagador. Essa diretiva instituiu o regime de responsabilidade ambiental baseado em dois eixos principais: a responsabilidade objetiva dos operadores de atividades potencialmente poluidoras e a responsabilidade subjetiva daqueles que atuam com dolo ou negligência.

A abordagem legislativa adotada por Portugal, em conformidade com a Diretiva 2004/35/CE, reflete um esforço para fortalecer a responsabilização dos agentes causadores de danos ambientais, assegurando a reparação dos impactes gerados e consolidando a aplicação do princípio do poluidor-pagador. Além disso, introduziu a necessidade de medidas preventivas em situações de risco iminente de dano ambiental, promovendo uma abordagem mais proativa na gestão dos impactes ambientais decorrentes de atividades industriais, agrícolas e outras fontes potenciais de contaminação.

Nesse contexto, a transposição da diretiva para o ordenamento jurídico português materializou-se com a criação do Regime Jurídico da Responsabilidade por Danos Ambientais (Diploma RA), estabelecido pelo Decreto-Lei n.º 147/2008, de 29 de julho. Este diploma consolidou um quadro normativo estruturado, cujo objetivo central é integrar medidas de prevenção, responsabilização e reparação, promovendo uma abordagem mais eficaz e sistemática na gestão de danos ambientais.

Além de determinar a obrigação dos operadores de prevenir e reparar danos ambientais, o diploma reforça a importância da precaução e da mitigação de riscos ambientais, incentivando a adoção de práticas sustentáveis e tecnologias limpas. Dessa forma, busca-se evitar que os custos da remediação recaiam sobre o Estado ou sobre a sociedade, assegurando que os responsáveis pela degradação do meio ambiente arquem com os encargos decorrentes das suas atividades.

No âmbito do Decreto-Lei n.º 147/2008, o Artigo 11.º/E define, de forma detalhada, o conceito de "danos ambientais", classificando-os em três categorias principais:

- Danos causados às espécies e habitats naturais protegidos: qualquer dano com efeitos adversos, comprometendo a manutenção ou recuperação do estado de conservação favorável de espécies e *habitats* protegidos. A avaliação desses

danos deve considerar o estado inicial do meio impactado, conforme os critérios estabelecidos no Anexo IV do Decreto-Lei, ressalvando-se os efeitos adversos previamente autorizados por autoridades competentes.

- Danos causados à água: qualquer impacte ambiental que comprometa significativamente o estado ecológico, potencial ecológico, estado químico ou quantitativo das massas de água superficiais ou subterrâneas. Essa categoria inclui águas artificiais ou muito modificadas, salvo nos casos em que legislação específica, como a Lei n.º 58/2005, estabeleça um regime jurídico distinto.
- Danos causados ao solo: qualquer forma de contaminação que represente um risco significativo para a saúde humana, decorrente da introdução direta ou indireta de substâncias, preparações, organismos ou microrganismos no solo ou em sua superfície.

A inclusão desses critérios no ordenamento jurídico português não apenas alinha o país às diretrizes europeias, mas também aprimora a capacidade de identificação, responsabilização e mitigação dos impactes ambientais. Dessa forma, Portugal reforça o seu compromisso com a sustentabilidade e a proteção dos recursos naturais, consolidando um arcabouço normativo mais eficaz para a gestão ambiental.

O Decreto-Lei n.º 147/2008 estabeleceu a responsabilidade por danos ambientais como instrumento essencial para a prevenção e reparação de impactes negativos ao ambiente, impondo obrigações específicas aos operadores. Ao fazê-lo, fortalece o princípio do poluidor-pagador, garantindo que os agentes responsáveis sejam efetivamente obrigados a reparar os danos causados, assegurando a restauração dos ecossistemas afetados e a proteção dos direitos difusos ambientais.

Uma inovação relevante trazida pelo diploma foi a introdução do regime de responsabilidade solidária, com o objetivo de superar os desafios jurídicos relacionados à identificação e responsabilização dos poluidores. Tal regime se aplica, especialmente, quando múltiplos agentes estão envolvidos na degradação ambiental ou quando as atividades são realizadas por pessoas coletivas. Dessa forma, não apenas a entidade poluidora pode ser responsabilizada, mas também seus diretores, gerentes e administradores.

Além de transpor as disposições da Diretiva 2004/35/CE, o Decreto-Lei n.º 147/2008 inovou ao introduzir regras de responsabilidade civil ambiental, abrangendo tanto a

responsabilidade objetiva quanto a subjetiva. Assim, independentemente da comprovação de culpa ou dolo, qualquer agente económico cuja atividade cause danos ao ambiente será obrigado a reparar os impactes resultantes, mesmo quando a contaminação decorre de negligência.

O Decreto-Lei n.º 147/2008, de 29 de julho, harmoniza-se com os princípios fundamentais da política ambiental estabelecidos na Lei n.º 19/2014, de 14 de abril, cujo artigo 3.º define a atuação pública em matéria de ambiente como subordinada aos seguintes princípios:

- Do desenvolvimento sustentável: impõe a obrigação de satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas próprias necessidades, promovendo um equilíbrio entre desenvolvimento económico, proteção ambiental e bem-estar social;
- Da responsabilidade intra e intergeracional: reforça a necessidade de garantir que a gestão ambiental considere não apenas os interesses das gerações atuais, mas também a preservação dos recursos naturais para as futuras gerações, consolidando a equidade ambiental;
- Da prevenção e da precaução: estabelece a obrigação de adoção de medidas antecipatórias para evitar ou minimizar, prioritariamente na fonte, os impactes ambientais adversos. Este princípio impõe a atuação preventiva do Estado e dos agentes privados, assegurando que potenciais riscos ambientais sejam devidamente avaliados e mitigados antes que causem danos irreversíveis;
- Do poluidor-pagador: consagra a responsabilidade direta do agente poluidor na assunção dos custos da atividade contaminante, incluindo a implementação de medidas internas de prevenção e controlo necessárias para combater ameaças e agressões ao ambiente. Esse princípio visa tanto a responsabilização financeira dos poluidores quanto a dissuasão de práticas prejudiciais ao meio ambiente;
- Do utilizador-pagador: impõe ao utilizador de serviços públicos o dever de suportar os custos da utilização dos recursos naturais, bem como os custos associados à sua recuperação proporcional, garantindo um financiamento equitativo da gestão ambiental;
- Da responsabilidade: determina que todos os que, direta ou indiretamente, mediante dolo ou negligência, provoquem ameaças ou danos ao ambiente sejam responsabilizados pelos seus atos. Além disso, cabe ao Estado a aplicação das sanções administrativas e penais cabíveis, sem prejuízo da possibilidade de indemnização pelos prejuízos ambientais, conforme previsto na legislação vigente;

- Da recuperação: obriga o causador do dano ambiental a restaurar o ambiente ao estado anterior ao dano, promovendo a reparação integral dos prejuízos ecológicos e assegurando a restauração dos ecossistemas afetados.

A incorporação desses princípios estruturantes no ordenamento jurídico português reforça o compromisso do Estado e dos operadores económicos com a prevenção, mitigação e responsabilização ambiental, promovendo um modelo de governança ambiental mais eficiente e alinhado com os compromissos internacionais de proteção do meio ambiente.

A última contribuição que o diploma trouxe foram diretrizes claras sobre a avaliação e a prova do nexo de causalidade, permitindo que evidências científicas, como perícias ambientais, sejam utilizadas para fortalecer o regime de responsabilidade civil e ambiental em Portugal. Essa inovação jurídica visa reduzir a impunidade e garantir que os danos ambientais não fiquem sem reparação.

2.2.1 Desafios e questões fundamentais sobre responsabilização ambiental

Embora o regime de responsabilidade ambiental em Portugal esteja alinhado com as diretrizes europeias, sua aplicação ainda enfrenta desafios práticos, tais como:

- Dificuldade na identificação do responsável pelo dano, especialmente em casos de contaminação histórica, onde os impactos ambientais se acumulam ao longo do tempo e podem ter múltiplas fontes;
- Escassez de jurisprudência específica, uma vez que, apesar do Decreto-Lei n.º 147/2008 estar em vigor há mais de uma década, são raros os processos judiciais que resultaram em decisões efetivas sobre a responsabilização de poluidores;
- Deficiência nos mecanismos de fiscalização – A fiscalização ambiental em Portugal ainda é insuficiente, o que compromete a identificação precoce de danos ambientais e a implementação de medidas corretivas eficazes;
- Falta de regulamentação específica para sítios contaminados – Apesar do Decreto-Lei n.º 147/2008, Portugal ainda não possui uma legislação específica para a gestão da contaminação do solo, o que dificulta a aplicação do regime de responsabilidade ambiental a esses casos;

- Baixa aplicação de sanções e medidas reparatórias – Apesar da legislação vigente, muito poucas ações de responsabilização são efetivamente instauradas e concluídas com a devida reparação dos danos ambientais.

A responsabilidade civil ambiental, se aplicada com rigor e coerência, não apenas fortalece a proteção ambiental em Portugal, mas também promove uma cultura de maior compromisso e transparência por parte das empresas e dos agentes económicos. O desenvolvimento de jurisprudência robusta, aliada a uma regulamentação mais detalhada e eficaz, é fundamental para garantir que o princípio do poluidor-pagador seja aplicado de forma justa e eficiente, assegurando a proteção do meio ambiente para as gerações atuais e futuras.

A aplicação efetiva do regime de responsabilidade ambiental levanta questões complexas, que frequentemente surgem nos processos administrativos e judiciais, tais como:

- Como estabelecer o nexo de causalidade entre uma atividade contaminante e danos que podem ser revelados apenas anos ou décadas depois, a centenas de metros de distância do local original da contaminação?
- Como lidar com a pluralidade de responsáveis pelo dano, considerando que a contaminação pode ter sido causada por múltiplos agentes, ao longo do tempo, dificultando a individualização das responsabilidades?
- Como valorar, em termos de indemnização, o prejuízo ambiental, levando em conta não apenas os custos diretos de remediação, mas também os danos irreversíveis ou de difícil quantificação?
- Como enfrentar o problema da prescrição da responsabilidade civil, especialmente em casos de contaminação histórica ou de poluição difusa, nos quais a exposição pode ter ocorrido por longos períodos sem que os impactes tenham sido imediatamente detetados?

A perícia ambiental, nos moldes defendidos nesta tese, configura-se como um instrumento essencial para identificação precisa da contaminação, quantificação dos danos ambientais e estabelecimento do nexo causal. Além disso, fornece elementos técnicos fundamentais para assegurar que a responsabilização seja justa e eficaz, contribuindo para uma tomada de decisão mais robusta por parte dos tribunais e órgãos administrativos.

Nesse contexto, a perícia ambiental desempenha um papel central na caracterização do dano, na identificação da fonte poluidora e na avaliação da extensão dos impactes ambientais. Sem análises científicas robustas, torna-se extremamente difícil estabelecer o nexo de

causalidade e quantificar os danos ambientais, comprometendo a eficácia das ações de responsabilização.

Para que a responsabilidade civil ambiental seja plenamente aplicada, é essencial que os estudos periciais sejam conduzidos com rigor técnico e metodológico, garantindo a confiabilidade das provas apresentadas nos tribunais e processos administrativos. A perícia pode contribuir para reduzir incertezas jurídicas, assegurar decisões mais embasadas e fortalecer a aplicação do princípio do poluidor-pagador. Assim, a perícia ambiental constitui uma excelente ferramenta na resolução de litígios ambientais complexos, permitindo determinar o nexo de causalidade, identificar os responsáveis e quantificar os danos.

Apesar dos avanços legislativos voltados à proteção ambiental, ainda persistem desafios significativos na implementação e fiscalização das normas ambientais, bem como na conscientização e educação ambiental da população. Para que a legislação ambiental seja efetiva, é fundamental que haja um esforço contínuo por parte do Estado, das empresas e da sociedade civil, assegurando o cumprimento das normas e a reparação adequada dos danos ambientais, em conformidade com os princípios éticos da responsabilidade intergeracional.

O ordenamento jurídico brasileiro apresenta um modelo consolidado de responsabilidade civil ambiental, que pode servir como referência para Portugal. Em 2020, o Supremo Tribunal Federal (STF) do Brasil reafirmou, por unanimidade, a imprescritibilidade do dano ambiental, reconhecendo que esse tipo de dano não se configura como um mero ilícito civil. A decisão enfatizou que a degradação ambiental possui efeitos *erga omnes*, ou seja, afeta toda a sociedade e transcende gerações e fronteiras (Recurso Extraordinário N 654.833 - Tema 999). Esse entendimento representa um marco significativo na proteção ambiental, reforçando o compromisso com a responsabilização contínua dos agentes poluidores, independentemente do tempo decorrido desde a ocorrência do dano.

Ao estabelecer que o direito à reparação dos danos ambientais é imprescritível, o STF fortaleceu o princípio da responsabilidade objetiva, determinando que o poluidor tem o dever de reparar os danos causados, independentemente de culpa ou do tempo decorrido. Isso significa que, mesmo que a contaminação tenha ocorrido há décadas ou tenha sido descoberta recentemente, a responsabilidade civil permanece válida e pode ser exigida. Essa decisão é um importante instrumento jurídico para garantir que os infratores sejam responsabilizados, contribuindo para a construção de um futuro mais sustentável e equilibrado.

Além disso, em 2009, o STF também estabeleceu um precedente relevante sobre a responsabilidade civil da administração pública por danos ambientais decorrentes de sua omissão no dever de fiscalização (Recurso Especial n. 1.071.741-SP - 2008/0146043-5) (Brasil, 2009). Essa decisão reforçou a necessidade de que o Estado cumpra seu papel na proteção ambiental, determinando que a administração pública responda solidariamente e de forma objetiva pelos danos ambientais causados por falhas no controle e fiscalização. Essa responsabilização ocorre sem prejuízo da aplicação de sanções cíveis, penais ou administrativas contra agentes públicos que atuem de forma negligente ou dolosa.

Outro avanço relevante na legislação ambiental brasileira é a Súmula n.º 652 do Superior Tribunal de Justiça (STJ) (Brasil, 2021), que amplia o escopo da responsabilidade pelo dano ambiental, estabelecendo que:

"Para efeito de apuração do nexo de causalidade no dano ambiental e de eventual solidariedade passiva, equiparam-se os que fazem, os que não fazem quando deveriam fazer, os que não se importam que o façam, os que calam quando lhes caberia denunciar, os que financiam para que o façam e os que beneficiam quando outros o fazem."

Esse entendimento reflete uma abordagem abrangente da responsabilização ambiental, reconhecendo que diferentes agentes podem contribuir para a degradação do meio ambiente, seja por ação, omissão, conivência ou financiamento.

Essa proposta estaria alinhada aos objetivos da Resolução do Parlamento Europeu sobre a Proteção dos Solos (2021/C 506/07 de 28 de abril), que visa assegurar que os compradores conheçam a condição ambiental das propriedades antes da aquisição. Implementar esse princípio em Portugal não apenas reforçaria a proteção ambiental, mas também incentivaria práticas mais sustentáveis, garantindo a preservação dos recursos naturais para as gerações presentes e futuras.

Por fim, a Súmula 613 do Superior Tribunal de Justiça (STJ) do Brasil (Brasil, 2020) estabelece que "*não se admite a aplicação da teoria do fato consumado em tema de direito ambiental*". Esse entendimento reforça o princípio da prevenção e da precaução, determinando que a degradação ambiental não pode ser legitimada pelo simples decurso do tempo. Ou seja, ainda que uma atividade poluidora tenha sido mantida por anos sem fiscalização ou contestação do poder público, isso não impede a adoção de medidas corretivas ou de recuperação ambiental. Esse posicionamento fortalece a ideia de que o direito ao meio ambiente

ecologicamente equilibrado é um direito difuso e intergeracional, e que a responsabilidade pela preservação dos recursos naturais não se extingue pelo uso prolongado de sítios contaminados. Essa abordagem poderia inspirar Portugal a adotar um marco normativo mais rigoroso, assegurando que danos ambientais não sejam perpetuados sob o argumento de consolidação fática, garantindo assim uma proteção ambiental mais efetiva e duradoura.

A teoria do risco na responsabilidade civil, originada na França do final do século XIX, conhecida como "*théorie du risque et profit*", estabelece um princípio fundamental de equidade e justiça: aquele que auferir os benefícios de uma atividade também deve assumir os riscos e as consequências dela decorrentes. Esse conceito, expresso pela máxima latina "*ubi com-moda, ibi incommoda*", (onde há benefícios, há ônus), reflete a ideia de que os impactos de uma atividade devem ser proporcionalmente assumidos por aqueles que dela se beneficiam.

No contexto da proteção ambiental, a aplicação da teoria do risco na responsabilidade civil assume um papel essencial. Empresas e indivíduos que lucram com atividades potencialmente degradantes devem ser responsabilizados pelos danos ambientais causados, independentemente da existência de culpa. Essa abordagem não apenas promove uma distribuição mais justa dos custos ambientais, mas também estimula a adoção de práticas mais sustentáveis. Ao responsabilizar os beneficiários diretos das atividades impactantes, reforça-se a necessidade de um compromisso coletivo com a preservação dos recursos naturais, incentivando um modelo de desenvolvimento que concilie crescimento económico e responsabilidade socioambiental.

Diante desses exemplos, Portugal poderia adotar uma abordagem semelhante, estabelecendo uma responsabilidade solidária e objetiva do Estado e de outros agentes públicos na prevenção e reparação dos danos ambientais. Tal estratégia fortaleceria o compromisso com a transparência ambiental e garantiria que as partes envolvidas em transações fundiárias tenham acesso a informações claras sobre o estado do solo e do ambiente, permitindo decisões informadas e responsáveis.

PERÍCIA AMBIENTAL

3.1 Perícia ambiental em sítios contaminados

A proteção efetiva do ambiente pelo Estado constitui uma questão de interesse público, sustentada por um robusto arcabouço jurídico ambiental internacional. Contudo, na prática, a sua implementação enfrenta desafios significativos, sendo um dos principais a dificuldade de compreensão de uma realidade complexa que envolve conhecimentos técnico-científicos aprofundados sobre o meio ambiente subterrâneo.

A perícia ambiental assume um papel central na reconstrução de eventos de contaminação ocorridos no passado, baseando-se em evidências obtidas por meio de um amplo conjunto de técnicas. Essa abordagem inclui desde a análise de dados históricos e a interpretação de fotografias aéreas até a identificação de fontes de liberação de contaminantes, da modelação do fluxo e transporte de contaminantes, além da aplicação de técnicas avançadas de remediação.

É inegável que, nas últimas décadas, as questões ambientais ganharam crescente relevância e, nesse contexto, a perícia ambiental emergiu como um instrumento essencial para a avaliação técnico-científica de informações químicas, geológicas e históricas. A sistematização desses dados permite a reconstituição de factos ocorridos, tornando-se um recurso fundamental para a resolução de litígios decorrentes de danos ambientais.

A perícia ambiental desempenha um papel fundamental em procedimentos administrativos e processos judiciais, especialmente naqueles que exigem avaliação técnica especializada para a determinação de danos ambientais, análise de contaminação do solo e da qualidade da água, bem como no estudo dos impactos de atividades industriais. Sua importância advém da necessidade de fornecer subsídios técnicos para a tomada de decisão, garantindo que a

avaliação dos riscos ambientais e das responsabilidades associadas seja conduzida com rigor científico e imparcialidade, promovendo a proteção dos recursos naturais e a justiça ambiental.

Em Portugal, no âmbito administrativo, a perícia pode ser utilizada na análise de Estudos de Impacte Ambiental (AIA), no licenciamento de empreendimentos ou na verificação do cumprimento de regulamentações ambientais. Para isso, são mobilizados profissionais especializados, responsáveis por elaborar avaliações técnicas detalhadas que fundamentam a tomada de decisões pelas autoridades competentes. Essas avaliações garantem que os projetos e atividades estejam em conformidade com as exigências legais e técnicas, protegendo os interesses da sociedade e do meio ambiente.

No contexto judicial, a perícia ambiental assume um papel determinante na resolução de litígios relacionados à responsabilidade civil e penal. Especialmente em casos que envolvem contaminação do solo, poluição hídrica ou acidentes ambientais, a perícia pode ser requerida tanto pelas partes envolvidas no processo quanto pelo próprio tribunal. O seu objetivo é esclarecer questões técnico-científicas complexas, permitindo a identificação da origem e da extensão dos danos ambientais, a verificação da conformidade com a legislação aplicável e a determinação das responsabilidades dos agentes envolvidos.

Tanto em procedimentos administrativos quanto em processos judiciais, a perícia ambiental constitui um instrumento fundamental para a caracterização e reabilitação de sítios contaminados, proporcionando diversos benefícios, tais como:

- Seleção de alternativas de remediação mais eficazes, baseada em uma compreensão precisa da interação entre o meio físico e os contaminantes, bem como na identificação das fontes de contaminação;
- Construção de modelos conceituais representativos, possibilitando uma caracterização detalhada da geologia e dos mecanismos de fluxo e transporte de contaminantes;
- Redução dos custos de reabilitação, uma vez que intervenções mais bem fundamentadas resultam em soluções otimizadas e eficientes;
- Prevenção de vulnerabilidades futuras, minimizando riscos para ocupações posteriores e possíveis reivindicações legais;
- Proteção da segurança jurídica e económica, evitando perdas associadas a transações imobiliárias, por meio da identificação precoce de responsabilidades.

A relevância da perícia ambiental também se destaca pelo seu impacto na saúde pública, sendo os danos ambientais um fator de preocupação prioritária. Os riscos associados à exposição a contaminantes não apenas comprometem a qualidade de vida das populações atuais, mas também representam uma ameaça intergeracional, dada a persistência de contaminantes no ambiente e a sua potencial bioacumulação. Dependendo da gravidade e da extensão da contaminação, os efeitos podem manifestar-se tanto a curto quanto a longo prazo, abrangendo desde intoxicações agudas até patologias crônicas, como doenças degenerativas e diversos tipos de cancro. A exposição prolongada a determinados contaminantes, mesmo em concentrações aparentemente baixas, pode ter consequências severas para a saúde humana, reforçando a necessidade de prevenção, monitorização e remediação ambiental eficaz.

A exposição contínua a riscos ambientais é uma realidade incontestável que exige uma resposta eficaz por parte das autoridades competentes. A implementação de ferramentas e mecanismos para mitigar esses danos torna-se essencial, considerando que a contaminação pode ocorrer de forma insidiosa, por meio de processos tão simples quanto a inalação de ar contaminado ou o consumo de água contaminada, muitas vezes sem o conhecimento dos indivíduos afetados.

Segundo Almeida *et al.* (2000), a perícia é a atividade que investiga as circunstâncias relativas a factos sobre os quais as autoridades competentes não possuem o conhecimento técnico necessário para emitir uma opinião qualificada, visando ao esclarecimento da verdade. No contexto ambiental, a perícia não apenas possibilita uma compreensão aprofundada do comportamento dos contaminantes e a identificação dos responsáveis, mas também subsidia a definição de soluções eficazes para a remediação e a reparação dos danos ambientais. Nesse sentido, Mirra (2004) destaca que os litígios ambientais envolvem um conhecimento técnico-científico complexo, dada a necessidade de comprovação de impactos ambientais que, muitas vezes, apresentam elevado grau de incerteza. Por essa razão, a perícia científica configura-se como o meio de prova por excelência nesses casos.

Um dos desafios mais significativos enfrentados pelas autoridades é o estabelecimento do nexo causal em casos de dano ambiental. A complexidade inerente a essas situações decorre não apenas das incertezas técnico-científicas, mas também das variáveis tempo-espaco envolvidas. O dano ambiental, muitas vezes, não é imediatamente perceptível, manifestando-se apenas a *posteriori*, o que torna a sua comprovação dependente da interpretação de eventos passados. Assim, a perícia ambiental desempenha um papel central ao estabelecer a relação de causalidade entre uma determinada atividade poluidora e os danos ambientais dela decorrentes, permitindo que a tomada de decisão seja baseada em evidências científicas robustas.

Nessa conjuntura, Almeida *et al.* (2000) ressaltam que a perícia ambiental deve atingir três objetivos fundamentais:

- Caracterização, dimensionamento e valoração do dano ambiental – A avaliação detalhada do impacto ambiental permite quantificar e mensurar as consequências das atividades lesivas ao meio ambiente;
- Caracterização e enquadramento legal da atividade lesiva – A identificação do arcabouço normativo aplicável é essencial para definir as responsabilidades associadas ao dano causado;
- Estabelecimento da relação de causalidade entre a atividade lesiva e o dano ambiental – A comprovação da origem do impacto ambiental é indispensável para responsabilizar devidamente os agentes poluidores.

Dever-se-ia dizer ainda que a perícia ambiental tem adquirido crescente relevância global, especialmente nos casos em que se busca identificar a origem da contaminação e os agentes responsáveis por sua libertação no meio ambiente (Morrison *et al.*, 2006). Esse processo exige não apenas a caracterização das substâncias químicas envolvidas e a compreensão das condições geoquímicas do local, mas também a análise da contribuição de múltiplas fontes poluidoras. Em muitos casos, a coexistência de diferentes contaminantes no mesmo sítio, provenientes de diferentes fontes, torna ainda mais desafiadora a atribuição de responsabilidades e a definição de estratégias de remediação.

Ainda segundo Almeida *et al.* (2000), e em consonância com as observações de Morrison *et al.* (2006), as técnicas de investigação ambiental são ferramentas fundamentais para garantir maior eficiência na etapa de reabilitação. A aplicação dessas metodologias possibilita a construção de modelos conceituais robustos e representativos, assegurando uma caracterização mais precisa da contaminação e evitando abordagens de remediação ineficazes. Além disso, a utilização de métodos científicos avançados contribui para prevenir perdas econômicas associadas à gestão inadequada dos sítios contaminados, promovendo intervenções mais eficazes e sustentáveis.

A formulação de um modelo conceitual da contaminação deve basear-se em uma abordagem integrada que combine dados históricos, químicos e geológicos. Esse modelo deve ser tecnicamente robusto e, ao mesmo tempo, acessível a diferentes públicos, incluindo profissionais do poder judiciário que não possuem formação técnico-científica específica.

Em casos de contaminação do solo e das águas subterrâneas, é essencial responder a um conjunto de indagações fundamentais, tais como:

- i. qual é a extensão da contaminação?
- ii. há recetores?
- iii. a que nível de contaminação os recetores foram expostos e por quanto tempo?
- iv. quais as substâncias químicas envolvidas?
- v. quais as matrizes impactadas?
- vi. quando ocorreu?
- vii. quais as ações necessárias para a reparação do dano e eliminação do risco para a saúde humana?

Dessa forma, a identificação e análise de evidências ambientais tornam-se um dos elementos centrais da perícia ambiental. No entanto, os indícios de contaminação nem sempre são evidentes ou de fácil deteção. Muitas vezes, esses vestígios são sutis, ocultos ou dispersos no tempo e no espaço, exigindo uma avaliação criteriosa, estruturada e baseada em metodologias rigorosas.

Nessa perspectiva, a tese procurou enfatizar a necessidade de que a identificação dos danos ambientais siga uma sequência de etapas metodológicas previamente estabelecidas. Sem essa abordagem estruturada, qualquer conclusão obtida pode ser insuficiente para fundamentar adequadamente a quantificação dos danos ambientais e a tomada de decisões sobre responsabilização e remediação.

Neste contexto, torna-se evidente que a perícia ambiental não se trata de um simples exercício de opinião técnica, mas sim de um ato vinculado ao interesse público e ao cumprimento de um *múnus* público. Conseqüentemente, há uma restrição explícita à emissão de opiniões pessoais que ultrapassem a análise técnico-científica do objeto da perícia. Assim, suposições, inferências não fundamentadas ou declarações desprovidas de comprovação científica não são admissíveis (Ferreira, 2015). Trata-se, portanto, de uma atividade profissional de elevada complexidade e relevância social, que exige não apenas rigor técnico e metodológico, mas também um compromisso ético intransigente (Cunha, 2005).

Dada essa complexidade, a adoção de metodologias investigativas globalmente consolidadas como condição *sine qua non* para compreender os mecanismos de interação entre os contaminantes e o meio físico. O uso de técnicas padronizadas e cientificamente embasadas permite avaliar com maior precisão a dinâmica dos contaminantes, identificar suas vias de migração, estimar os riscos associados e definir estratégias de mitigação mais eficazes. Essa

abordagem garante que as investigações ambientais sejam conduzidas de forma rigorosa, sistemática e alinhada às melhores práticas internacionais, proporcionando bases técnicas sólidas para a tomada de decisões e para a proteção do meio ambiente e da saúde pública.

A identificação da origem da contaminação e dos seus responsáveis é uma das tarefas mais complexas no âmbito da perícia ambiental. A multiplicidade de fontes potenciais de contaminação e a coexistência de diferentes contaminantes frequentemente tornam a investigação ainda mais desafiadora. Nesse sentido, a determinação da origem da contaminação pode enquadrar-se em cinco hipóteses distintas:

- Hipótese 1: Uma única fonte de contaminante afeta um único receptor, facilitando a identificação do nexo causal, uma vez que a simples presença do contaminante em concentrações acima dos limites normativos já estabelece a correlação direta;
- Hipótese 2: A presença de múltiplas fontes do mesmo contaminante dificulta a distinção entre elas, tornando necessária uma análise mais detalhada da distribuição espacial e temporal da contaminação;
- Hipótese 3: Contaminantes de fonte desconhecida atingem receptores, aumentando a incerteza sobre a origem e o impacto da contaminação;
- Hipótese 4: Uma única fonte de contaminação afeta múltiplos receptores em concentrações variáveis, exigindo uma abordagem diferenciada que considere as diferentes exposições e vulnerabilidade;
- Hipótese 5: O cenário mais complexo, no qual múltiplas fontes e múltiplos receptores estão envolvidos, requerendo a aplicação de técnicas avançadas de investigação, como modelagem de transporte de contaminantes e análises isotópicas.

Essas questões são centrais na identificação de danos ambientais e reforçam a importância da perícia técnica, que desempenha um papel essencial na comprovação científica da ocorrência do dano, na avaliação de sua extensão e na definição das medidas de remediação apropriadas. Além disso, em casos de danos irreversíveis, a perícia ambiental contribui para a definição da compensação pecuniária necessária para mitigar os danos remanescentes (Araújo, 2008).

Corroborando essa perspectiva, a *European Environment Agency* (EEA, 2021), identificou os principais desafios na investigação e reabilitação de sítios contaminados, destacando fatores críticos como:

- A complexidade das atividades industriais que originam a contaminação;

- A complexidade dos contaminantes, em especial aqueles que possuem múltiplas fontes ou diferentes mecanismos de transporte e degradação;
- A complexidade dos impactes ambientais e para a saúde humana, que podem se manifestar em diferentes escalas espaciais e temporais;
- A complexidade da responsabilização, que envolve questões jurídicas e técnicas na determinação donexo causal;
- O desafio de alcançar eficiência na reabilitação, garantindo que as medidas adotadas sejam eficazes, economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis.

Dessa forma, a perícia ambiental assume um papel central na investigação e remediação de sítios contaminados, permitindo não apenas a caracterização precisa dos impactes, mas também fornecendo bases técnicas robustas para a responsabilização dos agentes poluidores e a definição de soluções eficazes para a recuperação ambiental.

3.2 A perícia ambiental em Portugal

Em Portugal, a perícia desempenha um papel tanto em procedimentos administrativos quanto em processos judiciais, servindo como uma ferramenta indispensável para esclarecer questões que demandam conhecimentos técnico-científicos especializados. Dessa forma, a perícia não apenas contribui para a justiça no âmbito do sistema judiciário, mas também auxilia na fundamentação de decisões no contexto da administração pública.

O Código de Processo Administrativo (CPA), que regula os procedimentos administrativos em Portugal, embora não apresente uma regulamentação detalhada sobre a perícia, prevê sua utilização em situações que exijam a análise técnica de questões complexas. Essa previsão confere maior segurança jurídica aos processos administrativos, garantindo que decisões sejam tomadas com base em critérios objetivos e tecnicamente fundamentados.

De acordo com o artigo 68.º do CPA, a autoridade administrativa pode designar peritos sempre que necessário, especialmente nos casos que envolvam avaliação de danos, riscos ou a verificação da conformidade com regulamentos técnicos. A perícia pode ser solicitada para esclarecer ou reforçar as provas apresentadas pelas partes envolvidas, desempenhando um papel fundamental na análise das questões técnicas subjacentes ao processo e na motivação das decisões administrativas.

O artigo 115.º do CPA reforça essa prerrogativa ao prever que a autoridade administrativa pode recorrer a peritos quando a matéria em análise exigir um exame técnico detalhado.

O artigo estabelece ainda que os peritos designados devem possuir qualificação adequada e atuar com imparcialidade na realização da perícia. Além disso, determina que o relatório pericial tenha caráter informativo e constitua um elemento de suporte para a fundamentação da decisão administrativa.

No contexto ambiental, essa ferramenta assume especial relevância na avaliação de impactos ambientais, na fiscalização de atividades potencialmente poluidoras e na determinação da responsabilidade por danos ao meio ambiente. Assim, a perícia ambiental contribui significativamente para a promoção da justiça ambiental e para a efetividade das políticas públicas voltadas à proteção dos recursos naturais.

No Código de Processo Civil (CPC) de Portugal, a perícia é um dos meios probatórios essenciais para esclarecer questões técnico-científicas que extrapolam o conhecimento jurídico, sendo de particular relevância em processos judiciais que envolvem matérias complexas, como os danos ambientais. De acordo com o artigo 485.º e seguintes do CPC, a perícia pode ser determinada pelo juiz ou solicitada pelas partes quando se verificar a necessidade de análise especializada para a resolução do litígio. A relevância desse meio de prova decorre da sua capacidade de fornecer uma base científica para a tomada de decisão, especialmente em casos em que a caracterização do dano e a determinação do nexo causal são determinantes para a atribuição de responsabilidade.

A apreciação da prova, nos termos do artigo 348.º do CPC, rege-se pelo princípio do livre convencimento motivado, conferindo ao juiz autonomia na avaliação dos meios probatórios, desde que esta seja fundamentada e respeite os princípios da imparcialidade e da legalidade. Embora o juiz não esteja vinculado a uma hierarquia rígida na valoração das provas, a fundamentação da decisão é obrigatória, assegurando transparência e equidade no julgamento. Essa regra visa garantir que a apreciação das provas ocorra de forma objetiva e equilibrada, protegendo os direitos das partes e promovendo uma justiça efetiva.

No âmbito do Código Civil (CC) de Portugal, são estabelecidas as regras gerais de apreciação da prova nos processos civis, fornecendo diretrizes sobre como os tribunais devem valorar os elementos probatórios apresentados durante o julgamento. A prova desempenha um papel fundamental na estrutura processual, pois constitui o suporte para a formação da convicção do juiz quanto aos factos alegados pelas partes.

No que diz respeito à admissibilidade e relevância das provas, o Código Civil estabelece critérios específicos para garantir a idoneidade dos meios probatórios utilizados nos processos judiciais. Entre esses critérios, destaca-se a proibição do uso de provas obtidas por meios ilícitos ou fraudulentos, em conformidade com os princípios da legalidade e do devido processo legal. Além disso, a valoração da prova pode envolver diferentes tipos de meios probatórios, tais como provas documentais, testemunhais, periciais e materiais, cuja escolha depende da complexidade e da natureza da matéria sob apreciação judicial.

A liberdade de apreciação da prova, prevista no Código de Processo Civil, permite ao juiz avaliar os elementos probatórios apresentados sem estar vinculado a uma hierarquia pré-determinada ou a uma rigidez formal na sua análise. No entanto, essa liberdade não é absoluta, devendo ser exercida com base no princípio do livre convencimento motivado. Isso significa que o magistrado deve fundamentar sua decisão de forma objetiva e clara, garantindo que a apreciação das provas ocorra de maneira imparcial, equitativa e devidamente justificada. Essa exigência visa resguardar os direitos das partes envolvidas, assegurando que a decisão judicial seja não apenas legítima e transparente, mas também tecnicamente embasada.

Ao abordar matérias relacionadas a direitos, obrigações e responsabilidades, o Código Civil enfatiza a necessidade de uma avaliação equilibrada e criteriosa das provas, de forma a garantir que os direitos das partes sejam efetivamente protegidos e que o julgamento se baseie em elementos probatórios sólidos e confiáveis. Essa abordagem reforça a importância da perícia ambiental como meio essencial de prova nos litígios envolvendo danos ambientais, uma vez que a sua aplicação permite a obtenção de informações técnico-científicas rigorosas e imparciais, fundamentais para o correto dimensionamento do dano e para a responsabilização adequada dos agentes envolvidos.

No contexto da investigação de danos ambientais, a atuação pericial pode ser complementada pelo trabalho de entidades fiscalizadoras e órgãos policiais especializados. Destacam-se, nesse âmbito:

- Polícia Judiciária (PJ), responsável por investigações criminais complexas, incluindo crimes ambientais de maior gravidade;
- Inspeção-Geral da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território (IGAMAOT), entidade que exerce funções de fiscalização e inspeção administrativa no domínio ambiental;
- Serviço de Proteção da Natureza e do Ambiente da Guarda Nacional Republicana (SEPNA/GNR), que atua na prevenção e repressão de infrações ambientais, monitorizando atividades potencialmente poluidoras.

Adicionalmente, a Diretiva n.º 1/2023, de 14 de dezembro, da Procuradora-Geral da República, estabelece diretrizes específicas para a execução da Lei da Política Criminal no que se refere à investigação de ilícitos ambientais. Essa diretiva determina que, dependendo da especificidade do crime ambiental em causa, a competência para a condução da investigação criminal pode ser delegada à IGAMAOT, reforçando o papel desta entidade no combate aos crimes contra o ambiente. Dessa forma, observa-se que a perícia ambiental, aliada ao arcabouço normativo e às entidades de investigação e fiscalização, constitui um instrumento essencial para a materialização da responsabilidade ambiental, contribuindo para uma abordagem mais eficaz na reparação de danos e na punição dos agentes poluidores.

A atividade investigatória no ordenamento jurídico português rege-se pelo Código de Processo Penal (CPP), nomeadamente no que se refere ao princípio de livre investigação, à admissibilidade da prova e aos meios probatórios, que são enunciados de forma não taxativa nos artigos 128.º a 170.º. Dentre esses meios, destacam-se a prova testemunhal, as declarações do arguido, do assistente e das partes civis, a prova por acareação, por reconhecimento, por reconstituição do facto, bem como a pericial e documental (Barroso, 2021).

Nos termos do CPP, o objetivo da investigação criminal é recolher elementos de prova que possam confirmar ou refutar a ocorrência de um crime, identificar os responsáveis e possibilitar a instrução do processo. A condução dessa fase investigativa cabe ao Ministério Público (MP), que pode atuar diretamente ou coordenar as ações das forças policiais, sendo a Polícia Judiciária o órgão responsável pela investigação de crimes de maior complexidade.

No contexto dos danos ambientais, a atividade investigatória assume particular relevância na identificação dos agentes responsáveis, na determinação da extensão do impacto ambiental e na viabilidade de medidas de remediação. Para tanto, a investigação deve seguir normas específicas de competência de órgãos ambientais e de fiscalização, como o Serviço de Proteção da Natureza e do Ambiente da Guarda Nacional Republicana (SEPNA/GNR) e a Inspeção-Geral da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território (IGAMAOT).

Por fim, mas não menos importante, o artigo 9.º, n.º 2 do Código de Procedimento e de Processo nos Tribunais Administrativos (CPTA) estabelece a competência dos tribunais administrativos para julgar litígios relacionados a atos administrativos, tais como autorizações, licenças, fiscalizações e responsabilidades da Administração Pública. Nos termos desse artigo, os tribunais administrativos são responsáveis por apreciar a legalidade dos atos

administrativos praticados por entidades públicas, incluindo a Administração Pública e outras instâncias do Estado, sempre que tais atos afetem diretamente os direitos de cidadãos ou empresas.

No contexto específico dos danos ambientais, os tribunais administrativos desempenham um papel fundamental, pois têm a competência para analisar ações que questionem a validade de atos administrativos relacionados à proteção do ambiente e para avaliar a responsabilização da Administração Pública em casos de contaminação ambiental. Assim, esse foro jurídico constitui um espaço essencial para a contestação de decisões omissivas ou irregulares da Administração, reforçando a necessidade de uma atuação estatal diligente na preservação dos recursos naturais.

No âmbito desta pesquisa, foi realizada uma análise jurisprudencial sobre a contaminação de solo e águas subterrâneas em Portugal, porém, não foram identificadas perícias ambientais formalmente registadas sobre esse tema. Esse dado evidencia uma lacuna na aplicação da perícia ambiental como instrumento de prova técnica, sugerindo que sua incorporação sistemática nos processos judiciais e administrativos ainda se encontra em estágio inicial no país.

Essa constatação reforça a necessidade premente de desenvolver metodologias e diretrizes estruturadas para a caracterização rigorosa dos impactes ambientais e dos riscos para a saúde humana. Dentro dessa perspectiva, a geoquímica aplicada à perícia ambiental destaca-se como uma ferramenta essencial para a quantificação e materialização dos danos ambientais, bem como para a atribuição de responsabilidades nos âmbitos civil, administrativo e penal.

Dessa forma, a perícia ambiental em Portugal não deve ser vista apenas como um recurso técnico auxiliar na resolução de litígios e na aplicação da legislação ambiental, mas sim como um instrumento fundamental para a construção de uma governança ambiental mais eficaz e transparente. A sua adoção sistemática em procedimentos administrativos e judiciais pode contribuir significativamente para a mitigação de riscos ambientais, permitindo uma gestão mais eficiente dos recursos naturais e garantindo a proteção da saúde pública e do ambiente para as gerações futuras.

GEOQUÍMICA AMBIENTAL

A geoquímica desempenha um papel essencial na investigação de sítios contaminados, fornecendo informações fundamentais sobre a origem, distribuição e comportamento dos contaminantes no meio físico (Petrisor, 2014). Ao integrar conhecimentos de diversas disciplinas, como mineralogia, pedologia, hidrogeologia e hidrogeoquímica permite-nos compreender de forma abrangente as interações entre os contaminantes e o ambiente geológico.

A análise da composição química do solo, da água subterrânea e dos sedimentos possibilita a identificação dos processos que controlam a distribuição, mobilidade, persistência e toxicidade dos contaminantes no meio. Métodos analíticos avançados, como a espectrometria de massa, a cromatografia líquida e a especiação química, permitem a identificação das formas específicas dos contaminantes, resultando em uma avaliação mais precisa dos riscos ambientais e da exposição humana.

O conhecimento das propriedades físico-químicas dos solos e suas interações com os contaminantes é determinante para a formulação de estratégias eficazes de gestão ambiental e proteção da saúde pública. No entanto, a complexidade dos sistemas naturais, a presença de contaminantes emergentes e os efeitos das atividades antrópicas impõem desafios significativos na previsão do comportamento geoquímico dos contaminantes. A influência de fatores como pH, potencial de oxirredução (Eh), matéria orgânica e mineralogia do meio determina a dinâmica dos contaminantes e suas potenciais interações com os compartimentos ambientais.

No contexto da remediação de sítios contaminados, a geoquímica é fundamental para a seleção e o planeamento das tecnologias mais adequadas. O conhecimento detalhado dos processos geoquímicos que ocorrem no meio – como precipitação, dissolução, troca catiónica, adsorção e reações de oxirredução – é essencial para prever a mobilidade e transformação dos contaminantes durante as intervenções de remediação. Por exemplo, em barreiras reativas permeáveis, esses processos controlam a remoção de contaminantes; já em tecnologias como biorremediação e oxidação química *in situ*, a eficiência do tratamento está diretamente

relacionada às condições geoquímicas locais, incluindo a disponibilidade de doadores e aceptores de eletrões, a presença de microrganismos específicos e a composição da fase aquosa e sólida do meio.

Além disso, a geoquímica desempenha um papel crítico na monitorização e avaliação da eficácia das remediações ao longo do tempo. Durante e após a implementação das medidas de reabilitação, é indispensável acompanhar a evolução dos contaminantes e as condições ambientais para assegurar o cumprimento dos objetivos estabelecidos. A caracterização geoquímica contínua permite avaliar a reatividade dos contaminantes, a formação de subprodutos e as alterações nos parâmetros físico-químicos do meio, fornecendo dados essenciais para tomadas de decisão baseadas em evidências científicas. Assim, a monitorização geoquímica não apenas garante a sustentabilidade das intervenções, mas também possibilita ajustes estratégicos nos processos de remediação, assegurando maior eficiência e minimizando riscos residuais.

4.1 Solo e contaminação do solo

O solo é um dos recursos naturais mais essenciais para a manutenção da vida no planeta, desempenhando funções ecológicas, socioeconômicas e ambientais essenciais. Entre essas funções, destacam-se a regulação do ciclo hidrológico, o suporte físico para a vegetação, a provisão de nutrientes fundamentais para os ecossistemas e a atuação como um meio de filtragem e retenção de substâncias químicas.

A contaminação do solo pode ser definida como a presença de substâncias químicas ou organismos em concentrações superiores aos níveis considerados seguros, resultando em efeitos adversos sobre os organismos vivos e os sistemas ambientais.

A contaminação do solo tem se tornado uma preocupação crescente, particularmente em ambientes urbanos e industriais, onde as atividades humanas exercem pressões significativas sobre sua qualidade e funcionalidade. A exposição prolongada a solos contaminados pode representar riscos substanciais para a saúde humana, além de comprometer a biodiversidade e a integridade dos ecossistemas terrestres.

A contaminação do solo pode gerar impactes severos não apenas para os ecossistemas, mas também para a saúde humana, especialmente quando ocorre a migração de substâncias tóxicas para a água potável ou para cadeias alimentares. A exposição pode acontecer por meio da inalação de vapores voláteis, ingestão de partículas de solo contaminado ou contato

dérmico, elevando o risco de desenvolvimento de doenças respiratórias, neurológicas e oncológicas.

No contexto da gestão de sítios contaminados, o solo é definido como um material inconsolidado que recobre as rochas, podendo ser formado no local ou transportado e depositado em outras regiões. Estruturalmente, o solo é constituído por uma matriz tridimensional de partículas minerais, cuja configuração porosa permite a retenção, o transporte e a transformação de contaminantes. Essa porosidade, preenchida por fluidos como água e gases, exerce um papel determinante na mobilidade e no comportamento dos contaminantes, tornando o solo um elemento-chave na avaliação dos impactos ambientais e na concepção de estratégias de remediação.

A introdução de contaminantes no solo é um fenómeno amplamente associado às atividades antrópicas, incluindo práticas industriais, agrícolas e urbanas. A interação desses contaminantes com a matriz do solo é altamente complexa e governada por uma série de fatores, tais como as propriedades físico-químicas do solo (porosidade, mineralogia, teor de matéria orgânica e capacidade de troca iónica), as características dos contaminantes (solubilidade, persistência, toxicidade e especiação química) e as condições ambientais externas (temperatura, precipitação, pH e processos de intemperismo). A interdependência desses fatores influencia diretamente a mobilidade dos contaminantes, sua biodisponibilidade, seu potencial de adsorção e sua persistência no ambiente, impactando diretamente a viabilidade das tecnologias de remediação e os riscos associados à exposição humana e ecológica.

Enquanto recurso finito e não renovável à escala humana, o solo desempenha funções ambientais, económicas e sociais essenciais. Destacam-se, entre essas funções, a produção de alimentos e biomassa para a alimentação humana e animal, a oferta de matérias-primas (minerais e recursos energéticos), a regulação e o armazenamento da água e dos nutrientes essenciais ao equilíbrio ecológico, a conservação da biodiversidade por meio do suporte a diversas espécies e a atuação como um banco genético natural, promovendo a resiliência dos ecossistemas. A relevância multifuncional do solo sublinha sua importância para a sustentabilidade ambiental e para a preservação da qualidade de vida das gerações futuras.

No contexto da investigação e da remediação de sítios contaminados, as propriedades físicas do solo, em particular a porosidade e a permeabilidade, assumem papel determinante. A porosidade representa a fração volumétrica de espaços vazios no solo, enquanto a permeabilidade refere-se à capacidade do meio poroso de permitir o fluxo de fluidos, como a água e

o ar, através seus poros interligados. Essas propriedades influenciam diretamente a dinâmica dos contaminantes no meio subterrâneo, afetando sua dispersão, migração e potenciais vias de exposição. A correta caracterização dessas propriedades é essencial para a definição de estratégias eficazes de remediação, garantindo intervenções ambientalmente sustentáveis e economicamente viáveis.

A porosidade e a permeabilidade do solo são características fundamentais que influenciam diretamente a retenção e o transporte de água e contaminantes em subsuperfície. Esses parâmetros são controlados por diversos fatores, tais como:

- Tamanho das partículas: Solos arenosos, compostos por partículas de maior diâmetro, apresentam elevada permeabilidade, permitindo o rápido escoamento de fluidos e contaminantes. Em contraste, solos argilosos, caracterizados por partículas menores, possuem alta porosidade, mas baixa permeabilidade, dificultando a movimentação da água e dos contaminantes;
- Distribuição do tamanho dos poros: A heterogeneidade na distribuição dos poros influencia tanto a porosidade quanto a permeabilidade do solo. Solos com uma distribuição equilibrada de poros tendem a apresentar melhor drenagem e capacidade de retenção de água, enquanto solos constituídos predominantemente por microporos, como as argilas finas, exibem baixa permeabilidade e reduzida taxa de infiltração;
- Textura do solo: Determinada pela proporção de areia, silte e argila, a textura impacta diretamente a porosidade e a permeabilidade. A granulometria do solo influencia a distribuição e a conectividade dos poros, afetando a capacidade de armazenamento hídrico e o transporte de fluidos através da matriz porosa. Solos com alta fração de areia apresentam maior drenagem, enquanto aqueles ricos em argila possuem maior capacidade de retenção de água e adsorção de contaminantes;
- Estrutura do solo: A disposição das partículas e a formação de agregados controlam a permeabilidade e a estabilidade estrutural. Solos bem estruturados favorecem a infiltração e a drenagem da água, enquanto solos compactados ou degradados podem apresentar restrição no fluxo de fluidos devido à obstrução dos poros interconectados;
- Teor de matéria orgânica: A disposição das partículas e a formação de agregados controlam a permeabilidade e a estabilidade estrutural. Solos bem estruturados favorecem a infiltração e a drenagem da água, enquanto solos compactados ou

degradados podem apresentar restrição no fluxo de fluidos devido à obstrução dos poros interconectados;

- Compactação do solo: O aumento da densidade do solo por processos naturais ou antropogênicos reduz a porosidade total, restringindo a infiltração de água e a difusão de gases. Solos compactados tendem a apresentar menor permeabilidade, aumentando o escoamento superficial e reduzindo a capacidade de retenção de contaminantes;
- Humidade do solo: A saturação do solo afeta sua permeabilidade, uma vez que a ocupação dos poros por água reduz a difusão de gases e pode impedir a migração de contaminantes dissolvidos. Solos secos tendem a ser mais permeáveis, enquanto solos saturados apresentam menor capacidade de infiltração.

Essas propriedades são interdependentes e desempenham um papel determinante na dinâmica dos contaminantes no solo, influenciando sua mobilidade, biodisponibilidade e persistência.

Além da porosidade e da permeabilidade, outras propriedades físico-químicas do solo impactam a interação e o comportamento dos contaminantes, pois influenciam diretamente a solubilidade, a mobilidade e a transformação química dos contaminantes, incluindo:

- pH e potencial de oxirredução: O pH afeta a solubilidade e a especiação química dos contaminantes. Em solos ácidos, metais pesados tendem a estar na forma solúvel, aumentando sua mobilidade. Já em solos alcalinos, há maior tendência à precipitação e à imobilização desses elementos. O potencial de oxirredução regula a estabilidade química dos contaminantes, influenciando sua transformação em formas mais ou menos móveis. Por exemplo, sob condições redutoras, certos metais podem ser convertidos em formas menos solúveis, reduzindo sua mobilidade;
- Capacidade de troca catiónica (CTC): A CTC refere-se à capacidade do solo de adsorver e trocar cátions na matriz porosa. Solos com alta CTC, como aqueles ricos em argila e matéria orgânica, apresentam maior retenção de contaminantes metálicos, reduzindo sua mobilidade e potencial de lixiviação para as águas subterrâneas;
- Capacidade de retenção de água: A estrutura e a composição do solo influenciam sua capacidade de armazenamento hídrico, determinando o tempo de residência dos contaminantes na matriz sólida. Solos com elevada retenção hídrica podem

manter contaminantes por períodos prolongados, favorecendo processos de degradação natural ou, ao contrário, prolongando sua persistência no ambiente.

A compreensão detalhada dessas propriedades do solo é essencial para prever a mobilidade e a persistência dos contaminantes, bem como para a definição de estratégias de gestão ambiental e remediação de sítios impactados. A interação entre os contaminantes e a matriz do solo pode levar à sua adsorção, atenuação natural, transformação química ou, em casos desfavoráveis, à migração para compartimentos ambientais adjacentes, como as águas subterrâneas e os ecossistemas superficiais.

Quando submetido a atividades humanas, sejam elas industriais, agrícolas ou urbanas, o solo torna-se um potencial receptor de substâncias contaminantes, representando um desafio significativo para a gestão ambiental. A avaliação detalhada das suas propriedades é, portanto, um requisito essencial para a identificação de riscos ambientais e para o desenvolvimento de medidas eficazes de mitigação e remediação.

A contaminação do solo ocorre quando substâncias químicas são introduzidas, acumuladas ou libertadas de maneira inadequada, resultando em impactos negativos na qualidade do solo, na integridade dos recursos hídricos subterrâneos e na saúde humana. Embora o solo possua uma capacidade intrínseca de atenuação e degradação de contaminantes, essa função natural pode ser comprometida quando os limites de autodepuração são excedidos, tornando os danos ambientais potencialmente irreversíveis, mesmo diante da adoção de estratégias de remediação.

A identificação de um sítio contaminado baseia-se na detecção de substâncias químicas cujas concentrações ultrapassam os valores de referência estabelecidos por normativas ambientais. Esses valores são definidos com base em critérios rigorosos de proteção à saúde humana e à integridade dos ecossistemas, garantindo que a exposição a agentes químicos potencialmente tóxicos ocorra dentro de limites considerados seguros. A superação desses valores representa um indicativo de contaminação ambiental e demanda a adoção de investigações detalhadas.

Quando os níveis de contaminantes ultrapassam os valores de referência, há uma alteração significativa na qualidade do solo, da água subterrânea e, em alguns casos, do ar. Essa condição de contaminação exige a implementação de protocolos sistemáticos de avaliação, que incluem a caracterização detalhada do tipo e da extensão da contaminação, bem como a análise dos mecanismos de transporte, transformação e persistência dos contaminantes no meio. A

compreensão desses processos é essencial para a definição de estratégias de investigação e remediação, assegurando que a recuperação do ambiente seja conduzida de maneira cientificamente embasada e tecnicamente viável.

4.2 Fases do solo

O solo é um sistema trifásico, composto por três fases interdependentes: a fase sólida, a fase líquida e a fase gasosa. A fase sólida constitui aproximadamente 50% do volume total do solo e é composta por uma fração mineralógica, derivada da decomposição e intemperismo das rochas, e uma fração orgânica, resultante da decomposição da matéria orgânica. Essa fase proporciona a estrutura física do solo e influencia diretamente sua capacidade de retenção de água e adsorção de contaminantes.

A fase líquida é constituída principalmente por água, que se encontra distribuída nos poros do solo, podendo estar presente na forma de água gravitacional, capilar ou higroscópica. Além de servir como meio de transporte para nutrientes essenciais e substâncias dissolvidas, essa fase pode atuar como veículo para a mobilização de contaminantes, influenciando sua biodisponibilidade e potencial de impacto ambiental.

A fase gasosa, por sua vez, é composta por vapores de água e gases como oxigênio, dióxido de carbono e metano, circulando nos espaços porosos do solo. Essa fase desempenha um papel fundamental nos processos biogeoquímicos, regulando as trocas gasosas entre o solo e a atmosfera, além de influenciar reações de oxidação e redução que afetam a mobilidade e a transformação de contaminantes.

A interação dinâmica entre essas três fases determina as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, influenciando a disponibilidade de água e oxigênio para os organismos vivos, a retenção e o transporte de contaminantes, bem como a resposta do solo a mudanças ambientais e a intervenções de remediação. A proporção relativa entre essas fases é altamente variável e depende de fatores como tipo de solo, humidade, compactação e processos biogeoquímicos em curso. Dessa forma, compreender a interação entre essas fases é essencial para a caracterização ambiental de sítios contaminados e para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação e reabilitação do solo.

4.2.1 Fase sólida

A fase sólida do solo é constituída por duas frações principais: a fração mineralógica e a fração orgânica. A fração mineralógica é composta por fragmentos de rochas e minerais, cuja composição química, morfologia e granulometria variam amplamente. A distribuição granulométrica dessas partículas determina a textura do solo, sendo classificada com base na proporção de areia, silte e argila. A textura influencia diretamente a retenção de água e nutrientes, a permeabilidade à água e ao ar, bem como a mobilidade de contaminantes. Além disso, o arranjo e a organização dessas partículas na matriz do solo definem sua estrutura, que pode variar entre os horizontes pedológicos e afetar processos como a infiltração da água e a estabilidade dos agregados do solo (Pereira, 2022).

A fração orgânica, por sua vez, está predominantemente concentrada na camada superficial do solo e é composta por resíduos de origem biológica, incluindo restos de plantas, animais e microrganismos em diferentes estágios de decomposição. A quantidade de matéria orgânica presente no solo é influenciada por diversos fatores, como clima, temperatura, tipo de vegetação, material de origem (rocha-mãe), topografia e grau de saturação hídrica. Solos com textura mais fina, como os argilosos, tendem a apresentar maior teor de matéria orgânica, uma vez que sua elevada capacidade de retenção de água e nutrientes favorece tanto a decomposição quanto a preservação da matéria orgânica (Pereira, 2022).

Embora a fração orgânica represente uma proporção relativamente pequena do volume total do solo, seu impacto nas propriedades químicas e biológicas do meio é significativo. A matéria orgânica atua como um reservatório de nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio, promovendo o crescimento vegetal e a atividade microbológica. Além disso, é responsável por grande parte da capacidade de troca catiónica do solo, influenciando sua fertilidade e sua capacidade de retenção de íons (Pereira, 2022).

Do ponto de vista ambiental, a matéria orgânica desempenha um papel fundamental na atenuação da contaminação, pois pode adsorver e imobilizar contaminantes como pesticidas e metais pesados, reduzindo sua biodisponibilidade e mobilidade no ambiente. Sua presença também melhora a estrutura do solo, aumentando a capacidade de retenção de água e ar, o que favorece a atividade microbiana e a biodegradação de contaminantes orgânicos. Outro aspecto relevante é seu papel na mitigação das mudanças climáticas, uma vez que atua como um importante reservatório de carbono, contribuindo para a regulação do ciclo global do carbono.

Além disso, a matéria orgânica influencia diretamente o pH do solo, afetando a solubilidade e a lixiviação de metais e outros contaminantes. Dependendo das condições geoquímicas, pode promover tanto a imobilização quanto a mobilização de contaminantes, impactando significativamente a qualidade do solo e a dinâmica dos contaminantes no meio subterrâneo. Assim, compreender a interação entre a fração orgânica e os contaminantes é essencial para a gestão de sítios contaminados e para a implementação de estratégias eficazes de remediação.

4.2.2 Fase líquida

A fase líquida do solo desempenha um papel fundamental nos processos geoquímicos e biogeoquímicos, pois influencia diretamente a mobilidade de nutrientes e contaminantes, a disponibilidade hídrica para organismos vivos e as interações físico-químicas no meio subterrâneo. A água presente no solo pode manifestar-se em diferentes formas: na fase líquida, infiltrando-se e ocupando os poros; na fase gasosa, na forma de vapor de água circulante; e ainda na estrutura cristalina de alguns minerais, onde está quimicamente incorporada.

A água líquida no solo pode ser classificada em três categorias distintas: água adsorvida, água capilar e água gravitacional, cada uma desempenhando funções específicas na retenção hídrica, no transporte de substâncias e na disponibilidade de nutrientes para os organismos edáficos.

A água adsorvida forma uma fina película em torno das partículas sólidas do solo e está fortemente retida por forças eletrostáticas, estabelecendo interações com as cargas superficiais dos minerais e da matéria orgânica. Devido à intensidade dessas forças de retenção, essa água não está disponível para ser absorvida pelas plantas, sendo considerada de baixa disponibilidade hídrica (Pereira, 2022). Apesar disso, a água adsorvida desempenha um papel essencial na manutenção da estrutura do solo e na coesão entre as partículas, contribuindo para a estabilidade dos agregados e influenciando propriedades como a resistência à erosão e a plasticidade do solo.

A água capilar constitui a fração mais significativa da fase líquida do solo e é a principal fonte de água disponível para os organismos vivos. Essa fração encontra-se retida nos espaços intersticiais por forças de adesão e coesão entre a água e as partículas do solo, sendo acessível para a absorção radicular e para os microrganismos do solo. Sua retenção depende diretamente da textura e da estrutura do solo, influenciando processos como a disponibilidade hídrica para as plantas e a atividade biológica do solo (Pereira, 2022). Solos de textura média,

como os franco-argilosos, apresentam maior capacidade de retenção de água capilar, favorecendo a produtividade agrícola e a estabilidade dos ecossistemas terrestres.

A água gravitacional corresponde à fração de água que não é retida pelos poros do solo e que se move livremente sob a ação da gravidade. Esse tipo de água ocorre temporariamente, geralmente após eventos de precipitação intensa ou irrigação excessiva que superam a capacidade de retenção do solo. Durante seu deslocamento, a água gravitacional promove o transporte de solutos, incluindo nutrientes e contaminantes, afetando propriedades físico-químicas do solo, como o pH, a condutividade elétrica e o potencial de oxirredução (Pereira, 2022). Esse processo pode ter impactos tanto positivos quanto negativos: enquanto pode contribuir para a reposição de nutrientes em camadas mais profundas do solo, também pode favorecer a lixiviação de elementos essenciais e contaminantes, comprometendo a fertilidade do solo e a qualidade das águas subterrâneas.

A dinâmica dessas diferentes formas de água no solo determina sua capacidade de armazenamento, retenção e condução de fluidos, influenciando sua produtividade, estabilidade estrutural e vulnerabilidade à contaminação. A compreensão da fase líquida do solo é, portanto, essencial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de investigação e remediação de sítios contaminados, permitindo a mitigação de impactos associados à mobilidade de contaminantes e garantindo a sustentabilidade dos recursos hídricos e edáficos.

4.2.3 Fase gasosa

A fase gasosa do solo ocupa os espaços intersticiais não preenchidos pela água e é composta essencialmente por ar e vapor de água. Os gases presentes no solo, como oxigênio (O_2), dióxido de carbono (CO_2) e nitrogênio (N_2), desempenham um papel fundamental nos processos físico-químicos e biológicos que ocorrem nesse ambiente. A disponibilidade de oxigênio, por exemplo, influencia diretamente os processos de oxirredução, os quais regulam a decomposição da matéria orgânica, a mobilidade de metais pesados e a liberação de nutrientes essenciais para a biota do solo (Pereira, 2022).

A quantidade e a dinâmica da fase gasosa no solo são determinadas por diversos fatores, incluindo porosidade, grau de saturação, capacidade ao ar, permeabilidade ao ar e compactação. De maneira geral, com o aumento da profundidade, a porosidade tende a diminuir devido ao adensamento das partículas sólidas, o que reduz a capacidade de circulação de gases. Solos arenosos possuem maior capacidade ao ar, pois apresentam poros de maior diâmetro que facilitam a troca gasosa. Em contrapartida, solos argilosos, devido à alta retenção de água em seus micróporos, possuem menor permeabilidade ao ar, pois a água ocupa os espaços

intersticiais e dificulta a circulação gasosa. O teor de matéria orgânica também influencia a capacidade ao ar, uma vez que promove a formação de agregados, criando espaços interconectados que favorecem a movimentação dos gases (Pereira, 2022).

A composição do ar no solo apresenta algumas diferenças em relação ao ar atmosférico. Em geral, a fase gasosa do solo contém menores concentrações de oxigênio e maiores teores de dióxido de carbono devido à atividade microbiana e à respiração radicular. Esse fenômeno decorre do consumo de oxigênio por organismos aeróbios e pela liberação de dióxido de carbono como subproduto da decomposição da matéria orgânica (Pereira, 2022). Além disso, a difusão gasosa no solo é significativamente mais lenta do que na atmosfera, uma vez que a presença de água nos poros impõe resistência ao movimento dos gases.

O equilíbrio gasoso no solo resulta da interação entre a atividade biológica, os processos de decomposição da matéria orgânica e as trocas gasosas com a atmosfera. Esse equilíbrio é fundamental para a manutenção da qualidade do solo, da saúde das plantas e da estabilidade dos processos geoquímicos, afetando diretamente a mobilidade dos contaminantes e a eficiência das estratégias de remediação ambiental. Em solos contaminados, a análise da fase gasosa é essencial para a detecção de compostos voláteis, como hidrocarbonetos e solventes orgânicos clorados, auxiliando na identificação de plumas de contaminação e na escolha das técnicas de remediação mais adequadas.

4.3 Tipos de contaminantes

O solo pode conter uma ampla variedade de contaminantes, que variam desde iões inorgânicos simples, como metais pesados e sais solúveis, até moléculas orgânicas complexas, como pesticidas, hidrocarbonetos de petróleo e clorados. Esses contaminantes são introduzidos no solo principalmente por atividades antropogênicas, incluindo práticas agrícolas, industriais e urbanas, e podem se acumular ao longo do tempo, alterando significativamente a qualidade ambiental do solo e dos recursos hídricos subterrâneos.

A mobilidade, a persistência e a toxicidade desses contaminantes são fortemente influenciadas pelas propriedades físico-químicas do solo, tais como pH, textura, capacidade de troca catiônica (CTC), teor de matéria orgânica e potencial de oxirredução (Eh). Essas características determinam a interação dos contaminantes com os componentes do solo e influenciam processos como adsorção, lixiviação, volatilização e degradação biológica ou química. Enquanto alguns contaminantes podem ser degradados ou imobilizados por mecanismos

naturais, outros apresentam alta persistência, permanecendo no ambiente por longos períodos e aumentando o risco de contaminação da água subterrânea e de bioacumulação na cadeia trófica.

De maneira geral, os contaminantes do solo podem ser classificados em inorgânicos e orgânicos, conforme descrito a seguir:

- Contaminantes inorgânicos: incluem metais pesados, nitratos, fosfatos e sais solúveis. Esses contaminantes geralmente não se degradam no ambiente e podem se tornar tóxicos dependendo da forma química e biodisponibilidade. Metais, por exemplo, podem ser adsorvidos às partículas do solo ou dissolvidos na água subterrânea, aumentando seu potencial de toxicidade e mobilidade.
- Contaminantes orgânicos: incluem substâncias como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs), hidrocarbonetos clorados, pesticidas, fármacos e resíduos industriais. Esses compostos podem sofrer transformações químicas ou biológicas no solo, como biodegradação e foto degradação, embora alguns apresentem alta resistência à decomposição, resultando em contaminação de longo prazo.

A identificação dos contaminantes no solo e a avaliação de seus mecanismos de transporte e transformação são fundamentais para a caracterização de sítios contaminados e para a definição das estratégias de remediação mais eficazes. Dessa forma, compreender as interações dinâmicas entre contaminantes e os componentes do solo é essencial para prever seus impactos ambientais, auxiliar na definição de medidas de mitigação e controle, e promover uma gestão sustentável dos recursos naturais, garantindo a proteção dos ecossistemas e da saúde pública.

4.3.1 Metais pesados

Os metais pesados representam um dos principais grupos de contaminantes inorgânicos no solo, incluindo elementos como arsênio (As), cádmio (Cd), chumbo (Pb), mercúrio (Hg) e cobre (Cu). Esses contaminantes são particularmente preocupantes devido à sua mobilidade no solo, toxicidade em baixas concentrações e alta reatividade. Muitos metais podem ser absorvidos pelas plantas e acumulados em seus tecidos, ingressando na cadeia alimentar e representando riscos para a saúde humana e animal. Além disso, esses elementos apresentam tempo de permanência indeterminado no solo, tornando sua remediação um desafio complexo e de longo prazo. A interação dos metais com as propriedades do solo, como teor de matéria orgânica, pH e capacidade de troca catiónica (CTC), influencia diretamente sua

mobilidade e toxicidade, tornando essencial a avaliação e a monitorização contínua dessas propriedades.

O risco associado aos metais pesados não se limita apenas à sua concentração total no solo, mas está diretamente relacionado à sua biodisponibilidade, ou seja, à fração do metal que está quimicamente disponível para os organismos vivos. A biodisponibilidade de um metal é determinada pela sua forma química e pelas condições do meio, que afetam sua mobilidade e interação biológica. Quando um metal se torna biodisponível, pode ser absorvido por plantas e, eventualmente, transferido ao longo da cadeia trófica, culminando em impactos tóxicos de longo prazo para a saúde humana e para os ecossistemas.

A biodisponibilidade de um metal pesado no solo é influenciada por uma série de fatores ambientais e biológicos, entre os quais se destacam:

- Concentração total do metal: Embora a biodisponibilidade dependa mais da forma química do metal do que de sua concentração total, esta última ainda serve como um indicador básico do potencial de contaminação.
- Fatores físico-químicos:
 - ✓ pH do solo: A acidez do solo influencia diretamente a solubilidade dos metais. Em solos ácidos, metais como Cd, Pb e Zn tornam-se mais solúveis e bio disponíveis, aumentando o risco de absorção por plantas e organismos. Em solos alcalinos, ocorre a precipitação de muitos metais, reduzindo sua mobilidade;
 - ✓ Potencial de oxirredução (Eh): A disponibilidade dos metais pode variar conforme o estado potencial de oxirredução do ambiente. Sob condições oxidantes, certos metais podem existir em formas altamente solúveis, enquanto em ambientes redutores, podem ser convertidos em estados menos solúveis, afetando diretamente sua biodisponibilidade. A variação no potencial de oxirredução pode ser modulada pela presença de matéria orgânica, disponibilidade de oxigênio do solo e atividade microbiana, influenciando a especiação química dos contaminantes;
 - ✓ Interação com a matéria orgânica: A matéria orgânica pode tanto reduzir a biodisponibilidade dos metais, por meio da formação de complexos orgânicos estáveis, quanto atuar como reservatório temporário, libertando metais gradualmente no ambiente e prolongando a exposição a longo prazo. Além disso, a presença de compostos orgânicos favorece a atividade microbiana,

que pode transformar metais por processos bioquímicos, alterando suas formas químicas e sua biodisponibilidade;

- ✓ A textura e mineralogia do solo: A capacidade de retenção dos metais é influenciada pela granulometria e composição mineralógica do solo. Solos argilosos e ricos em óxidos de ferro e alumínio tendem a reter metais mais fortemente, reduzindo sua mobilidade, enquanto solos arenosos e de baixa CTC podem favorecer sua lixiviação para a água subterrânea.
- Fatores biológicos:
 - ✓ Bioacumulação e bio magnificação: Muitos metais pesados podem ser acumulados nos tecidos de plantas e animais, aumentando sua concentração ao longo da cadeia alimentar. Esse processo é particularmente preocupante para metais como mercúrio (Hg) e cádmio (Cd), que apresentam elevado potencial de toxicidade;
 - ✓ Atividade microbiana: Microrganismos do solo desempenham um papel fundamental na solubilização, estabilização e transformação dos metais, podendo alterar significativamente sua biodisponibilidade. Algumas bactérias, por exemplo, promovem a redução de metais tóxicos, convertendo-os em formas menos bio disponíveis, enquanto outras podem favorecer sua mobilização e solubilização.

A mobilidade dos metais no solo está diretamente relacionada à sua capacidade de se manter retido na matriz do solo ou ser libertado para a solução do solo, onde pode ser transportado e absorvido pelos organismos vivos. Os principais fatores que influenciam esse comportamento incluem:

- Metais fracamente ligados ao solo: Possuem alta biodisponibilidade e podem ser facilmente solubilizados por pequenas variações no pH, Eh ou pela presença de agentes complexantes;
- Metais fortemente ligados ao solo: Permanecem estáveis e pouco solúveis, reduzindo o risco de toxicidade. No entanto, mudanças ambientais induzidas por atividades humanas (como deposição de resíduos industriais, aplicação de fertilizantes ou mudança no uso do solo) podem alterar a estabilidade, tornando-os mais móveis.

A interação complexa entre esses fatores evidencia a necessidade de uma abordagem integrada para avaliar os riscos ambientais associados aos metais pesados. A biodisponibilidade desses elementos resulta de um equilíbrio dinâmico entre processos químicos, físicos e

biológicos, o que torna a avaliação da biodisponibilidade uma componente essencial para a compreensão dos impactos e riscos para a saúde humana decorrentes dos metais pesados no solo.

4.3.2 Hidrocarbonetos de petróleo

Os hidrocarbonetos de petróleo são compostos orgânicos formados exclusivamente por átomos de carbono e hidrogênio, cuja estrutura química influencia diretamente suas propriedades físico-químicas e seu comportamento no ambiente. São classificados de acordo com a estrutura de sua cadeia carbônica, como ilustrado na Figura 4.3.2.1.

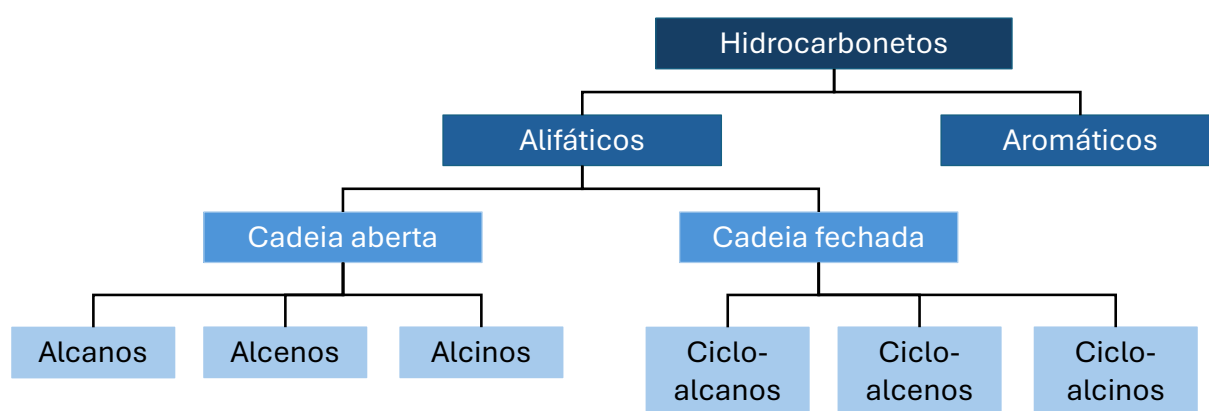


Figura 4.3.2.1: Classificação dos hidrocarbonetos
Fonte: a autora

Os hidrocarbonetos de petróleo podem ser divididos em duas frações principais:

- Alifáticos: incluem alcanos de cadeia linear (parafinas), alcanos ramificados (isoparafinas) e cicloalcanos (naftenos);
- Aromáticos: subdividem-se em hidrocarbonetos monoaromáticos (BTEX – benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos) e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs – como naftaleno, antraceno e benzo(a)pireno).

Os hidrocarbonetos alifáticos são moléculas apolares, o que os torna insolúveis em água. Suas interações intermoleculares ocorrem predominantemente por forças de dipolo induzido ou forças de Van der Waals, sendo relativamente fracas. Como resultado, esses compostos apresentam densidade menor que da água, razão pela qual flutuam quando em contato com a água.

As propriedades dos hidrocarbonetos alifáticos variam de acordo com sua massa molar. De maneira geral, à medida que a massa molar aumenta, ocorre um acréscimo na densidade, aumento dos pontos de fusão e ebulição, devido à intensificação das interações intermoleculares (forças de dispersão de London) e redução da solubilidade em água, pois moléculas maiores tendem a formar agregados coesos que limitam sua dispersão no meio aquoso.

Essas características impactam diretamente a mobilidade e persistência ambiental dos hidrocarbonetos. Compostos de massa molar reduzida (como os alcanos de cadeia curta) tendem a ser mais voláteis, dispersando-se rapidamente. Em contrapartida, hidrocarbonetos de cadeia longa são mais estáveis e apresentam maior potencial à bioacumulação, tornando-se problemáticos do ponto de vista ambiental. Em suma, compreender como a massa molar influencia a propriedade dos hidrocarbonetos é fundamental para a caracterização dos contaminantes.

Os hidrocarbonetos aromáticos são compostos orgânicos caracterizados pela presença de um ou mais anéis aromáticos. Esse arranjo estrutural cria um sistema de elétrons π deslocados, conferindo alta estabilidade química a esses compostos.

Os hidrocarbonetos aromáticos podem ser classificados em dois grupos principais:

- Hidrocarbonetos monoaromáticos (BTEX): apresentam um único anel aromático, como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno;
- Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs): compostos por dois ou mais anéis aromáticos condensados, como naftaleno, antraceno e benzo(a)pireno.

Os BTEX são notórios por sua mobilidade, toxicidade e comportamento ambiental, sendo frequentemente associados à contaminação por derramamento de combustíveis fósseis. Devido à sua natureza apolar, esses compostos apresentam baixa solubilidade à água, mas elevada miscibilidade à solventes orgânicos. Apesar de serem hidrofóbicos, os BTEX apresentam solubilidade relativa, sendo que o benzeno é o mais solúvel, seguido pelo tolueno e, posteriormente, pelos xilenos. Essa propriedade influencia sua dispersão no ambiente e sua capacidade de atingir lençóis freáticos, tornando-os contaminantes de alta prioridade na avaliação de risco ambiental.

A baixa densidade dos BTEX faz com que formem camadas flutuantes na superfície da água, tornando possível sua identificação e remoção. Essa característica é fundamental para a seleção de estratégias de remediação, especialmente para a recuperação de águas contaminadas por derramamento de combustíveis.

Os BTEX possuem elevadas pressões de vapor, tornando-se altamente voláteis. Como consequência, podem evaporar rapidamente quando expostos à atmosfera, aumentando os riscos de exposição por inalação e potencializando sua disseminação atmosférica.

Compostos como o benzeno são reconhecidos por sua toxicidade aguda e crônica, sendo classificados como cancerígenos pela Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC). Além disso, os BTEX são altamente inflamáveis, exigindo protocolos rigorosos de manuseio e armazenamento para minimizar riscos de explosão e combustão. A natureza apolar dos BTEX favorece sua adsorção em matéria orgânica e sua bioacumulação em tecidos lipídicos de organismos vivos, aumentando sua persistência ambiental e potencializando efeitos ecotoxicológicos a longo prazo. A Figura 4.3.2.2, ilustra as moléculas de BTEX.

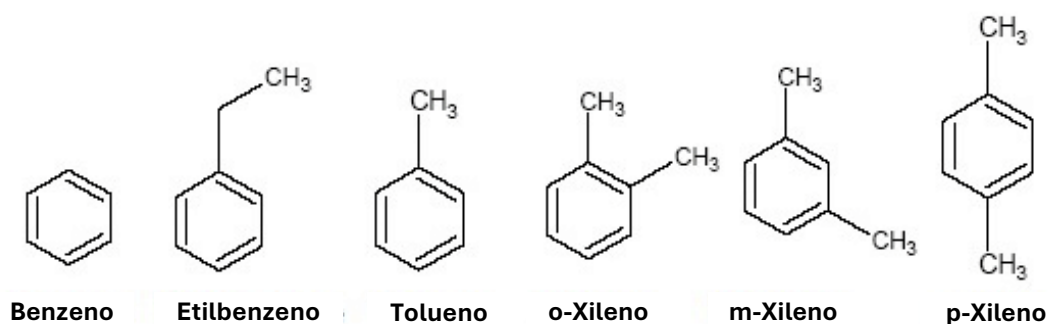


Figura 4.3.2.2.: Estrutura molecular do BTEX

Fonte: Cuevas *et al.*, 2021

Devido às suas propriedades físico-químicas, os hidrocarbonetos de petróleo, em especial os BTEX, representam uma ameaça significativa ao meio ambiente e para a saúde humana. Sua capacidade de contaminar as águas subterrâneas, sua elevada toxicidade e seu potencial de bioacumulação fazem com que esses compostos exijam monitorização rigorosa e estratégias de remediação eficazes. A compreensão detalhada do comportamento e das interações ambientais dos hidrocarbonetos é essencial para o desenvolvimento de políticas ambientais mais eficazes e para a gestão sustentável de recursos naturais.

Os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH) representam uma classe de compostos orgânicos formados por dois ou mais anéis aromáticos condensados, conferindo-lhes elevada estabilidade química e notável persistência ambiental. Embora mais de 100 tipos de PAHs tenham sido identificados, 16 compostos foram priorizados pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA) devido à sua relevância ambiental, industrial e aos riscos toxicológicos associados.

Os PAHs são predominantemente gerados por processos de combustão incompleta de matéria orgânica. Em ambientes naturais e industriais, a queima de carvão, petróleo, madeira e biomassa constitui uma das principais fontes de emissão desses compostos. A ineficiência na combustão impede a oxidação completa da matéria orgânica, levando à formação de estruturas aromáticas complexas e ambientalmente persistentes.

Os PAHs são predominantemente gerados por processos de combustão incompleta de matéria orgânica. Em ambientes naturais e industriais, a queima de carvão, petróleo, madeira e biomassa constitui uma das principais fontes de emissão desses compostos. A ineficiência na combustão impede a oxidação completa da matéria orgânica, levando à formação de estruturas aromáticas complexas e ambientalmente persistentes.

Além das fontes naturais, as atividades antropogênicas representam uma contribuição significativa para a emissão de PAHs no meio ambiente. Processos industriais, como a produção de alcatrão, refinarias de petróleo, siderurgia e emissões veiculares, são exemplos de atividades que libertam grandes quantidades desses contaminantes. Esse aporte intensificado eleva os riscos ambientais e de saúde pública, dado o potencial tóxico e carcinogênico de alguns PAHs.

Devido à sua alta estabilidade química e biológica, os PAHs tendem a acumular-se no ambiente, especialmente em solos e sedimentos, onde podem permanecer por longos períodos. Esse acúmulo compromete a qualidade ambiental e impacta negativamente os ecossistemas, exigindo monitorização contínua e medidas de remediação para mitigar os riscos da exposição prolongada.

Os PAHs são hidrofóbicos, apresentando baixa solubilidade à água, mas elevada afinidade por matéria orgânica e partículas sedimentares. Essa característica favorece sua adsorção em solos e sedimentos, resultando na lenta degradação natural desses compostos e na contaminação persistente de longo prazo. Como consequência, os PAHs frequentemente se acumulam em ambientes aquáticos e terrestres, representando uma preocupação ambiental crítica.

Devido a essa elevada estabilidade e resistência aos processos naturais de degradação, os PAHs são classificados como Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs). Esses contaminantes são reconhecidos por sua longa permanência no meio ambiente, resistência à fotólise, biodegradação e oxidação química, além de apresentarem elevada toxicidade e potencial bioacumulativo.

Os PAHs apresentam alta capacidade de bioacumulação, sendo absorvidos por organismos vivos e concentrando-se em tecidos ao longo do tempo, especialmente em organismos aquáticos. Essa tendência de acumulação representa um risco significativo para a saúde humana, pois a exposição crônica pode resultar em efeitos tóxicos, carcinogênicos e mutagênicos. Estudos demonstram que compostos como o benzo(a)pireno estão diretamente associados ao desenvolvimento de cancro e mutações genéticas, reforçando a necessidade de monitorização rigorosa e estratégias eficazes de remediação para minimizar a exposição a esses contaminantes.

A persistência ambiental dos PAHs está diretamente relacionada à sua massa molecular. Esses compostos podem ser categorizados em duas classes principais, de acordo com o número de anéis aromáticos:

- PAHs de baixa massa molecular (2 a 3 anéis aromáticos)
 - ✓ Maior volatilidade e solubilidade em água;
 - ✓ Maior susceptibilidade à fotólise, biodegradação e oxidação química;
 - ✓ Maior mobilidade no meio ambiente, podendo atingir lençóis freáticos e corpos d'água superficiais.
- PAHs de alta massa molecular (4 ou mais anéis aromáticos)
 - ✓ Baixa volatilidade e solubilidade em água;
 - ✓ Elevada hidrofobicidade, favorecendo sua retenção em solos e sedimentos;
 - ✓ Maior persistência ambiental, dificultando a sua degradação e tornando sua remoção mais complexa.

A solubilidade dos PAHs é inversamente proporcional ao número de anéis aromáticos em sua estrutura. Com o aumento do número de anéis, ocorre uma redução significativa na solubilidade em meio aquoso, devido à maior área de superfície molecular e ao predomínio de interações apolares. Como consequência, PAHs de alta massa molecular apresentam forte adsorção à partículas do solo, reduzindo sua mobilidade, mas aumentando sua persistência ambiental.

Essa diferença de comportamento entre PAHs de baixa e alta massa molecular tem implicações diretas para a investigação, pois define o grau de mobilidade e toxicidade dos compostos. Enquanto os PAHs de baixa massa molecular são mais facilmente transportados na água, os de alta massa molecular tendem a permanecer aderidos ao solo e sedimentos, dificultando sua remoção e exigindo técnicas avançadas de remediação. A Figura 4.3.2.3. ilustra as moléculas dos 16 PAHs prioritários.

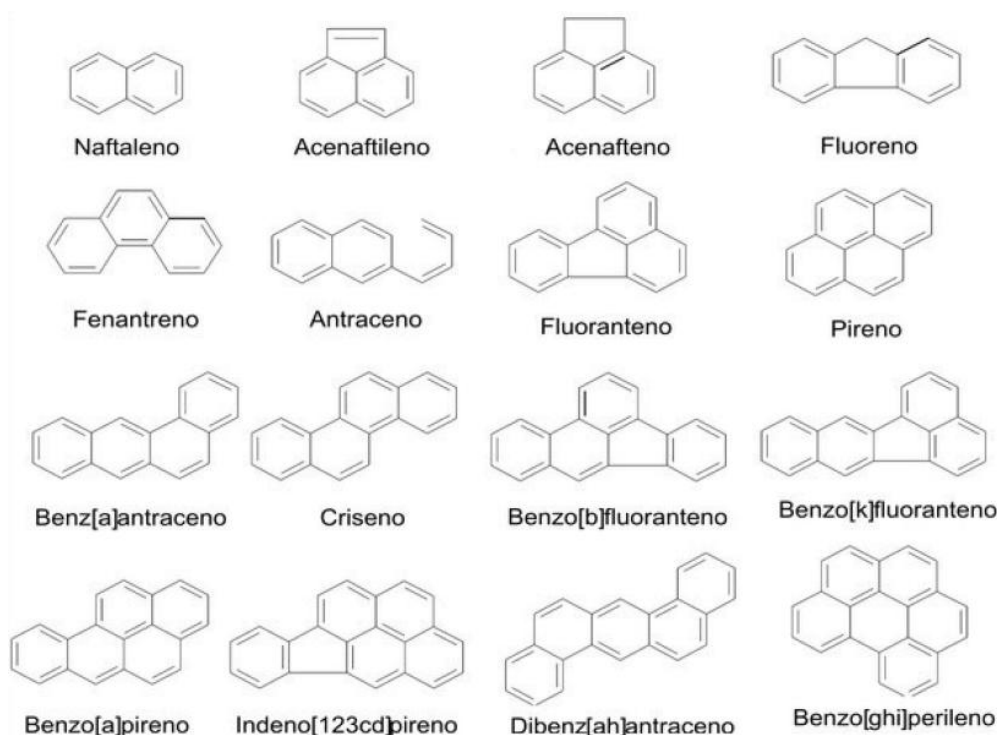


Figura 4.3.2.3: Estrutura molecular dos 16 PAHs prioritários

Fonte: Meire *et al.* 2007

Esses hidrocarbonetos estão ubiqüamente presentes em combustíveis fósseis, óleos, carvão e seus derivados, desempenhando papéis essenciais em diversas aplicações industriais, tais como produção de energia e síntese de produtos químicos. Sua ampla utilização deve-se, em grande parte, às suas propriedades físico-químicas, que conferem versatilidade para diferentes processos industriais.

No entanto, apesar de sua relevância econômica e tecnológica, a toxicidade desses compostos representa um desafio significativo para a saúde pública e para o ambiente. Muitos hidrocarbonetos, especialmente os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs), possuem potencial carcinogênico, sendo considerados perigosos mesmo a concentrações relativamente baixas, sobretudo em exposições prolongadas ou em ambientes com alta concentração de contaminantes.

Além disso, a persistência desses compostos no ambiente, combinada com sua resistência a processos naturais de degradação, contribui para sua acumulação em solos, sedimentos e organismos vivos. Esse fenômeno aumenta o risco de bioacumulação e bio magnificação ao longo das cadeias tróficas, amplificando a exposição de organismos aquáticos e terrestres, incluindo os seres humanos, e tornando seus efeitos adversos de longa duração.

Diante desses fatores, embora os hidrocarbonetos sejam fundamentais para a indústria moderna, suas propriedades tóxicas, potencial carcinogênico e alta persistência ambiental exigem a implementação de rigorosos controles ambientais, monitorização contínua e estratégias eficazes de remediação. Somente por meio de uma gestão ambiental integrada e do desenvolvimento de tecnologias mais limpas será possível minimizar os impactos adversos e assegurar a proteção dos ecossistemas e da saúde humana.

4.3.3 Hidrocarboneto clorados

Os hidrocarbonetos clorados são compostos orgânicos pertencentes à família dos alcanos, caracterizados pela substituição de um ou mais átomos de hidrogênio por átomos de cloro (Cl), formando haletos de alquila através de ligações covalentes. Esses compostos são amplamente utilizados em diversas aplicações industriais e comerciais, incluindo solventes orgânicos, pesticidas, fluidos dielétricos, plastificantes e intermediários químicos, devido à sua elevada estabilidade química e às suas propriedades físico-químicas específicas, incluindo alta densidade, baixa miscibilidade à água e alta solubilidade em solventes orgânicos. No entanto, sua elevada toxicidade, persistência ambiental e tendência à bioacumulação fazem com que sejam considerados contaminantes prioritários em avaliações de risco ambiental.

Os hidrocarbonetos clorados podem ser classificados em duas categorias principais: hidrocarbonetos clorados alifáticos e aromáticos. Os hidrocarbonetos clorados alifáticos, apresentam variações significativas em seus pontos de fusão, ebulição e volatilidade, sendo essas propriedades diretamente influenciadas pela massa molecular e pelo grau de cloração. Compostos como tricloroeteno (TCE) e tetracloroeteno (PCE) são amplamente utilizados como solventes industriais e desengordurantes, enquanto outros, como o cloreto de metileno, são empregados em formulações químicas e processos de extração.

Um dos aspectos ambientais mais críticos relacionados aos hidrocarbonetos clorados alifáticos é a formação do cloreto de vinilo (CV), um composto de alta toxicidade e elevada afinidade à água. Essa propriedade confere ao CV uma mobilidade significativa no meio, aumentando seu potencial de dispersão e contaminação. Como consequência, o CV pode atingir lençóis freáticos, bioacumular-se em ecossistemas aquáticos e representar sérios riscos para a saúde humana, dada a sua toxicidade comprovada e seu potencial carcinogênico.

A degradação anaeróbica de hidrocarbonetos clorados alifáticos como o tetracloroeteno (PCE) e o tricloroeteno (TCE) pode levar à formação de subprodutos como dicloroeteno (DCE) e cloreto de vinilo (CV). Esses intermediários, especialmente o CV, possuem elevada

persistência e toxicidade, exigindo monitorização contínua e estratégias de remediação eficazes para evitar sua propagação em ambientes subterrâneos e superficiais.

A Figura 4.3.3.1 ilustra a estrutura molecular dos hidrocarbonetos alifáticos clorados, destacando a influência da sua conformação química nas propriedades físico-químicas, na reatividade e no comportamento ambiental desses compostos.

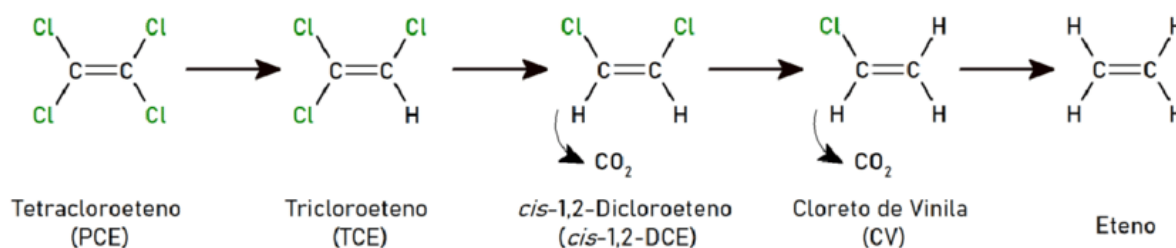


Figura 4.3.3.1. Estrutura molecular dos hidrocarbonetos alifáticos clorados.

Fonte: Leite (2020)

Dado que os hidrocarbonetos alifáticos clorados foram selecionados como foco central desta tese, suas propriedades físico-químicas, comportamento ambiental e os impactos associados à contaminação dos solos e das águas subterrâneas serão analisados de forma aprofundada. No Capítulo 6.2 e subsequentes, serão explorados aspectos críticos relacionados à mobilidade, persistência, toxicidade e aos mecanismos de degradação desses compostos. O objetivo é proporcionar uma compreensão abrangente dos desafios inerentes à sua presença no ambiente, bem como das implicações ambientais associadas, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias eficazes de investigação e remediação.

Os hidrocarbonetos clorados aromáticos possuem um ou mais anéis benzênicos substituídos por átomos de cloro, sendo altamente estáveis devido à ressonância eletrônica característica dos sistemas aromáticos. Apesar de sua relativa estabilidade química, esses compostos são suscetíveis a reações de substituição eletrofílica aromática, permitindo modificações estruturais que influenciam suas propriedades e comportamento ambiental.

Os hidrocarbonetos aromáticos clorados de maior relevância ambiental incluem clorofenóis, bifenilas policloradas (PCBs) e diversos pesticidas clorados. Esses compostos são conhecidos por sua elevada persistência, bioacumulação e toxicidade, exigindo monitorização rigorosa e medidas de controle para evitar impactos adversos para a saúde pública e aos ecossistemas.

Os clorofenóis são derivados do fenol (C_6H_5OH), nos quais um ou mais átomos de hidrogênio do anel benzênico são substituídos por átomos de cloro. Essa substituição confere características polares, resultando em pontos de fusão e ebulição elevados, bem como afinidade diferenciada por solventes orgânicos e água.

Os clorofenóis são amplamente empregados na preservação de madeira (como o pentaclorofenol - PCP), retardantes de chama, formulação de herbicidas, fungicidas e produtos antimicrobianos. No entanto, devido à sua toxicidade e persistência ambiental, esses compostos são considerados contaminantes prioritários.

Existem 19 clorofenóis, que se diferenciam pelo número e pela posição dos átomos de cloro no anel aromático. A toxicidade desses compostos varia conforme o grau de cloração e a posição relativa dos átomos de cloro em relação ao grupo -OH. Em geral:

- Compostos com cloração nas posições 2 e 6 ou apenas na posição 2 são menos tóxicos;
- Compostos como o 3,4,5-Triclorofenol apresentam toxicidade significativamente elevada, evidenciando a influência da estrutura molecular na determinação dos riscos ambientais e de saúde.

A solubilidade dos clorofenóis em água diminui à medida que com aumenta o número de átomos de cloro, o que favorece sua adsorção à matéria orgânica e aos sedimentos, dificultando sua degradação e remoção. Devido à sua baixa biodegradabilidade e resistência a processos naturais de degradação, esses compostos são classificados como Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs), exigindo controle rigoroso e estratégias eficazes de remediação. Figura 4.3.3.2: ilustra a estrutura molecular dos clorofenóis.

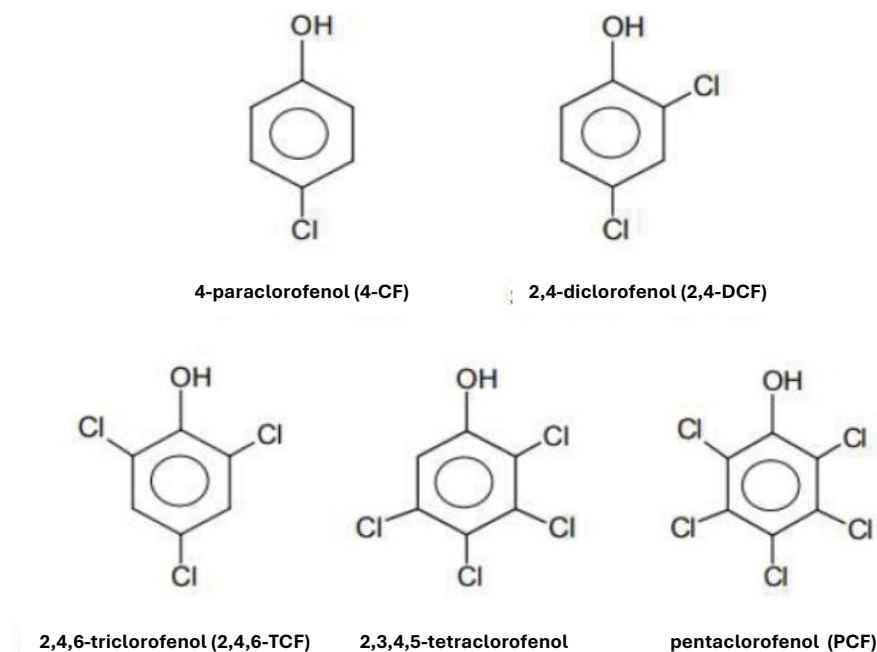


Figura 4.3.3.2: Estrutura molecular dos hidrocarbonetos aromáticos clorados - clorofenóis

Fonte: Cardeña, 2009

Os bifenilos policlorados (PCBs) são compostos formados por dois anéis benzênicos interligados, nos quais os átomos de hidrogênio podem ser substituídos por até 10 átomos de cloro ($C_{12}H_{10-n}Cl_n$), com n variando de 1 a 10. Essa variação no grau e na posição da cloração permite a formação de 209 congêneres distintos, cujas propriedades físico-químicas, comportamento e toxicidade são fortemente influenciadas pelo grau e pela distribuição espacial do átomo de cloro. Devido à sua elevada estabilidade térmica e resistência química, os PCBs foram amplamente utilizados em transformadores elétricos, capacitores, fluidos dielétricos, adesivos e plastificantes, tornando-se uma das classes de contaminantes mais persistentes no meio ambiente.

Os PCBs são altamente hidrofóbicos e lipofílicos, o que favorece sua bioacumulação em tecidos adiposos de organismos vivos e dificulta sua degradação natural. A robustez das ligações carbono-cloro (C-Cl) confere a esses compostos elevada estabilidade química, tornando sua degradação ambiental extremamente lenta. Embora alguns processos anaeróbicos mediados por microrganismos específicos possam promover a dehalogenação parcial, a persistência desses compostos levou à sua classificação como Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) pela Convenção de Estocolmo, destacando os riscos que representam para ecossistemas e para a saúde humana.

A toxicidade dos PCBs está diretamente relacionada à quantidade e à posição dos átomos de cloro em sua estrutura. De maneira geral, os congêneres mais tóxicos são aqueles que não apresentam cloro na posição *orto*, mas possuem cloros nas posições *para* e pelo menos em um par de posições *meta*, conforme ilustrado na Figura 4.3.3.3. Essa configuração molecular aumenta a afinidade dos PCBs por receptores biológicos específicos, promovendo sua persistência no organismo e sua capacidade de bioacumulação, amplificando os efeitos tóxicos e tornando esses compostos uma séria ameaça à qualidade ambiental e à saúde pública, especialmente devido à sua disseminação global e à persistência a longo prazo.

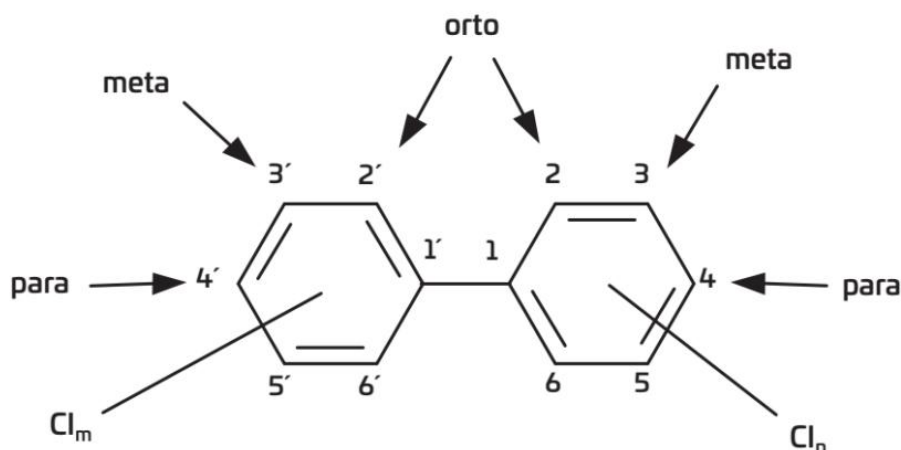


Figura 4.3.3.3: Representação genérica da estrutura molecular das bifenilas policloradas

Fonte: Adaptado de Webber, 2012

Historicamente, os bifenilos policlorados (PCBs) foram amplamente utilizados na indústria devido às suas propriedades físico-químicas únicas, incluindo elevada estabilidade térmica e química, alta resistência elétrica e excelente capacidade isolante. Essas características os tornaram ideais para aplicações como fluidos dielétricos em transformadores e capacitores, essenciais para a eficiência e a segurança de sistemas elétricos. Além disso, esses compostos foram empregados em óleos hidráulicos e lubrificantes, reduzindo o desgaste de equipamentos industriais e prolongando sua vida útil.

Outras aplicações incluíram seu uso como plastificantes e aditivos em tintas, vernizes, selantes e revestimentos, contribuindo para o aumento da durabilidade, resistência à degradação e impermeabilidade dos materiais. Entretanto, apesar de sua ampla utilização e dos benefícios industriais associados, o reconhecimento dos impactos ambientais e dos riscos toxicológicos dos PCBs levou à restrição progressiva de sua produção e uso. A partir da década de 1970, diversos países implementaram regulamentações rigorosas, culminando na proibição global dos PCBs pela Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs).

Desde então, esforços têm sido direcionados para a gestão segura, o descomissionamento de equipamentos contendo PCBs e a busca por alternativas menos prejudiciais ao meio ambiente e à saúde pública.

Os pesticidas constituem uma classe de compostos químicos amplamente utilizados no controle de pragas, doenças e ervas daninhas, desempenhando um papel fundamental na proteção das culturas agrícolas e na prevenção de doenças. Dentro desta categoria, destacam-se os inseticidas (e.g. DDT e organofosforados), os herbicidas (e.g. glifosato e atrazina) e os fungicidas (e.g. carbendazim e clorotalonil). No entanto, apesar dos benefícios agronômicos, o uso indiscriminado dessas substâncias pode resultar em impactos ambientais significativos, comprometendo a qualidade do solo, dos recursos hídricos e a biodiversidade.

A presença de ligações C–Cl na estrutura dos pesticidas organoclorados confere-lhes uma elevada estabilidade química, reduzindo significativamente sua taxa de degradação natural. Embora essa característica prolongue sua eficácia no controle de pragas, também representa um sério problema ambiental, pois esses compostos podem persistir no meio ambiente por décadas. Essa elevada resistência à degradação aumenta o risco de bioacumulação no solo e nos organismos vivos, favorecendo sua disseminação pela cadeia alimentar e amplificando os efeitos ecotoxicológicos.

O DDT (dicloro-difenil-tricloroetano) é um exemplo clássico desse fenômeno. Devido à sua natureza apolar e hidrofóbica, o DDT apresenta alta afinidade à lipídios, o que favorece sua acumulação nos tecidos adiposos de organismos vivos. Esse comportamento facilita sua transferência ao longo da cadeia alimentar, expondo predadores de topo a concentrações crescentes da substância, um processo conhecido como bio magnificação. A persistência ambiental do DDT é um dos fatores que explicam sua detecção em ecossistemas mesmo décadas após sua proibição. Esse pesticida já foi amplamente utilizado, mas seus impactos adversos sobre aves, peixes e outros organismos não-alvo levaram sua restrição global e proibição em muitos países, bem como sua classificação como Poluente Orgânico Persistente (POP) pela Convenção de Estocolmo. A Figura 4.3.3.4 ilustra a estrutura molecular do DDT.

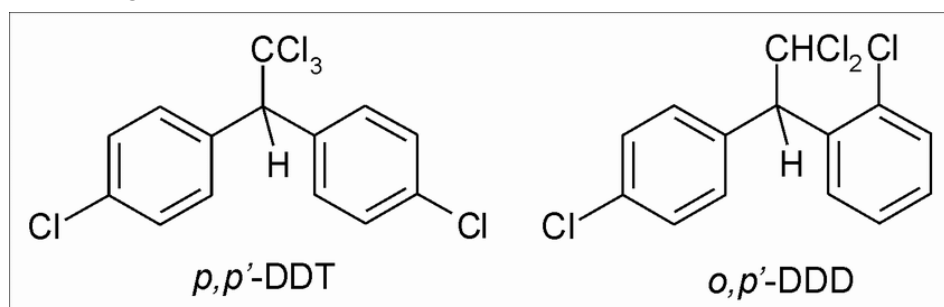


Figura 4.3.3.4: Estrutura molecular dos hidrocarbonetos aromáticos clorados – DDT

Em síntese, a contaminação do solo por substâncias químicas—incluindo hidrocarbonetos, metais pesados e pesticidas—configura um desafio crítico para a saúde humana e para o ambiente. A elevada persistência e a capacidade de bioacumulação desses compostos comprometem a qualidade dos solos e dos recursos hídricos, dificultando sua remoção e intensificando os riscos de contaminação ao longo da cadeia alimentar.

Os hidrocarbonetos aromáticos e alifáticos, bem como os pesticidas organoclorados, ilustram essa problemática, pois apresentam alta resistência à degradação e forte afinidade por matéria orgânica, o que potencializa seus efeitos tóxicos e sua permanência no ambiente. Além disso, a dinâmica complexa de interação entre esses contaminantes e as propriedades físico-químicas do solo dificulta a remediação eficaz desses contaminantes, tornando os processos de descontaminação tecnicamente desafiadores e economicamente onerosos.

4.3.4 Radioativos

Os contaminantes radioativos são substâncias que emitem radiação ionizante, podendo representar riscos significativos para o ambiente e para a saúde humana. Esses contaminantes podem ser de origem naturais ou antropogênicos, sendo frequentemente detetados no solo, na água subterrânea e em resíduos industriais. Entre os elementos radioativos de maior preocupação ambiental destacam-se o urânio (U), radônio (Rn), rádio (Ra) e célio (Cs), cada um com diferentes fontes, mecanismos de dispersão e potenciais efeitos adversos.

A presença desses radionuclídeos no ambiente pode resultar em contaminação prolongada, devido à sua elevada persistência e mobilidade, exigindo monitorização contínua e a implementação de estratégias eficazes de remediação.

O urânio é um metal pesado naturalmente presente na crosta terrestre, encontrado em minerais como uraninita e autunita. Ele ocorre em diferentes isótopos, sendo os mais relevantes:

- Urânio-238 (^{238}U) – Isótopo mais abundante na natureza (~ 99,3%).
- Urânio-235 (^{235}U) – Menos abundante, mas essencial para aplicações nucleares, devido à sua capacidade de fissão nuclear.

A contaminação por urânio pode decorrer de diversas fontes, incluindo a mineração e processamento de urânio para geração de energia nuclear, uso de armas nucleares e munições de urânio empobrecido, fertilizantes fosfatados, que podem conter traços de urânio e efluentes industriais e rejeitos radioativos.

O comportamento geoquímico do urânio no meio ambiente varia de acordo com o seu estado de oxidação: U(IV) (forma reduzida, pouco solúvel, predominante em condições redutoras.) e o U(VI) (forma oxidada, altamente solúvel). Em condições oxidantes e com pH neutro a alcalino, o urânio forma complexos solúveis, como UO_2^+ (ião uranila), tornando-se altamente móvel na água subterrânea. Já em condições redutoras e ácidas, o urânio se precipita como óxidos e fosfatos, tornando-se menos disponível para transporte.

A mobilidade do urânio no solo pode ser limitada pela adsorção em minerais argilosos, óxidos de ferro e matéria orgânica. Em solos ricos em matéria orgânica, o urânio pode formar complexos estáveis, reduzindo sua biodisponibilidade. No entanto, a presença de fertilizantes fosfatados pode aumentar sua mobilidade, competindo pelos sítios de adsorção no solo e facilitando sua lixiviação para aquíferos.

O radônio é um gás nobre radioativo e incolor, gerado pelo decaimento do rádio (Ra-226) na cadeia do urânio. Sua principal preocupação ambiental decorre do fato de ser altamente volátil, acumulando-se em ambientes fechados, como casas e edifícios construídos sobre solos ricos em urânio.

A contaminação por radônio pode ocorrer a partir de solos e rochas ricas em urânio e tório, minas subterrâneas e áreas de mineração de urânio, água subterrânea contaminada e materiais de construção que contêm radionuclídeos naturais.

A mobilidade do radônio depende da permeabilidade do meio, em solos arenosos, de alta permeabilidade, o radônio difunde-se rapidamente. Em solos argilosos e compactados, a mobilidade é reduzida, favorecendo sua acumulação no subsolo. Ou ainda, quando dissolvido na água subterrânea, pode ser transportado até piezômetros e aquíferos, sendo liberado no uso doméstico, representando risco tanto pela inalação quanto pela ingestão.

O radônio pode migrar do solo para a atmosfera, acumulando-se em ambientes internos mal ventilados, onde pode atingir concentrações elevadas e representar riscos para a saúde humana. O deslocamento do radônio no solo ocorre por dois mecanismos principais: difusão molecular e convecção gasosa.

A difusão molecular refere-se ao movimento espontâneo das moléculas de radônio de uma região de maior concentração para uma de menor concentração, seguindo um gradiente de concentração. Esse processo ocorre independentemente de fluxos de ar ou de alterações na

pressão do solo. Já a convecção gasosa envolve o deslocamento do radônio devido a variações de temperatura ou diferencial de pressão no subsolo, impulsionando sua migração para a superfície ou para cavidades subterrâneas.

A eficiência desses mecanismos depende das propriedades físico-químicas do solo, como permeabilidade, porosidade e teor de humidade, bem como de fatores ambientais, incluindo a temperatura e a circulação atmosférica. Esses aspectos influenciam diretamente o potencial de acúmulo do radônio em espaços fechados, tornando fundamental a monitorização e a ventilação adequada desses ambientes para reduzir os riscos associados à exposição prolongada.

A principal via de exposição ao radônio é a inalação de suas partículas radioativas, que se aderem ao material particulado presente no ar. Quando inaladas, essas partículas podem depositar-se nos pulmões, aumentando significativamente o risco de desenvolvimento de doenças respiratórias. O radônio tem a capacidade de se infiltrar em casas, porões e minas subterrâneas, especialmente em ambientes com ventilação reduzida, onde tende a se acumular.

As concentrações de radônio variam sazonalmente, atingindo níveis mais elevados durante o inverno. Isso ocorre porque, em períodos frios, as habitações são mantidas fechadas, reduzindo a ventilação e favorecendo o acúmulo do gás. Portanto, a implementação de sistemas de ventilação adequados é essencial para minimizar a exposição ao radônio.

O rádio é um metal alcalino-terroso radioativo que ocorre naturalmente na crosta terrestre, especialmente em minerais de urânio e tório. A contaminação por rádio pode estar associada a mineração de desses metais, a geração de resíduos industriais e rejeitos nucleares, e a presença de águas subterrâneas contaminadas por minerais radioativos.

A mobilidade do rádio está relacionada ao seu estado químico e à composição do meio. O Ra^{+} (forma iônica solúvel) permite seu transporte em águas subterrâneas, e em solos ricos em argila, carbonatos e óxidos de ferro, o rádio adsorve-se facilmente, reduzindo sua mobilidade. Compreender o processo de adsorção é fundamental para limitar a propagação do rádio, contribuindo para a sua retenção em determinadas frações do solo e dos sedimentos. Em ambientes ricos em íons como cálcio e bário, o rádio pode formar precipitados insolúveis, diminuindo sua biodisponibilidade. A solubilidade do rádio é maior em condições ácidas e em solos com baixa capacidade de troca catiónica, o que pode favorecer sua migração e contaminação de aquíferos.

A mobilidade do rádio na água subterrânea, portanto, depende fortemente da composição química do solo e da água, sendo mais acentuada em condições ácidas e em solos com baixa capacidade de troca catiónica. Essa variabilidade nas condições ambientais influencia a forma como o rádio se dissolve, transporta e se acumula em sedimentos, tornando essencial uma análise detalhada para avaliar os riscos e planejar estratégias de remediação em sítios contaminados.

O céσιο é um metal alcalino altamente reativo, conhecido por sua mobilidade e potencial de contaminação ambiental. O isótopo mais relevante do céσιο no contexto da radioatividade é o céσιο-137 (Cs-137), que possui meia-vida de aproximadamente 30 anos e alta capacidade de dispersão rápida após acidentes nucleares.

A mobilidade do céσιο no ambiente é influenciada por diversos fatores, tais como a composição do solo, em solos ricos em argilas, o céσιο adsorve-se fortemente, reduzindo sua mobilidade e reduzindo a contaminação a longo prazo. Entretanto, em solos com baixa capacidade de troca catiónica ou sob condições ácidas, o céσιο pode tornar-se mais móvel, aumentando o risco de contaminação de aquíferos e organismos vivos.

Os contaminantes radioativos representam desafios significativos para a gestão ambiental e a saúde pública, devido à sua alta persistência, mobilidade e toxicidade. A presença desses elementos no solo e na água subterrânea pode levar a impactos ambientais de longo prazo, demandando monitorização rigorosa e estratégias eficazes de remediação.

A compreensão dos mecanismos de transporte e degradação desses radionuclídeos é essencial para o desenvolvimento de tecnologias de mitigação, que visam reduzir a exposição humana e minimizar os impactos ambientais associados à radioatividade.

AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO

A gestão de sítios contaminados fundamenta-se em uma abordagem estruturada e sequencial, na qual cada fase gera informações essenciais para a etapa subsequente. Esse processo integrado tem início com a identificação e caracterização do dano ambiental, etapa fundamental para determinar a extensão, a natureza e os potenciais riscos associados. A partir dessa caracterização, procede-se a avaliação de risco, que analisa os potenciais impactos para a saúde humana e aos ecossistemas, permitindo a priorização das ações de intervenção.

Posteriormente, os dados obtidos embasam a tomada de decisão sobre as estratégias de remediação mais adequadas, garantindo que o uso futuro do terreno, local ou edificação afetada seja seguro. Dessa forma, a abordagem sequencial e sistemática na gestão de sítios contaminados possibilita não apenas a mitigação dos impactos ambientais, mas também a recuperação e a reabilitação do sítio, assegurando a proteção da saúde pública e a sustentabilidade dos ecossistemas.

Dado o caráter complexo e multidimensional da contaminação ambiental, a adoção de metodologias rigorosas é imperativa para garantir uma caracterização precisa e confiável. Essas metodologias são fundamentais para a produção de provas periciais robustas, que subsidiem decisões técnicas e jurídicas, permitindo a implementação de medidas de remediação eficazes e juridicamente defensáveis.

Como argumentado por Meadows *et al.* (1972), o grande desafio da humanidade reside no fato de que, embora a humanidade seja capaz de reconhecer a existência de problemas ambientais, nosso conhecimento e habilidades, por mais consideráveis que sejam, não alcançam a compreensão plena das origens, dos significados e das complexas interconexões entre os diversos fatores que compõem esses problemas. Essa limitação frequentemente resulta na dificuldade de desenvolver soluções eficazes para a mitigação dos danos ambientais, destacando a necessidade de abordagens interdisciplinares que integrem conhecimento técnico-científico, normativo e jurídico.

Em síntese, a complexidade do ambiente e das suas inter-relações impõe desafios significativos à análise e à intervenção em sítios contaminados, tornando essencial uma abordagem multidisciplinar que integre conhecimentos técnicos, científicos e jurídicos. A convergência dessas áreas possibilita não apenas a identificação e quantificação dos impactos ambientais, mas também o desenvolvimento de estratégias de remediação que sejam, simultaneamente, eficazes do ponto de vista técnico, viáveis economicamente e sustentáveis juridicamente. Essa abordagem holística garante que as decisões sejam embasadas em dados científicos sólidos, promovendo a recuperação ambiental e a proteção da saúde pública com base em princípios de responsabilidade e gestão integrada dos riscos ambientais.

Nesse contexto, a investigação pericial em sítios contaminados segue uma abordagem faseada, evoluindo da recolha de informações preliminares para a aplicação de metodologias de investigação avançadas. O processo inicia-se com técnicas menos sofisticadas, porém fundamentais para estabelecer o contexto do problema, como observação *in loco*, pesquisa documental e análise de registos históricos sobre o uso e ocupação do solo. Essa fase inicial permite a identificação de indícios de contaminação e possíveis fontes contaminantes, fornecendo um suporte essencial para a definição das etapas subsequentes.

À medida que a investigação avança, são adotadas técnicas mais complexas e analíticas, que possibilitam a delimitação precisa da contaminação. Essa fase envolve estudos hidrogeológicos, análises laboratoriais e modelagem ambiental, permitindo a identificação das fontes exatas da contaminação, a determinação da natureza química dos contaminantes e a caracterização das vias de migração dos contaminantes e a avaliação dos recetores afetados.

É importante ressaltar que a investigação ambiental não se concentra no ato da contaminação em si, mas na identificação dos danos já consumados. Isso ocorre porque os efeitos da contaminação podem manifestar-se tardiamente, tornando fundamental responder a questões-chave, tais como:

- Qual a extensão da contaminação?
- Quais os recetores potencialmente afetados?
- Qual o nível de exposição desses recetores?
- Quais substâncias químicas estão envolvidas?
- Quais as ações necessárias para a mitigação do risco e remediação do local?

Para responder a essas questões, a investigação demanda um processo exaustivo e detalhado, que envolve a recolha e análise de informações históricas e atuais sobre o local. Essa etapa inicial é fundamental para a construção de um diagnóstico ambiental preciso, uma vez

que os dados necessários raramente estão disponíveis de forma imediata. Apenas por meio da integração de diferentes fontes de informação e da aplicação de metodologias rigorosas, é possível estabelecer bases sólidas para a definição das estratégias de investigação.

A Figura 5.1 ilustra as principais etapas da gestão de sítios contaminados, destacando o fluxo contínuo de informações desde a identificação inicial da contaminação até o monitoramento pós-remediação. Essa abordagem garante que a tomada de decisão seja fundamentada em dados científicos, maximizando a eficiência das ações de recuperação ambiental.

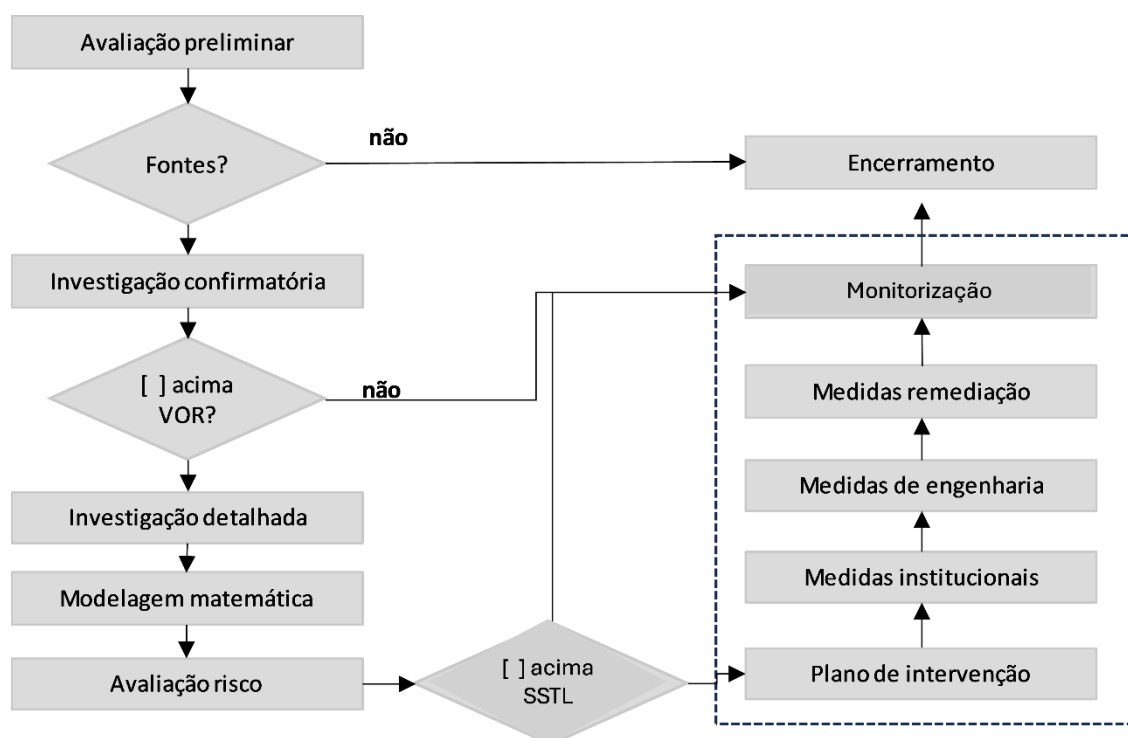


Figura 5.1: Fluxograma das etapas de gestão de sítios contaminados

Fonte: IPT (2014)

VOR: valores orientadores de referência; SSTL: *site specific target levels*

A abordagem estruturada para a gestão de sítios contaminados segue um processo sequencial, no qual cada fase gera informações essenciais para a etapa subsequente, garantindo uma avaliação criteriosa e a adoção das melhores práticas de investigação. Esse fluxo de trabalho pode ser dividido em quatro grandes fases, detalhadas a seguir:

A primeira etapa consiste na recolha e análise de informações históricas e atuais sobre o local e suas atividades. Esse levantamento preliminar fornece uma visão geral do contexto

ambiental, permitindo a identificação de possíveis fontes de contaminação, a definição de contaminantes de interesse e a caracterização dos potenciais riscos associados.

Após a fase inicial, a investigação exploratória tem como objetivo validar e consolidar os indícios de contaminação por meio de técnicas analíticas, como amostragem de solo, água subterrânea e ar do solo. Com base nesses resultados, decide-se pela continuidade da investigação em uma abordagem mais aprofundada.

A investigação detalhada visa identificar de forma precisa os contaminantes presentes, suas fontes, as vias de transporte e os recetores impactados. Para isso, são utilizadas metodologias avançadas, incluindo modelagem hidrogeológica e geoquímica. Essa fase fornece uma avaliação robusta e quantitativa do dano ambiental fundamentando as ações futuras.

Com os dados da investigação detalhada, realiza-se uma avaliação de risco ecológica e para a saúde humana, na qual se quantificam os níveis de exposição e os potenciais impactos dos contaminantes identificados. Essa avaliação subsidia a seleção da estratégia de remediação mais adequada, considerando critérios técnicos, econômicos e ambientais.

A última fase consiste na implementação e operação de medidas de remediação selecionadas, acompanhadas por uma monitorização contínua, que verifica a eficácia das ações implementadas. O objetivo é garantir que os níveis de contaminação sejam reduzidos a concentrações seguras, assegurando o uso seguro do solo e da água subterrânea no longo prazo.

Em conjunto, essas etapas – identificação, avaliação preliminar, investigação exploratória, investigação detalhada, avaliação de risco, remediação e monitorização pós-intervenção – formam um processo integrado e sistemático para a gestão de sítios contaminados, onde cada fase fornece a base para a execução da etapa subsequente.

Compreender as atividades potencialmente poluidoras e seu impacto ambiental torna-se essencial para a prevenção e mitigação dos riscos, permitindo o desenvolvimento de políticas ambientais mais eficazes e sustentáveis.

5.1 Atividade potencialmente poluidora

A classificação de uma atividade como potencialmente poluidora não depende apenas da natureza das substâncias utilizadas, mas também do contexto operacional e das condições de manuseio e descarte. O potencial de contaminação está diretamente ligado a fatores como

persistência ambiental dos contaminantes, solubilidade, mobilidade, toxicidade e volume de produção ou uso das substâncias.

As atividades que apresentam risco elevado de contaminação ambiental abrangem um espectro diversificado de setores industriais e comerciais. Entre as principais fontes de poluição, destacam-se: a indústria química, petroquímica, mineração, agricultura e até mesmo operações em áreas urbanas, como posto de abastecimento e depósitos de resíduos. Essas operações podem resultar na contaminação do solo, da água ou do ar.

São consideradas atividade potencialmente geradora de sítio contaminado as seguintes atividades:

- extração de carvão mineral;
- extração de petróleo e gás natural;
- extração de minerais metálicos;
- atividades de apoio à extração de petróleo e gás natural;
- fabricação e refino de açúcar;
- preparação e fiação de fibras têxteis;
- estamparia e texturização em fios, tecidos e peças do vestuário;
- preparações de couro;
- tratamento de madeira;
- fabricação de celulose e papel;
- atividade de impressão;
- fabricação de coque, produtos derivados do petróleo e de biocombustíveis;
- fabricação de produtos químicos;
- fabricação de produtos farmacêuticos;
- fabricação de pneumáticos e de câmaras de ar;
- fabricação de vidro e de produtos do vidro;
- fabricação de cimento;
- fabricação de produtos cerâmicos;
- metalurgia;
- fabricação de produtos de metal;
- fabricação de equipamentos de informática;
- fabricação de máquinas, aparelhos e materiais elétricos;
- fabricação de máquinas e equipamentos;
- fabricação de veículos automotores, reboques e carrocerias;
- fabricação de outros equipamentos de transporte;

- fabricação de móveis com predominância de metal;
- fabricação de bijuterias e artefactos semelhantes;
- manutenção e reparação de máquinas e equipamentos eletricidade e gás;
- tratamento e purificação de água para fins de abastecimento;
- recolha, tratamento e disposição de resíduos; recuperação de materiais;
- descontaminação e outros serviços de gestão de resíduos;
- manutenção mecânica e elétrica de caminhões, autocarro e viatura;
- comércio de combustíveis;
- transporte ferroviário;
- transporte rodoviário de passageiros e carga;
- serviços de lavagem a seco e serviço de lavanderia;
- serviços de sepultamento.

Em resumo, identificar atividades potencialmente geradoras de sítios contaminados é fundamental para a gestão ambiental e para prevenir impactes negativos no solo, na água e no ar. Frequentemente associadas ao uso de substâncias químicas perigosas, a manejos inadequados e disposição inadequada de resíduos, representam riscos significativos para a qualidade ambiental e para a saúde humana.

5.2 Avaliação preliminar

A avaliação preliminar é uma etapa fundamental no processo de identificação e caracterização de sítios contaminados, pois fornece as bases para uma compreensão inicial do contexto ambiental e das potenciais fontes de contaminação. Seu principal objetivo é identificar indícios de contaminação. Essa etapa permite a recolha de informações essenciais, como dados históricos, uso do solo e registos de atividades industriais passadas e presentes, além da realização de inspeções no local. Dessa forma, é possível delimitar as áreas de interesse que necessitam de investigações mais aprofundadas.

Durante a avaliação preliminar, são utilizadas técnicas acessíveis e de baixo custo, como inspeções visuais, entrevistas com colaboradores e análise documental. Essas abordagens permitem identificar indícios preliminares de contaminação, incluindo alterações na vegetação, presença de odores incomuns, manchas no solo e evidências de derramamentos ou vazamentos de substâncias químicas. Essa fase fornece um panorama inicial dos potenciais impactes ambientais, permitindo a delimitação de áreas com potencial de contaminação para investigações subsequentes.

A inspeção visual e a documentação fotográfica são fundamentais para subsidiar relatórios periciais e comprovar condições ambientais do local. Esses registros possibilitam a rastreabilidade das informações e servem como elementos probatórios em eventuais disputas jurídicas e tomadas de decisão administrativas. Dessa forma, a avaliação preliminar funciona como uma ferramenta estratégica para a otimização de recursos e o planejamento da investigação exploratória, garantindo que sítios com maior probabilidade de contaminação sejam investigadas com mais profundidade nas fases subsequentes.

Para garantir a padronização e a confiabilidade dos dados obtidos, diversas normas internacionais orientam essa fase, como ASTM E1527-21: *Standard practice for environmental site assessments: Phase I environmental site assessment process* (ASTM, 2021) e ABNT-NBR 15.515-1:2021: Passivo ambiental em solo e água subterrânea - Parte 1: avaliação preliminar (ABNT, 2021). Esses documentos estabelecem critérios e metodologias para identificar indícios de contaminação por meio da análise de registros históricos, inspeções visuais e entrevistas com colaboradores e partes interessadas.

A recolha de informações deve contemplar aspectos técnicos, operacionais e ambientais, tais como:

- Alterações no uso do solo – Obtenção de fotografias aéreas para identificar mudanças na ocupação da sítio e sua envolvente (500 m);
- Abastecimento de água subterrânea – Identificação de aquíferos e usos na área envolvente;
- Posicionamento de recetores sensíveis - a comunidade e trabalhadores;
- Histórico operacional e produtivo – Matérias-primas, processos industriais, áreas de armazenamento e disposição de resíduos, incluindo processos desativados e alteração de *lay-out*;
- Resíduos e efluentes gerados – Composição, armazenamento, disposição final e controlo analítico;
- Componentes elétricos e materiais perigosos – Identificação de PCBs e asbestos;
- Qualidade das águas subterrâneas – Dados analíticos prévios;
- Agência ambiental - Histórico de licenças, coimas e exigências regulatórias;
- Registos de acidentes ambientais – Ocorrências documentadas de derrames, incêndios, explosões e inundações;
- Histórico de sucessão e propriedade – Mudanças de titularidade que possam influenciar a responsabilidade.

A avaliação preliminar é a primeira etapa estruturada no processo de investigação de sítios contaminados, permitindo identificar indícios de fontes potenciais de contaminação. Sua abordagem sistemática, baseada em dados históricos, inspeções e normativas internacionais, garante transparência e segurança técnica, assegurando a proteção do meio ambiente e da saúde pública.

5.2.1 Modelo conceptual da contaminação

O modelo conceptual da contaminação é uma representação estruturada e integrada de informações sobre um sítio contaminado, permitindo compreender os processos e interações que governam o comportamento das substâncias químicas no ambiente. Ele desempenha um papel fundamental na identificação das fontes primárias e secundárias de contaminação, nos compartimentos ambientais afetados ou potencialmente afetados, nos mecanismos de transporte das substâncias e nas vias de exposição que representam riscos para a saúde humana e o meio ambiente. Dessa forma, o modelo conceptual guia decisões e estratégias ao longo de todas as etapas da gestão de sítios contaminados, desde a avaliação preliminar até a remediação.

A construção do modelo conceptual é um processo iterativo, devendo ser constantemente atualizado à medida que novas informações são obtidas ao longo da investigação. Ele pode ser apresentado em formato textual, gráfico ou tridimensional, incluindo dados sobre a geologia local, a hidrologia, os padrões de uso e ocupação do solo, as características das fontes de contaminação e das substâncias químicas, bem como os fatores ambientais que influenciam o transporte e a transformação dessas substâncias. Um modelo conceptual bem elaborado reduz incertezas, otimiza recursos, direciona investigações e orienta a escolha das soluções de remediação mais adequadas para cada caso.

O desenvolvimento do modelo conceptual inicia-se na etapa de avaliação preliminar, estabelecendo uma compreensão inicial do sítio investigado e serve de base para as atividades de investigação. Esse processo dinâmico permite o refinamento progressivo do modelo, reduzindo incertezas e aprimorando a gestão dos riscos ambientais.

A elaboração do modelo conceptual deve seguir diretrizes específicas, como as estabelecidas na ASTM E1689-20: *Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites*, ASTM, 2020 e na ABNT-NBR 16210:2022: *Modelo Conceptual no Gerenciamento de Áreas Contaminadas – Procedimento*, ABNT, 2022. Essas normas fornecem orientações técnicas para a construção de modelos conceptuais baseados em dados confiáveis, garantindo a eficiência das próximas etapas da gestão de sítios contaminados.

A estruturação do modelo conceptual envolve as seguintes etapas:

- i. identificação e localização das fontes primárias e secundárias de contaminação;
- ii. determinação das substâncias químicas de interesse associadas a casa fonte;
- iii. definição dos mecanismos primários e secundários de libertação dos contaminantes;
- iv. identificação das vias de transporte dos contaminantes (e.g., contato direto com o solo, inalação de vapores, consumo de água contaminada);
- v. vias de exposição (e.g., contato direto com o solo, inalação de vapores, consumo de água contaminada);
- vi. identificação dos recetores potencialmente afetados (populações humanas, fauna, flora, recursos hídricos, ecossistemas).

As informações compiladas no modelo conceptual são fundamentais para a definição do plano de investigação exploratória, orientando a seleção dos compartimentos ambientais a serem investigados (solo, água subterrânea, ar) e a localização e profundidade dos pontos de amostragem. Além disso, permite determinar as substâncias químicas de interesse na investigação, otimizando a obtenção de dados e reduzindo incertezas.

Após a elaboração do modelo conceptual, caso haja indícios ou evidências de contaminação, ou se persistirem incertezas quanto à existência e localização das fontes contaminantes, torna-se imprescindível realizar a etapa de investigação exploratória. Essa investigação permitirá validar as hipóteses formuladas no modelo conceptual, ajustando sua estrutura e aprimorando a gestão do sítio contaminado. Dessa forma, o modelo conceptual não é um elemento estático, mas uma ferramenta evolutiva, que guia as decisões de forma mais eficiente e assertiva.

5.2.2 Plano de investigação exploratória

O plano de investigação exploratória deve descrever detalhadamente os métodos e procedimentos que serão utilizados para validar ou refutar a presença de substâncias de origem antropogénica nas fontes potenciais identificadas. Essa descrição inclui a definição dos métodos de investigação aplicados aos diferentes compartimentos ambientais—como solo, água e ar—assegurando que as técnicas selecionadas sejam apropriadas para caracterizar as amostras conforme suas particularidades. Além disso, o plano deve especificar os procedimentos

analíticos a serem utilizados, que serão comparados com os valores de referência estabelecidos pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA).

O plano de recolha de amostras deve ser meticulosamente elaborado, detalhando o número de amostras a serem recolhidas, sua localização em planta e em profundidade, e as substâncias químicas de interesse, juntamente com os respetivos valores de intervenção a serem aplicados. Essa parte do plano é essencial para garantir que a recolha de dados seja representativa e forneça informações robustas para a investigação, permitindo a identificação precisa da contaminação e a caracterização tridimensional dos níveis de contaminação.

O plano de investigação exploratória deve fornecer uma descrição detalhada dos seguintes aspetos:

- As fontes de contaminação identificadas e as áreas envolventes potencialmente afetadas;
- As substâncias químicas de interesse a serem analisadas, juntamente com seus valores de intervenção estabelecidos;
- Os volumes representativos a serem recolhidos e os designs amostrais que garantem a obtenção de resultados confiáveis;
- A distribuição espacial dos pontos de amostragem, considerando as áreas mais suscetíveis à contaminação.

A investigação direta é recomendada quando o modelo conceptual não apresenta incerteza. Isso significa que há evidências sólidas sobre a existência, localização e características das fontes de contaminação. Dessa forma, a investigação pode ser direcionada com maior precisão, permitindo que os resultados reflitam a realidade do local e forneçam a base necessária para a tomada de decisões.

Quando existirem incertezas sobre a localização ou o comportamento dos contaminantes, devem ser utilizados métodos de investigação indireta. Esses métodos incluem o uso de técnicas como resistividade elétrica, radar de penetração no solo e amostragem passiva de vapor. Essas abordagens auxiliam na redução das incertezas, fornecendo informações adicionais que podem ser essenciais para avaliar a extensão e a natureza da contaminação.

Em casos de fontes de contaminação difusas, fontes com características lineares (como tubagens subterrâneas), fontes secundárias ou situações em que há incertezas quanto à localização exata da contaminação, a investigação indireta apresenta-se como a abordagem mais

adequada. Esse método permite uma distribuição mais abrangente dos pontos de amostragem, reduzindo a possibilidade de omissão de áreas impactadas e aumentando a precisão na identificação de fontes de contaminação. Nessas circunstâncias, os resultados obtidos por meio da investigação indireta fornecem subsídios para confirmar a presença de contaminação e direcionar estratégias complementares, como a investigação exploratória por meio da recolha direta de amostras de solo e água subterrânea, garantindo uma caracterização mais robusta e detalhada do cenário ambiental.

A definição da distribuição espacial dos pontos de amostragem deve ser baseada nas propriedades físico-químicas das substâncias químicas de interesse e no comportamento nos diferentes compartimentos ambientais. Para isso, é fundamental avaliar fatores como mobilidade, afinidade com a matriz do solo ou com a água subterrânea, tendência à bioacumulação e demais características que possam influenciar a dispersão e a persistência dos contaminantes no meio. A definição deve ser planejada de forma a maximizar a representatividade das amostras e garantir a cobertura adequada de áreas suspeitas, onde a contaminação é mais provável ou onde a mobilidade dos contaminantes é maior.

Para o estabelecimento de estratégias de investigação e a definição da localização dos pontos de amostragem, torna-se essencial classificar os contaminantes de acordo com suas propriedades nas diferentes fases. Essa classificação possibilita a otimização da recolha de amostras, assegurando que os métodos empregados sejam adequados à natureza e ao comportamento dos contaminantes no meio. Determinados contaminantes tendem a permanecer predominantemente na fase retida, interagindo fortemente com os componentes do solo, como partículas orgânicas, argilosas e minerais. Esse comportamento resulta na formação da fase adsorvida ou sorvida. Exemplos incluem metais pesados (na forma iônica ou sólida) e compostos orgânicos com baixa solubilidade e volatilidade, como os bifenilos policlorados (PCBs).

Em contrapartida, algumas substâncias apresentam elevada solubilidade e baixa volatilidade, dissolvendo-se na água presente nos poros do meio subterrâneo e formando a fase dissolvida. Além disso, há contaminantes que possuem características físico-químicas que lhes permitem coexistir em múltiplas fases — retida, livre, dissolvida e vapor — como ocorre com o tetracloroetano, tricloroetano, benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos. Por fim, alguns contaminantes ocorrem predominantemente na fase gasosa, exigindo métodos específicos de recolha e análise voltados para sua identificação e quantificação no ar. Essa distinção entre as fases é essencial para a definição dos pontos de amostragem, uma vez que cada classe de substância exige técnicas específicas de detecção e monitorização.

Além das características das fontes de contaminação e das propriedades químicas dos contaminantes, as características dos compartimentos ambientais exercem um papel determinante na distribuição espacial dos pontos de amostragem. Entre os fatores mais relevantes a serem considerados estão a composição e a espessura das camadas do solo, bem como sua capacidade de retenção ou transmissão de contaminantes. Propriedades como textura, granulometria, porosidade e permeabilidade do meio controlam diretamente a mobilidade dos contaminantes e sua interação com os fluidos subterrâneos.

Adicionalmente, a análise do fluxo da água subterrânea, considerando sua direção, intensidade e possíveis conexões com corpos d'água superficiais, é fundamental para a definição estratégica dos pontos de amostragem. A integração desses fatores permite uma avaliação mais precisa da contaminação e de suas dinâmicas ambientais, orientando a escolha dos métodos mais adequados para caracterização do meio impactado.

5.3 Investigação exploratória

A investigação exploratória constitui uma etapa fundamental no processo de gestão de sítios contaminados, especialmente quando há indícios ou evidências de contaminação ou quando o modelo conceptual desenvolvido apresenta incertezas quanto à localização e extensão das fontes de contaminação. O principal objetivo dessa fase é confirmar ou refutar a presença de substâncias contaminantes de origem antropogénica nos compartimentos ambientais identificados como potenciais fontes de contaminação. Além disso, busca-se verificar se as concentrações dessas substâncias ultrapassam os valores de referência estabelecidos pelas autoridades ambientais, como a Agência Portuguesa do Ambiente (APA).

Essa investigação envolve a recolha de amostras representativas de diferentes compartimentos ambientais, como solos, águas subterrâneas e ar, de acordo com as fontes potenciais indicadas no modelo conceptual. A análise dos resultados não apenas confirma a presença de substâncias contaminantes, mas também determina se suas concentrações excedem os limites estabelecidos, orientando as próximas etapas da gestão dos sítios contaminados.

A investigação exploratória é uma fase crítica, pois fornece os dados necessários para fundamentar decisões sobre a continuidade das investigações. As amostras são recolhidas em pontos estratégicos definidos no modelo conceptual, e os resultados são analisados para determinar a necessidade de intervenções adicionais. Com base nesses resultados, determina-se a progressão para uma investigação detalhada ou apenas pela monitorização durante dois ciclos hidrogeológicos.

É importante ressaltar que a ausência de substâncias em concentrações superiores aos valores de referência não implica, necessariamente, que essas substâncias não estejam presentes em outras fases, como na fase retida na zona não saturada ou mesmo na zona saturada. Muitas vezes, os contaminantes permanecem adsorvidos às partículas do solo, à matéria orgânica ou às rochas, formando uma fase retida que pode não ser detectada por análises convencionais. Essa forma de retenção, geralmente estável e de baixa mobilidade, requer métodos específicos para sua identificação.

Adicionalmente, a presença de substâncias na fase retida pode representar uma fonte potencial para a liberação gradual de contaminantes para a água subterrânea, especialmente em cenários onde ocorrem alterações nas condições químicas, físicas ou biológicas do meio. Por essa razão, a investigação deve adotar uma abordagem abrangente, considerando todas as fases possíveis das substâncias químicas para garantir uma avaliação completa do comportamento dos contaminantes no meio físico.

A condução da investigação exploratória deve estar alinhada com diretrizes e normas internacionais reconhecidas, a fim de assegurar a consistência, a qualidade e a confiabilidade do processo. Essas referências orientam a metodologia utilizada, garantindo que as etapas de recolha, análise e interpretação dos dados sejam conduzidas de acordo com padrões técnicos. Duas normas amplamente utilizadas nesse contexto são a ASTM E1903-19: *Standard Practice for Environmental Site Assessments: Phase II Environmental Site Assessment Process* (ASTM, 2019) e a ABNT-NBR 15.515-2:2023: *Passivo Ambiental em Solo e Água Subterrânea - Parte 2: Investigação Confirmatória* (ABNT, 2023).

Portanto, a integração de técnicas de investigação direta e indireta, aliada a um modelo conceptual robusto, é essencial para reduzir as incertezas associadas à localização e às características das fontes de contaminação. Essa abordagem permite uma análise mais detalhada da distribuição dos contaminantes nos diferentes compartimentos ambientais, fornecendo uma base técnica sólida para a definição das estratégias subsequentes.

5.4 Técnicas de investigação

A investigação de contaminação ambiental envolve o uso de diferentes métodos diretos e indiretos para detetar e caracterizar a presença de substâncias químicas no solo, nas águas subterrâneas, e em outros compartimentos ambientais. A escolha das técnicas de investigação

depende das características específicas do local, do tipo de contaminante, e dos objetivos da investigação.

As técnicas de investigação direta consistem na recolha de amostras dos compartimentos ambientais para determinar a presença, a concentração e a distribuição dos contaminantes. Dentre essas técnicas, a sondagem é amplamente utilizada para a caracterização de solos e aquíferos, permitindo a obtenção de amostras representativas das diferentes unidades hidroestratigráficas. A sondagem pode ser realizada de diversas formas, incluindo sondagens mecanizada, sónica e manual, dependendo das características do terreno e da profundidade desejada. Além da recolha de amostras de solo, a sondagem permite a instalação de piezômetros, fundamentais para a monitorização de águas subterrâneas. Essa abordagem possibilita a avaliação do fluxo hidrogeológico e da dispersão de contaminantes ao longo do tempo.

A aplicação dessas técnicas deve ser cuidadosamente planeada, considerando fatores como a natureza do contaminante, o compartimento ambiental a ser investigado e os objetivos específicos da avaliação. O uso de equipamentos adequados e protocolos rigorosos garante a representatividade e a qualidade das amostras recolhidas.

As técnicas de investigação indireta são frequentemente utilizadas quando há incertezas, dificuldades de acesso direto às áreas impactadas ou quando se busca uma caracterização mais abrangente sem a necessidade de perfuração ou amostragem direta. Um dos métodos mais relevantes nesse contexto é a amostragem passiva de vapor, que consiste na recolha de vapores presentes na zona não saturada do solo, permitindo a deteção de compostos orgânicos voláteis (COVs). Esse método apresenta diversas vantagens, tais como:

- Redução de custos: possibilita o aumento da densidade de informações sobre a qualidade ambiental com menor custo operacional;
- Identificação de fontes secundárias de contaminação: deteta vapores de contaminantes que podem não ser evidentes por meio da análise direta de solo e água subterrânea;
- Mapeamento de plumas de vapor: auxilia na definição da extensão e profundidade da pluma, além de identificar rotas preferenciais de migração dos contaminantes.

As fontes secundárias de contaminação correspondem a compartimentos ambientais que foram impactados por substâncias químicas provenientes de uma fonte primária. Essas fontes secundárias atuam como reservatórios temporários, libertando contaminantes para o meio ambiente ao longo do tempo. A transferência de massa dessas substâncias pode ocorrer

de diferentes formas, para a água subterrânea a transferência é determinada pela solubilidade do composto e pelo volume de água em contato com a massa retida nos poros do solo, e para a fase gasosa, pela pressão de vapor da substância e pela quantidade de ar presente no meio, o que regula a volatilização e a dispersão dos contaminantes.

Importa referir que, a intrusão de vapores constitui a principal via potencial de exposição humana a contaminantes orgânicos voláteis. Esse processo ocorre quando vapores migrantes provenientes de solos contaminados ou da água subterrânea migram para espaços fechados, como habitações e edificações comerciais, representando um risco significativo para a saúde humana.

A adoção de diretrizes internacionais é essencial para assegurar a padronização dos processos de investigação e garantir a qualidade dos dados obtidos. No contexto da avaliação de intrusão de vapores, destaca-se a norma ASTM D7663-2018: *Standard Practice for Active Soil Gas Sampling in the Vadose Zone for Vapor Intrusion Evaluations* (ASTM, 2018) estabelece as diretrizes para o mapeamento das plumas de vapores e definição dos cenários de intrusão de vapores.

A Figura 5.4.1 ilustra um modelo conceptual de intrusão de vapor, demonstrando como os contaminantes voláteis presentes nos poros da zona não saturada ou dissolvidos na água subterrânea podem migrar na forma de vapor, comprometendo a qualidade do ar interior de edifícios situados sobre sítios contaminados. Conforme destacado por Amaral *et al.* (2020), essa via de exposição é particularmente preocupante, pois os contaminantes podem ser inalados e absorvidos pelo organismo, resultando em potenciais efeitos adversos à saúde.

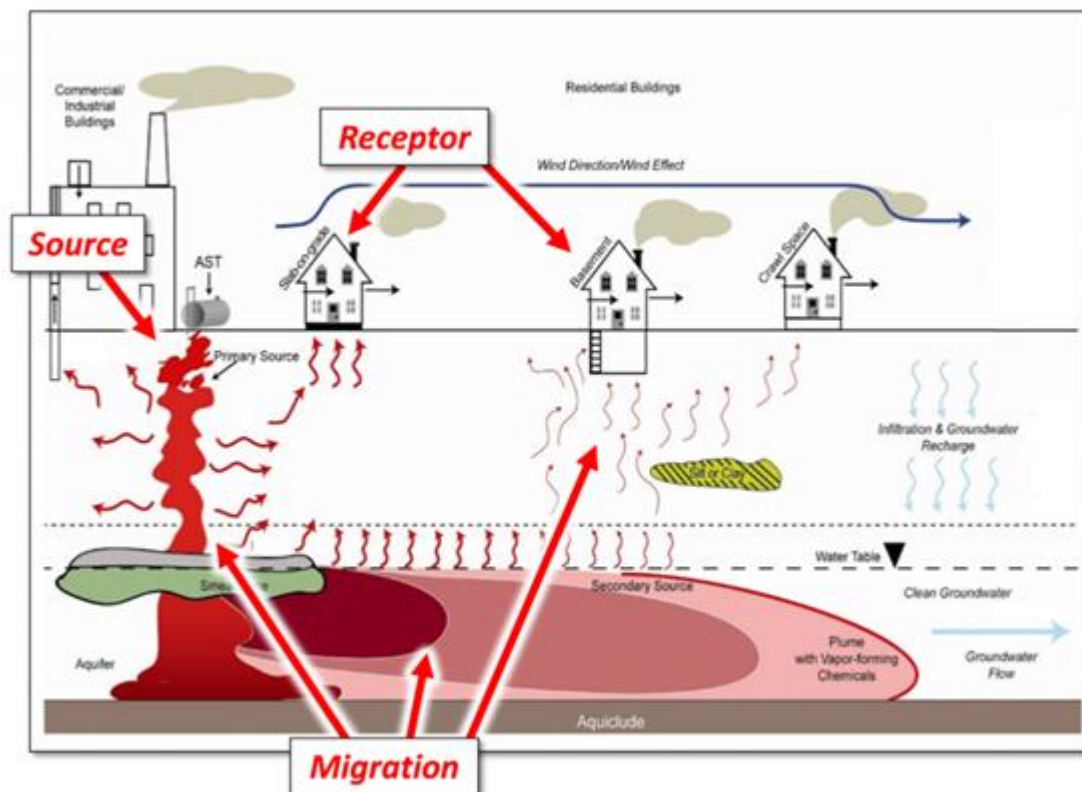


Figura 5.4.1 – Elementos-chave do modelo conceitual de intrusão de vapor.

Fonte: USEPA, 2015.

A importância desse modelo conceitual reside na sua capacidade de demonstrar como os contaminantes podem se mobilizar em ambientes onde o solo não está completamente saturado, ampliando o escopo de situações que exigem medidas de mitigação. Esse modelo permite a identificação de cenários em que vapores contaminantes podem migrar para estruturas construídas, representando riscos à saúde humana, mesmo em áreas onde a contaminação da água subterrânea e do solo parece controlada.

A investigação da intrusão de vapor pode ser realizada por meio da amostragem passiva, um método que utiliza amostradores compostos por material adsorvente encapsulado numa membrana microporosa hidrofóbica. Essa configuração permite a difusão dos vapores presentes no meio investigado, enquanto impede a entrada de partículas de solo e umidade, garantindo a integridade da amostra recolhida. A Figura 5.4.2. exemplifica essa metodologia, destacando a concepção do sistema de amostragem e sua eficácia na captura de contaminantes na fase gasosa.

A utilização de amostradores passivos apresenta diversas vantagens em relação aos métodos tradicionais. Entre elas, destaca-se a ausência de vácuo durante a recolha, o que

minimiza a perturbação do meio e reduz a possibilidade de variações artificiais nas concentrações dos contaminantes. Esse fator garante que os resultados obtidos sejam mais representativos da realidade ambiental, permitindo uma avaliação mais precisa do risco associado à intrusão de vapor.

Outra vantagem significativa da amostragem passiva é a sua capacidade de reduzir a influência de variações pontuais na concentração dos contaminantes. Enquanto a amostragem ativa captura um instante específico da condição ambiental—potencialmente influenciado por flutuações momentâneas—, a amostragem passiva estende-se, em média, por um período de até 10 dias. Esse período prolongado permite uma média temporal mais representativa, proporcionando uma visão mais realista da presença e mobilidade dos contaminantes no meio gasoso.



Figura 5.4.2. – Amostrador passivo

Fonte: Beacon® (<https://beacon-usa.com/>)

A instalação dos amostradores pode dar-se em betão ou em relva, a diferença consiste na utilização de tubo metálico com 30 cm de comprimento para proteção quando a instalação ocorrer na relva. A Figura 5.4.3 apresenta como exemplo, a sequência da instalação na relva.





Figura 5.4.3. Sequência de instalação de amostrador passivo na relva

Fonte: Beacon® (<https://beacon-usa.com/>)

Os amostradores são instalados a uma profundidade entre 10 e 30 cm, conforme exemplificado na Figura 5.4.4. Essa faixa de profundidade é selecionada para garantir que os dispositivos capturem os vapores presentes na zona não saturada, onde a concentração dos contaminantes é mais representativa das condições reais do meio. Ao serem posicionados nessa camada do solo, os amostradores evitam a influência direta de partículas sólidas e de umidade excessiva, assegurando que a difusão dos vapores ocorra de maneira natural e sem perturbações significativas.

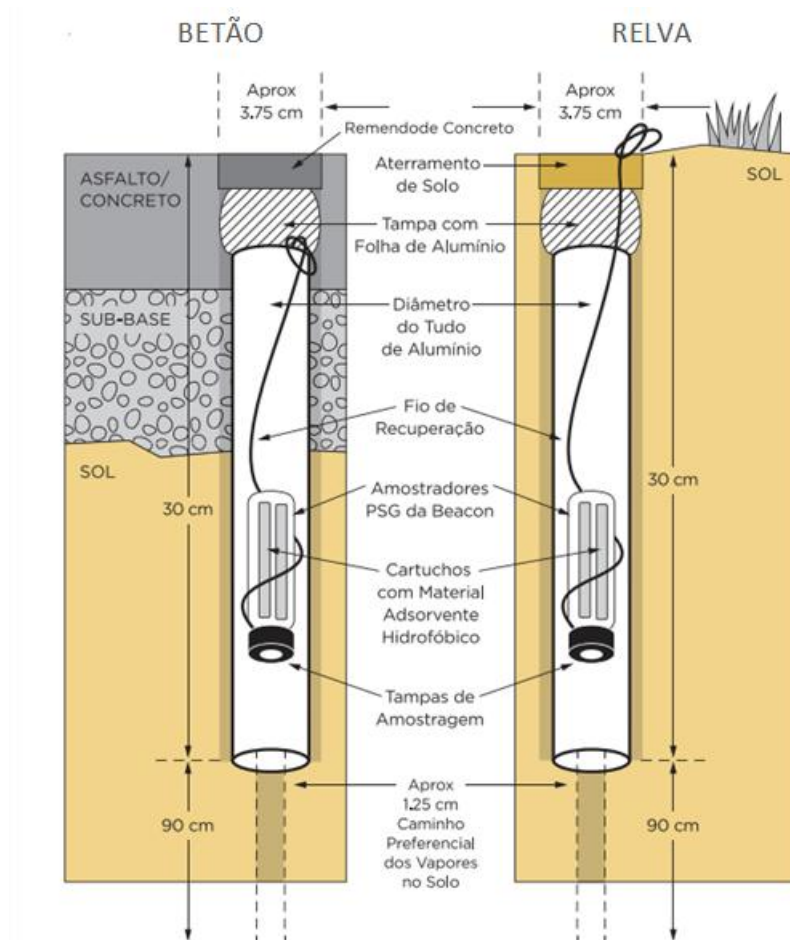


Figura 5.4.4. Esquema da instalação dos amostradores passivos no betão e na relva

Fonte: Beacon® (<https://beacon-usa.com/>)

A partir dos resultados obtidos sobre a distribuição dos vapores presentes no solo, torna-se possível direcionar, de forma mais precisa a investigação dos diferentes compartimentos ambientais, incluindo o solo, os vapores do solo e da água subterrânea. Esse direcionamento é fundamental para a otimização dos recursos investigativos, garantindo que os esforços sejam concentrados nas áreas de maior risco e potencial impacto ambiental.

Os métodos tradicionais de investigação, como a instalação de piezômetros de vapor, desempenham um papel essencial nesse processo, pois permitem a monitorização contínua dos vapores no subsolo, fornecendo dados críticos sobre a migração dos contaminantes e a extensão da pluma de vapores. Essas informações são indispensáveis para avaliar os riscos à saúde humana e subsidiar a definição de medidas de remediação e controle da exposição. Além disso, o uso de sondagens para o reconhecimento das unidades hidroestratigráficas possibilita uma avaliação detalhada da estrutura geológica e da dinâmica dos aquíferos, fatores determinantes para compreender o comportamento dos contaminantes no meio físico. Essa

caracterização geológica é essencial para a identificação de barreiras naturais à migração dos contaminantes, bem como para a definição de estratégias de monitorização e remediação eficazes.

5.4.1 Presença de fase livre

A fase livre refere-se à fração do contaminante presente no solo ou na água subterrânea em sua forma líquida não dissolvida, caracterizando-se pela sua imiscibilidade com a água. Esses contaminantes, conhecidos como NAPLs (*Non-Aqueous Phase Liquids*), podem ser classificados em duas categorias principais: LNAPLs (*Light Non-Aqueous Phase Liquids*) ilustrada na Figura 5.4.1.1, que possuem densidade inferior à da água e, portanto, tendem a flutuar na superfície do lençol freático, e DNAPLs (*Dense Non-Aqueous Phase Liquids*) ilustrado na Figura 5.4.1.2., que possuem densidade superior à da água e, conseqüentemente, migram para camadas mais profundas.

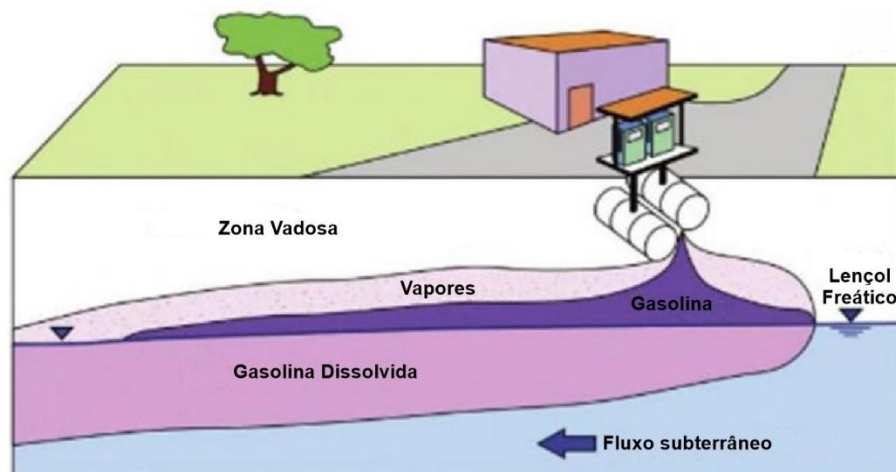


Figura 5.4.1.1: Modelo conceptual LNAPL

Fonte: KRESIC (2012)

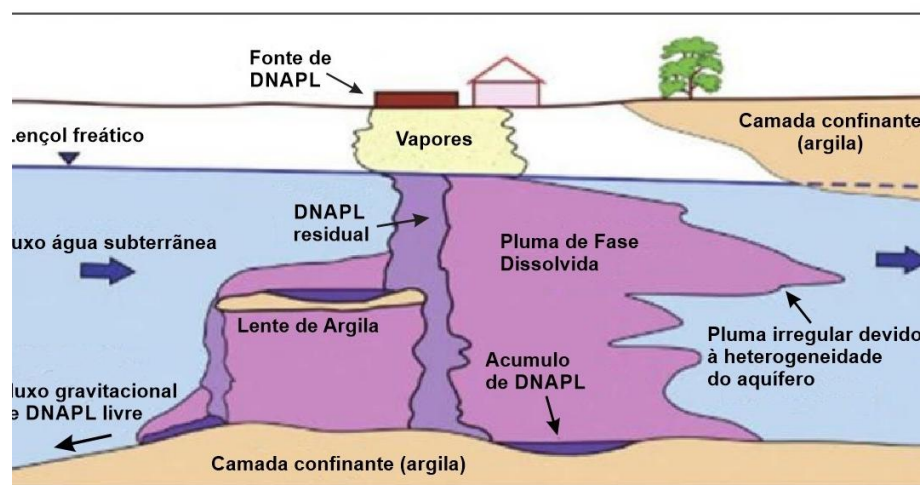


Figura 5.4.1.2.: Modelo conceptual DNAPL

Fonte: KRESIC (2012)

A identificação e caracterização da fase livre são etapas essenciais em investigações ambientais, uma vez que essa fase atua como uma fonte contínua de contaminação, promovendo a transferência de contaminantes para a zona não saturada, zona saturada, e ar do solo. Além disso, plumas de contaminação presentes na fase retida ou dissolvida podem migrar para a fase vapor e, eventualmente, alcançar o ar ambiente, contribuindo para a dispersão dos contaminantes e aumentando os riscos de exposição.

A mobilidade da fase livre no meio físico depende de uma série de fatores, incluindo as propriedades físico-químicas do contaminante, como densidade, viscosidade e tensão superficial, que influenciam sua capacidade de percolação e dispersão no meio; e as características do solo, incluindo porosidade, permeabilidade e heterogeneidade geológica, que determinam o comportamento da contaminação e sua persistência no ambiente.

A presença de NAPLs pode resultar na formação de plumas contaminantes, que se deslocam tanto lateral quanto verticalmente no solo, dependendo das condições locais. No caso dos DNAPLs, a tendência de migração para camadas mais profundas dificulta significativamente a sua remoção e aumenta o potencial de contaminação de longo prazo. Já os LNAPLs, ao se acumularem na interface entre a zona saturada e a zona não saturada, podem representar uma ameaça às águas subterrâneas devido ao seu potencial de dissolução e volatilização, facilitando a transferência dos contaminantes para outras fases ambientais.

A detecção e remediação da fase livre requerem o uso de técnicas especializadas. Métodos diretos, como sondagens e recolha de amostras, são amplamente utilizados para identificar a presença de NAPLs e determinar a sua extensão. Paralelamente, métodos indiretos, como amostragem passiva de vapor e modelagem numérica, auxiliam na estimativa da distribuição e comportamento dessas substâncias no meio físico.

A amostragem passiva de vapor desempenha um papel fundamental na investigação de fontes secundárias de contaminação, permitindo identificar e mapear vapores químicos que migram a partir da subsuperfície. Os dados obtidos por meio da técnica de intrusão de vapor contribuem significativamente para a construção e atualização do modelo conceptual, viabilizando uma definição mais precisa das fontes secundárias, das vias de migração dos contaminantes e das estratégias de remediação a serem implementadas.

5.5 Investigação detalhada

A investigação detalhada tem como objetivo caracterizar o meio físico, determinar as concentrações das substâncias químicas no solo, na água subterrânea e no vapor do solo, definir tridimensionalmente os limites das manchas de contaminação e quantificar as massas das substâncias químicas, considerando as diferentes fases em que se encontram. Além disso, essa etapa visa caracterizar os mecanismos de transporte das substâncias químicas nas distintas unidades hidroestratigráficas e sua evolução ao longo do tempo, bem como os cenários de exposição necessários para a realização da avaliação de risco (ABNT, 2013).

A metodologia utilizada nesta fase é semelhante à utilizada na investigação exploratória, diferenciando-se, no entanto, pelos objetivos. Enquanto a investigação exploratória tem como principal propósito confirmar a presença de contaminação, a investigação detalhada busca quantificar tridimensionalmente a contaminação. Esse processo envolve uma análise minuciosa das características das fontes de contaminação e dos compartimentos ambientais afetados, permitindo determinar a extensão espacial e volumétrica da contaminação, identificar os contaminantes presentes e suas respectivas concentrações, além de avaliar as características, os limites e a taxa de migração das plumas de contaminação (CETESB, 2023).

Nesta etapa, a investigação deve abranger não apenas o local diretamente impactado pela contaminação, mas também a área circundante, em um raio de pelo menos 500 metros. Essa abordagem se justifica pelo fato de que os resultados obtidos subsidiarão a avaliação quantitativa de risco e a concepção de estratégias para mitigação dos impactos ambientais. Quando houver populações potencialmente expostas, direta ou indiretamente, deve-se considerar a adoção imediata de medidas para mitigar os riscos, garantindo a segurança mínima do local até que as ações de remediação sejam implementadas. Nessas circunstâncias, não se justifica a inércia ou o adiamento de ações corretivas com base na mera suposição de que o risco será, eventualmente, aceitável (CETESB, 2001).

Em síntese, a investigação detalhada deve contemplar quantas etapas forem necessárias para delimitar tridimensionalmente as plumas de contaminação em suas fases dissolvida, retida e gasosa, além de quantificar a massa de contaminantes presentes no solo, na água subterrânea e no ar do solo. Com a delimitação concluída, é essencial desenvolver um modelo de fluxo e transporte dos contaminantes, possibilitando a simulação da evolução da contaminação ao longo do tempo e no espaço. Essa abordagem integrada permite compreender os mecanismos responsáveis pela migração dos contaminantes, orientar a investigação e delimitar as áreas de maior criticidade, bem como prever impactos futuros.

Para alcançar esses objetivos, a modelagem matemática torna-se uma ferramenta indispensável. Sua aplicação é essencial para interpretar os fenômenos de fluxo e transporte dos contaminantes nos aquíferos, fornecendo o embasamento técnico necessário para a seleção das alternativas de remediação mais eficazes. Dessa forma, a modelagem não apenas contribui para prever a evolução da contaminação, mas também subsidia a tomada de decisões estratégicas voltadas à proteção ambiental e à preservação da saúde pública.

Como discutido anteriormente, é essencial que o mapeamento espacial da contaminação abarque não apenas a fase gasosa, mas também quatro outros componentes fundamentais:

- i. Fase livre, correspondente ao produto puro móvel presente tanto na zona saturada quanto na não saturada,
- ii. Fase vapor – correspondente aos contaminantes voláteis presentes nos poros do solo na zona não saturada, podendo migrar para estruturas edificadas e impactar a qualidade do ar interno (*vapor intrusion*).
- iii. Fase dissolvida, em que a substância se encontra solubilizada na água subterrânea, e
- iv. Fase retida, referente à fração do contaminante imobilizada na matriz sólida do solo em ambas as zonas.

Os NAPLs podem ocorrer no ambiente tanto na forma de fase livre quanto na forma residual, diferenciando-se essencialmente pela mobilidade. Na fase livre, o NAPL é móvel e pode migrar pelo solo quando o volume do contaminante em relação ao volume de poros permite a continuidade da substância dentro da matriz porosa. Já na fase residual, o NAPL encontra-se imobilizado devido à ação das forças capilares, sem continuidade suficiente para permitir sua movimentação significativa (CETESB, 2023). Embora ambas as fases se localizem no centro de massa da contaminação, a delimitação da pluma varia de acordo com a densidade do contaminante, exigindo abordagens específicas no planejamento da investigação.

Para orientar as investigações nesta etapa, é essencial caracterizar a heterogeneidade dos depósitos com base em parâmetros como textura, estrutura e geometria tridimensional, definindo as diferentes litologias e os mecanismos de transporte predominantes em cada zona. Conforme destacado por Fetter (2018), em estudos de contaminação, a granulometria é um dos principais fatores na definição das litologias, devido à sua forte correlação com a permeabilidade. Dessa forma, as unidades hidroestratigráficas devem ser classificadas de acordo com o mecanismo dominante de transporte de fluidos, distinguindo-se entre zonas de fluxo (ou transmissivas) e zonas de armazenamento (ou de baixa permeabilidade).

As zonas de fluxo são os compartimentos onde ocorre o maior movimento da água subterrânea, sendo o transporte predominantemente por advecção. Essa característica torna essas áreas críticas para a caracterização da contaminação em fase dissolvida, uma vez que a advecção favorece o deslocamento dos contaminantes ao longo do aquífero. Por outro lado, nas zonas de armazenamento, a advecção é ausente ou significativamente reduzida, fazendo com que o transporte ocorra principalmente por difusão, o que influencia a dispersão e a persistência dos contaminantes. Essa diferenciação é essencial para o adequado posicionamento dos pontos de amostragem e a instalação dos piezômetros, garantindo a obtenção de dados representativos.

Nesse contexto, a instalação do filtro dos piezômetros deve refletir a espessura real da camada de fluxo em cada unidade hidroestratigráfica, ao invés de seguir um padrão uniforme para todos os pontos investigados. Segundo Riyis (2012), a abordagem tradicional de investigação—baseada exclusivamente na combinação de amostragem de solo e instalação de piezômetros—frequentemente falha em capturar a heterogeneidade do meio físico subterrâneo, que constitui uma das principais variáveis em estudos de contaminação. O autor ressalta que, mesmo quando executadas corretamente, essas técnicas, se utilizadas isoladamente, podem ser insuficientes, pois não contemplam de maneira adequada as variações texturais e estruturais do meio, aumentando as incertezas na caracterização ambiental.

Portanto, para minimizar as incertezas e obter dados mais representativos, torna-se imprescindível a adoção de estratégias de investigação complementares, que considerem as variações litológicas e estruturais do solo. Esse enfoque possibilita uma avaliação mais precisa dos mecanismos de transporte dos contaminantes, contribuindo para um melhor embasamento na definição das estratégias de remediação e mitigação dos impactos ambientais.

Segundo Pitkin *et al* (2014), a utilização das técnicas apropriadas durante a fase de investigação pode, embora elevar os custos iniciais, resultar em uma redução significativa dos custos globais do projeto. Os autores demonstram que, após a aplicação de uma abordagem investigativa adequada, foi possível obter uma economia de até catorze vezes no custo global do projeto. Esse resultado evidencia a eficácia de um planejamento meticuloso na delimitação tridimensional das plumas de contaminação nas fases livre, retida, dissolvida e vapor, bem como na identificação de fontes secundárias de contaminação.

Welty *et al.* (2016), *apud* Riyis (2019), destacam que a caracterização da contaminação retida em zonas de baixa permeabilidade deve ser realizada prioritariamente por meio da recolha de amostras de solo, garantindo a representatividade dos dados tanto na zona não

saturada quanto na saturada. Nesse contexto, a primeira etapa consiste na obtenção de amostras utilizando metodologias e ferramentas adequadas, que assegurem a representatividade em profundidade. Posteriormente, essas amostras devem ser analisadas em campo por meio de uma descrição tátil-visual inicial, permitindo a identificação de variações significativas nas unidades hidroestratigráficas e proporcionando uma compreensão mais precisa da heterogeneidade do meio.

Além disso, recomenda-se a realização de uma varredura vertical para detecção de compostos orgânicos voláteis, associada à recolha de solo de perfil completo (*whole-core soil sampling*), conforme sugerido por Riyis *et al.* (2017) e pelo ITRC (2015). Essa abordagem possibilita a identificação detalhada das diferentes camadas e características do solo. Paralelamente, a aplicação de ensaios de piezocone de resistividade (RCPTu—variação do CPTu com sensor de condutividade elétrica, conforme Riyis, 2012), combinada com a análise da dissipação da pressão de poro, permite determinar, com alto nível de detalhe, as zonas de fluxo e armazenamento, além de fornecer valores quantitativos de condutividade hidráulica (K) nas zonas de armazenamento.

Na sequência, a investigação deve avançar com a instalação de piezômetros nas zonas de fluxo identificadas nos ensaios anteriores, seguida pela realização de ensaios hidrogeológicos, com o objetivo de obter valores quantitativos de condutividade hidráulica (K) nas zonas transmissivas. Para complementar a caracterização do meio, torna-se essencial a recolha de amostras indeformadas de solo, para a determinação da porosidade total, porosidade efetiva e densidade, bem como de amostras deformadas, destinadas à análise granulométrica e à determinação da fração de carbono orgânico. Essa abordagem integrada e rigorosa permite uma caracterização detalhada do meio poroso, contribuindo para uma avaliação robusta das condições ambientais e fornecendo subsídios essenciais para o delineamento das estratégias de remediação mais adequadas.

À luz da importância da investigação detalhada, é essencial que essa etapa atenda aos requisitos necessários para que os resultados obtidos possam ser utilizados como prova pericial. De acordo com a CETESB (2023), essa fase deve contemplar:

- Caracterização das camadas geológicas presentes nas zonas não saturada e saturada, incluindo a determinação de suas espessuras e a avaliação de suas propriedades físico-químicas;

- Análise da capacidade dos materiais geológicos de transmitir ou reter contaminantes, considerando parâmetros como textura, granulometria e capacidade de adsorção;
- Determinação das porosidades existentes nos materiais analisados, essencial para compreender a mobilidade e o armazenamento de contaminantes no meio;
- Caracterização do fluxo das águas subterrâneas na zona saturada, avaliando se o fluxo é ascendente ou descendente, além de definir sua direção em áreas de recarga ou descarga;
- Determinação das propriedades hidráulicas do meio, incluindo permeabilidade, porosidade total e efetiva, fundamentais para modelar a migração de contaminantes e prever cenários de exposição.

A adoção dessa abordagem estruturada e rigorosa na investigação detalhada é fundamental para garantir a representatividade dos dados obtidos, reduzir incertezas e embasar de forma sólida as tomadas de decisão nos processos de gestão e remediação de sítios contaminados.

Além disso, a investigação detalhada deve contemplar o mapeamento espacial da distribuição das substâncias químicas presentes nas zonas saturada e não saturada, levando em consideração a estimativa da isotropia ou anisotropia e a avaliação da homogeneidade ou heterogeneidade do meio. Esse processo é essencial para compreender a dinâmica dos contaminantes no subsistema hidrogeológico e avaliar a dispersão potencial das substâncias químicas no ambiente. Paralelamente, é fundamental analisar as características do fluxo de águas subterrâneas e do ar na zona não saturada, pois esses fatores influenciam diretamente a migração e a persistência dos contaminantes no meio físico.

Segundo Riyis (2019), um modelo conceptual hidrogeológico atualizado ao término da investigação detalhada deve ser capaz de responder a questões essenciais para a compreensão do sistema de contaminação. Entre os principais aspectos a serem elucidados, destacam-se:

- Origem da contaminação – Identificação das fontes primárias e dos mecanismos de liberação dos contaminantes no meio;
- Meio de transporte – Caracterização das litologias e unidades hidroestratigráficas que os contaminantes atravessam, considerando propriedades como permeabilidade, porosidade e heterogeneidade estrutural;
- Fluxo e taxa de migração – Quantificação da carga contaminante em movimento, estimando a velocidade e direção do fluxo, o que permite modelar a evolução temporal e espacial da pluma contaminante;

- Destino final dos contaminantes – Mapeamento das trajetórias de transporte e áreas de impacto, possibilitando a previsão das regiões mais vulneráveis à contaminação.
- Interações entre o sistema de contaminação e as propriedades do meio – Avaliação dos processos físico-químicos que governam o transporte e o destino dos contaminantes, incluindo adsorção, dessorção, difusão, atenuação natural e biodegradação.

5.6 Modelo conceptual da contaminação

O modelo conceptual geoquímico consolidado na fase de investigação detalhada, representa um avanço significativo na compreensão da contaminação ambiental. Ele integra informações provenientes das fases sólida, aquosa e gasosa, permitindo uma análise abrangente dos mecanismos que governam a distribuição dos contaminantes na subsuperfície. Além disso, incorpora as reações químicas responsáveis pelo controle da mobilidade e das concentrações dos contaminantes, fornecendo uma base científica sólida para a formulação de estratégias de remediação.

A elaboração desse modelo conceptual geoquímico possibilita correlacionar fatores mineralógicos, granulométricos e hidrogeológicos com aspetos como solubilidade, volatilidade e reatividade dos compostos químicos. Dessa forma, ele não apenas aprimora a interpretação dos processos de transporte e transformação, mas também facilita a identificação de zonas críticas, como áreas de alta retenção ou de mobilidade acentuada dos contaminantes. Ao integrar essas informações, reduz-se significativamente a incerteza associada aos estudos de contaminação, resultando em abordagens mais eficazes na investigação e gestão de sítios contaminados.

A evolução do modelo conceptual ocorre em três fases principais, cada uma com diferentes níveis de complexidade e refinamento:

- Avaliação preliminar: Nessa fase inicial, o modelo conceptual é construído com base em informações secundárias, como registos históricos, dados geográficos e relatórios anteriores. O objetivo é estabelecer um primeiro entendimento sobre as fontes primárias de contaminação, os possíveis contaminantes, as vias de transporte, os recetores potenciais e as vias de exposição. Esse modelo qualitativo serve como guia para a definição das áreas prioritárias de investigação e para o planeamento das atividades de campo.

- **Investigação exploratória:** Com a obtenção de dados empíricos em campo, como amostras de solo, água subterrânea, sedimentos e vapor, o modelo conceptual é atualizado para refletir melhor a realidade do local. O foco dessa etapa é confirmar a presença de contaminação e caracterizar sua extensão e severidade preliminarmente. A integração de informações hidrogeológicas e químicas aprimora a representação do cenário contaminado, permitindo uma tomada de decisão mais assertiva sobre a necessidade de uma investigação detalhada.
- **Investigação detalhada:** Nessa fase, o modelo conceptual atinge seu maior nível de complexidade e especificidade, incorporando dados quantitativos sobre a distribuição espacial e temporal dos contaminantes. Ele passa a incluir interações entre as diferentes fases ambientais (sólida, líquida e gasosa) e processos geoquímicos como adsorção, desorção e difusão reversa. Além disso, considera as zonas de baixa permeabilidade e os mecanismos que controlam a libertação gradual de contaminantes para a água subterrânea e o ar do solo.

O modelo conceptual geoquímico, nessa etapa avançada, torna-se uma ferramenta essencial para a avaliação de riscos, o planejamento de estratégias de remediação e a monitorização da eficácia das medidas implementadas. Sua abordagem sistemática e multidisciplinar permite a formulação de ações mais eficazes para a mitigação dos impactos ambientais, garantindo maior precisão na gestão de sítios contaminados e contribuindo para a proteção da saúde humana e dos ecossistemas.

5.7 Avaliação quantitativa de risco

A avaliação quantitativa de risco (AQR) tem como principal objetivo quantificar e caracterizar, de forma precisa, os riscos associados à exposição de recetores identificados, sejam eles já expostos ou potencialmente expostos às substâncias químicas presentes em um sítio contaminado. Essa etapa é essencial para subsidiar decisões sobre a necessidade e a extensão das medidas de intervenção ou remediação, garantindo que as ações adotadas estejam fundamentadas em dados robustos e específicos sobre os riscos e os potenciais efeitos adversos.

Para que a avaliação quantitativa de risco seja eficaz, ela deve ser desenvolvida a partir das informações geradas nas etapas anteriores, incluindo dados históricos, levantamentos de campo, análises químicas e delimitação tridimensional das manchas de contaminação. Somente após a conclusão dessas fases é possível quantificar adequadamente os riscos, permitindo uma análise detalhada dos impactos para a saúde humana e ambiental e orientando a definição das estratégias de remediação mais adequadas.

A avaliação quantitativa de risco segue uma abordagem científica e sistemática para estimar a probabilidade de desenvolvimento de efeitos adversos, incluindo doenças como o câncer, em decorrência da exposição a contaminantes. Para isso, são analisadas:

- As concentrações das substâncias químicas no meio ambiente;
- As vias de exposição, como inalação, ingestão e contato dérmico;
- A toxicidade das substâncias químicas envolvidas;
- As características da exposição, incluindo frequência, duração e intensidade.

Por meio dessa análise, são calculados os riscos associados a cada via de exposição, considerando as especificidades do sítio contaminado e dos recetores potencialmente expostos. Essa abordagem permite determinar se a ocupação do local representa um risco inaceitável e, em caso afirmativo, orientar as ações de mitigação necessárias para proteger a saúde pública.

A avaliação quantitativa de risco é, portanto, um pré-requisito fundamental para a ocupação segura de um sítio contaminado, pois assegura que qualquer potencial risco de desenvolvimento de doenças seja identificado e adequadamente mitigado. Dessa forma, torna-se possível estabelecer medidas de remediação e controles ambientais eficazes, garantindo a proteção da saúde pública e a utilização segura e sustentável do sítio.

De acordo com a USEPA (1991), o desenvolvimento da avaliação quantitativa de risco deve incluir as seguintes etapas:

- i. Identificação das unidades de exposição: definição das áreas afetadas e categorização do uso atual e futuro da área, incluindo recetores humanos expostos direta ou indiretamente;
- ii. Identificação dos contaminantes presentes em cada unidade de exposição;
- iii. Definição dos caminhos de exposição, considerando as vias presentes e potenciais, tanto para os recetores atuais quanto futuros;
- iv. Cálculo do risco para cada contaminante, por recetor e por caminho de exposição;
- v. Cálculo do risco total para cada unidade de exposição, somando os riscos individuais e agrupando-os em função de seus efeitos carcinogênicos e não carcinogênicos;
- vi. Cálculo dos *On-Site Specific Target Levels* (SSTL), que representam as concentrações máximas aceitáveis dos contaminantes em cada meio (solo, água subterrânea, vapor, etc.), considerando as vias de exposição identificadas;

- vii. Apresentação de mapas de risco, indicando os recetores potencialmente afetados e as áreas de maior preocupação (hot spots);
- viii. Conclusão sobre a necessidade de intervenção, definindo se medidas de remediação ou contenção são necessárias para mitigar os riscos.

Se os resultados da avaliação quantitativa de risco indicarem que há risco para os recetores, é essencial que ações de intervenção sejam adotadas de imediato. Essas intervenções podem incluir:

- Contenção da contaminação, evitando sua dispersão para outros compartimentos ambientais;
- Medidas de remediação, para reduzir a concentração dos contaminantes a níveis seguros;
- Restrições de uso do sítio, temporárias ou permanentes, para evitar exposições desnecessárias;
- Monitorização contínua do sítio, garantindo que as medidas adotadas sejam eficazes na proteção da saúde humana e do meio ambiente.

A gestão do risco em sítios contaminados consiste na interrupção da fonte de contaminação, na mitigação dos caminhos de exposição ou na proteção dos recetores expostos, conforme conceituado por Bardos *et al.* (2011). Esse processo é essencial para garantir que um local impactado por substâncias químicas possa ser utilizado de forma segura, minimizando os riscos ambientais e à saúde pública.

A abordagem para a gestão do risco pode envolver diferentes estratégias, tais como:

- Controlo da fonte: Implementação de sistemas de remediação para reduzir a massa do contaminante no meio ambiente;
- Interrupção do caminho de exposição: Adoção de medidas de restrição, como a proibição do uso da água subterrânea contaminada;
- Proteção dos recetores: Implementação de medidas de restrição de uso e ocupação, impedindo que a população entre em contato com as substâncias químicas presentes no sítio contaminado.

Para atingir esse objetivo, as medidas de intervenção podem ser classificadas em cinco categorias principais:

- Medidas de remediação por tratamento – Técnicas que removem ou degradam os contaminantes do meio, como processos físicos, químicos e biológicos;

- Medidas de remediação por contenção – Barreiras físicas, como coberturas impermeáveis e cortinas hidráulicas, que impedem a mobilização dos contaminantes;
- Medidas de controlo de engenharia – Implementação de sistemas de drenagem, ventilação e impermeabilização para minimizar a exposição;
- Medidas de controlo das fontes de contaminação primárias e secundárias – Adoção de técnicas que reduzem a massa de contaminantes presentes no solo e na água subterrânea;
- Medidas de controlo institucional – Restrição do uso da área por meio de regulamentos e normas específicas, como zonas de proteção ambiental e proibição de escavações ou perfurações.

A seleção da estratégia de intervenção mais adequada depende da caracterização detalhada da contaminação e da avaliação do risco associada ao local.

Após a identificação do risco, inicia-se um processo estruturado de avaliação das alternativas de remediação, considerando as características específicas do sítio contaminado. Esse processo inclui:

- Estudo das alternativas disponíveis, analisando eficácia, viabilidade técnica, custos e tempo de implementação das tecnologias de remediação mais apropriadas para a situação;
- Testes laboratoriais (bancada), que permitem avaliar, em escala reduzida, o desempenho das tecnologias selecionadas;
- Ensaio piloto em campo, que validam as técnicas em condições reais e ajudam a prever sua eficiência na remoção da contaminação;
- Seleção final da técnica ou combinação de técnicas, garantindo que a estratégia adotada seja a mais eficiente na eliminação ou mitigação dos riscos;
- Elaboração do plano de intervenção, definindo as ações detalhadas para a implementação da remediação.

A realização de testes piloto em campo é uma etapa essencial para verificar se a tecnologia selecionada é adequada para o local, evitando custos desnecessários e garantindo que a intervenção seja eficaz.

Nos casos em que a avaliação quantitativa de risco não indica risco significativo aos receptores, o sítio não pode ser automaticamente considerado seguro de forma definitiva. Isso

porque as condições ambientais podem mudar ao longo do tempo, influenciando a distribuição dos contaminantes e a exposição dos recetores. Assim, a monitorização contínua do sítio deve ser realizada por pelo menos dois ciclos hidrogeológicos, garantindo que:

- A pluma de contaminação não está se expandindo;
- As concentrações de contaminantes permanecem abaixo dos níveis aceitáveis;
- Não há surgimento de novas vias de exposição que possam representar riscos futuros.

Caso seja identificado um aumento nas concentrações de contaminantes ou uma alteração significativa no meio físico, medidas de intervenção corretivas devem ser adotadas para garantir a segurança do local.

A tomada de decisão sobre a necessidade de intervenção imediata ou monitorização contínua deve ser fundamentada em dados científicos robustos da avaliação quantitativa de risco. Essa abordagem assegura que quaisquer potenciais ameaças sejam identificadas e tratadas de maneira eficaz, garantindo a proteção da saúde humana e do meio ambiente, além da sustentabilidade do uso da área no longo prazo.

5.8 Remediação

A gestão de sítios contaminados tem evoluído significativamente ao longo das últimas décadas, impulsionada pela crescente complexidade dos contaminantes e pela busca por alternativas mais sustentáveis e eficazes de remediação ambiental. Em Portugal, a abordagem predominante envolve a escavação de solos contaminados, seguida de disposição em aterros ou valorização em cimenteira. Embora essa estratégia tenha relevância para a remoção da fonte secundária de contaminação, apresenta desafios significativos em termos de sustentabilidade ambiental e custos operacionais elevados.

Um dos principais limites dessa metodologia reside no fato de que, frequentemente, a remediação *ex situ* não aborda contaminantes remanescentes, como plumas de vapores, contaminantes adsorvidos na zona saturada e contaminantes dissolvidos na água subterrânea, e esse cenário leva à continuidade da exposição dos recetores.

Essas considerações conduzem à seguinte reflexão: qual a alternativa mais sustentável para o tratamento de uma tonelada de solo contaminado? Deve-se optar por um sistema de remediação *in situ* - que consuma energia e combustível fóssil ou pela remoção do solo contaminado e destinação para um aterro, deslocando o impacto para outro local?

Embora a remediação sustentável ainda seja um tema pouco difundido globalmente, algumas diretrizes podem orientar a tomada de decisão nesse contexto, a ASTM E2893/2016 – *Standard Guide for Greener Cleanups* (ASTM, 2016) e os guias técnicos e regulatórios do ITRC – *Green and Sustainable Remediation: A Practical Framework* (ITRC, 2011).

Essas referências oferecem abordagens baseadas em critérios de sustentabilidade que equilibram a eficiência da remediação com a minimização dos impactos ambientais, promovendo o uso responsável dos recursos naturais e a redução da pegada de carbono das operações de descontaminação.

A investigação e a remediação de sítios contaminados enfrentam uma série de desafios técnicos e operacionais, tais como:

- Complexidade dos contaminantes – Misturas químicas diversas exigem múltiplas técnicas de investigação e tratamento;
- Incertezas técnico-científicas – A variabilidade das condições geológicas e hidrogeológicas influencia a dispersão e o comportamento dos contaminantes;
- Coordenação entre partes interessadas – Envolve reguladores, empresas, comunidades e especialistas ambientais, exigindo transparência na comunicação e tomada de decisão baseada em evidências.

A qualidade dos dados ambientais obtidos durante a investigação é fundamental para a eficácia da remediação. Para garantir a representatividade das informações, são necessárias:

- Técnicas avançadas de investigação, incluindo amostragem sistemática de solo, água subterrânea e vapores;
- Análises químicas de alta precisão, permitindo a quantificação das substâncias químicas de interesse e a sua distribuição espacial e temporal;
- Modelação matemática do fluxo e transporte de contaminantes, permitindo previsões dinâmicas e ajustes contínuos nas estratégias de remediação.

A sustentabilidade na remediação ambiental não se restringe apenas à remoção de contaminantes, mas também ao impacto ambiental global das intervenções. O desafio atual reside na transição de abordagens convencionais para estratégias de menor impacto ambiental, garantindo eficácia técnica, viabilidade económica e proteção da saúde pública e dos ecossistemas. Assim, a implementação de tecnologias inovadoras, a integração de dados confiáveis e o uso de metodologias sustentáveis são fatores essenciais para assegurar um futuro mais equilibrado na gestão de sítios contaminados.

5.9 Monitorização para encerramento

A etapa final do processo de avaliação da contaminação consiste na monitorização para encerramento, cujo objetivo é confirmar, por meio de análises sistemáticas, que as intervenções implementadas atingiram os níveis de segurança estabelecidos na avaliação de risco. Durante essa fase, são realizadas medições periódicas nos diferentes compartimentos ambientais (solo, água subterrânea e ar) para verificar a estabilidade das concentrações de contaminantes, garantindo que não ocorra remobilização ou surgimento de novas fontes de contaminação. Esse monitoramento contínuo é essencial para embasar decisões relacionadas ao encerramento do processo de remediação, assegurando a proteção da saúde humana e do meio ambiente.

A interpretação dos dados obtidos durante a monitorização envolve a comparação dos resultados com os limites de referência normativos, bem como a análise de tendências temporais. Essa abordagem permite identificar eventuais desvios, recontaminações ou padrões que possam indicar a necessidade de ajustes nas estratégias de gestão. Caso haja indícios de recontaminação ou de novas fontes ativas, medidas corretivas devem ser implementadas para restabelecer as condições ambientais seguras. A análise desses resultados deve ser conduzida por uma equipa multidisciplinar, integrando especialistas em geociências, química ambiental, engenharia e toxicologia, que podem utilizar modelos preditivos para antecipar a evolução dos parâmetros ambientais e avaliar a necessidade de prolongamento da monitorização.

Por fim, a monitorização para encerramento consolida a conclusão do processo de remediação, fornecendo a base para a emissão de pareceres técnicos que atestam a recuperação ambiental do sítio. A transparência na comunicação dos resultados junto às entidades reguladoras e demais partes interessadas é um fator determinante para garantir a credibilidade das ações realizadas. Assim, com a comprovação de que as concentrações dos contaminantes permanecem estáveis e dentro dos padrões de segurança estabelecidos, a fase de monitorização possibilita o encerramento formal das atividades de remediação, abrindo caminho para o uso seguro e sustentável do local.

5.10 Investigação de sítios contaminados em Portugal

A gestão de sítios contaminados é um processo complexo que requer uma abordagem integrada e multidisciplinar. Para que esses locais sejam geridos de forma sustentável e segura, é essencial compreender as características geoquímicas e hidrogeológicas do sítio, além dos processos de transporte e transformação dos contaminantes. A aplicação de técnicas adequadas de investigação e avaliação de risco, aliada à implementação de medidas de remediação

eficazes, garante que os riscos para a saúde pública e para o meio ambiente sejam devidamente identificados e mitigados.

Essa abordagem permite não apenas uma identificação precisa dos danos ambientais, mas também a implementação de soluções customizadas para cada cenário específico. Ao utilizar metodologias científicas robustas e tecnologias inovadoras, a interação entre os contaminantes e o meio pode ser analisada em profundidade, possibilitando o desenvolvimento de estratégias de remediação mais sustentáveis e eficazes.

Contudo, na prática, a investigação de sítios contaminados em Portugal ainda segue uma abordagem predominantemente tradicional e fragmentada. Em vez de adotar metodologias integradas e interdisciplinares, os processos tendem a se concentrar em técnicas convencionais de recolha e análise de dados, sem incorporar modelação matemática avançada ou novas tecnologias para prever o comportamento dos contaminantes no meio ambiente. Esse modelo limita a precisão das avaliações e reduz a eficácia das estratégias de remediação, dificultando a compreensão integral da complexidade dos processos de contaminação.

Embora tenham ocorrido avanços, as incertezas científicas e a complexidade dos processos ambientais ainda apontam que há um longo caminho a percorrer para tornar a gestão de sítios contaminados mais eficaz em Portugal. Para superar essas limitações, seria necessário investir em metodologias inovadoras, bem como reestruturar os processos de investigação, incorporando abordagens preditivas, modelação geoquímica e técnicas mais avançadas de monitorização e remediação.

A metodologia proposta para a investigação e remediação de sítios contaminados em Portugal pode ser comparada às diretrizes estabelecidas por instituições internacionais de referência, como a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) e a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Essas entidades adotam abordagens estruturadas e faseadas, priorizando o rigor técnico e a aquisição detalhada de dados para embasar a tomada de decisão.

Embora APA, USEPA e CETESB compartilhem um objetivo comum — garantir a gestão adequada de sítios contaminados — existem diferenças significativas em suas metodologias, critérios normativos e nível de detalhamento técnico:

- Agência Portuguesa do Ambiente (APA)

- ✓ Adota uma abordagem mais tradicional e concisa, integrando rapidamente as fases de avaliação de risco e remediação;
 - ✓ Limita o uso de tecnologias convencionais, concentrando-se na recolha de dados e medidas corretivas diretas, como contenção física e remoção de solo contaminado;
 - ✓ O foco está na mitigação rápida dos riscos, muitas vezes sem uma análise aprofundada dos processos envolvidos na disseminação dos contaminantes.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB)
 - ✓ Apresenta uma metodologia intermediária entre a APA e a USEPA, na qual cada fase de investigação e remediação é estruturada em etapas progressivas;
 - ✓ Possui um enfoque detalhado, onde cada fase de estudo é refinada antes da tomada de decisões, garantindo uma base mais robusta para a avaliação de risco e remediação;
 - ✓ A seleção da técnica de remediação é baseada em análises detalhadas das condições específicas do local, promovendo soluções mais ajustadas e eficazes.
 - *Environmental Protection Agency* (USEPA)
 - ✓ Adota uma abordagem altamente estruturada e tecnológica, incorporando modelação matemática, sensores de monitorização em tempo real e tecnologias avançadas para avaliação e remediação;
 - ✓ Utiliza ferramentas preditivas para simular a distribuição dos contaminantes e prever a evolução das plumas de contaminação, facilitando a implementação de soluções dinâmicas e adaptáveis;
 - ✓ Prioriza técnicas de remediação baseadas em evidências científicas, como tratamentos *in situ*, para minimizar os impactes ambientais e evitar a simples remoção e disposição do solo contaminado em aterros.

Ao analisar essas três abordagens, verifica-se que Portugal ainda se baseia fortemente em métodos tradicionais de gestão de sítios contaminados, enquanto a CETESB adota um modelo híbrido, e a USEPA aplica uma abordagem altamente tecnológica e preditiva.

Essa comparação destaca que, embora a APA priorize soluções rápidas e diretas, a CETESB oferece maior flexibilidade e refinamento dos dados, enquanto a USEPA se destaca por seu rigor técnico e inovação contínua. A integração de metodologias inovadoras, como o uso de sensores, modelação preditiva e abordagens de *Green Remediation*, pode permitir que Portugal evolua para um modelo mais eficiente e sustentável e que garanta a segurança dos receptores.

Embora os processos de investigação ambiental em Portugal tenham avançado, ainda há oportunidades para aprimoramento. Esses pontos de melhoria estão ligados a fatores técnicos, regulamentares, económicos e operacionais. Com base no cenário atual e nos pontos abordados neste capítulo, identificam-se algumas áreas onde pequenos ajustes podem promover uma maior eficiência na gestão de sítios contaminados.

Na fase preliminar, uma área de oportunidade identificada em Portugal é a necessidade de adotar uma abordagem mais padronizada e consistente para a recolha e análise de dados históricos. Em muitos sítios contaminados, há desafios para obter uma documentação completa sobre atividades industriais passadas, os tipos de substâncias utilizadas ou descartadas e as alterações no uso do solo, o que pode dificultar a construção de um modelo conceptual robusto. Além disso, é comum que empresas ou proprietários ainda não reconheçam plenamente a importância da avaliação preliminar, o que pode resultar em alguma relutância na implementação dessa etapa.

Já na fase exploratória, há espaço para aprimoramento na realização de investigações que confirmem a presença de contaminação de forma mais abrangente. Alguns pontos que merecem atenção incluem investimento na etapa exploratória é um aspeto que, se ampliado, pode contribuir significativamente para a eficácia do processo investigativo. Em pequenos projetos ou empreendimentos de menor porte, a disponibilização de recursos adicionais para essa fase pode fazer a diferença, proporcionando uma base mais sólida para a tomada de decisões e a implementação de estratégias de remediação. Também é importante considerar a capacitação contínua de técnicos, a fim de que possam aplicar técnicas avançadas de amostragem e interpretar os dados conforme métodos reconhecidos internacionalmente.

Na fase detalhada investigação ambiental em Portugal, identificam-se algumas áreas que podem ser aprimoradas para fortalecer a eficácia e a abrangência dos estudos realizados. Entre os pontos observados estão:

- Aplicação de técnicas avançadas de investigação: Embora existam técnicas como sondagens e amostradores passivos, a utilização de métodos avançados, como a geoquímica para caracterização detalhada do local, ainda é limitada. Isso pode ser atribuído à necessidade de maior formação e familiaridade com essas técnicas, tanto no setor privado quanto nas entidades reguladoras.
- Identificação de fontes secundárias e imobilização de contaminantes: Em situações envolvendo líquidos não aquosos (NAPLs), a identificação de fontes secundárias de contaminação, especialmente em zonas de baixa permeabilidade,

apresenta desafios. A compreensão aprofundada de processos como a difusão reversa é essencial para uma avaliação mais completa.

- Integração de dados históricos e modelagem de fluxo: A incorporação eficiente de dados históricos com modelos dinâmicos de transporte de contaminantes pode ser melhorada. Essa integração é fundamental para prever com maior precisão a migração de contaminantes nas diferentes fases.
- Regulamentação e fiscalização: Embora existam diretrizes gerais, a aplicação prática pode ser inconsistente, gerando incertezas sobre as metodologias a serem adotadas na fase detalhada. Além disso, a fiscalização dos sítios contaminados pode ser fortalecida para assegurar conformidade com as normas estabelecidas.
- Padronização de métodos e protocolos: A ausência de protocolos padronizados para a caracterização detalhada das condições do solo, água e ar pode dificultar a obtenção de dados robustos e comparáveis entre diferentes estudos.
- Caracterização e monitorização de contaminantes em fase gasosa: A avaliação completa do risco de intrusão de vapores em edificações próximas é uma área que merece atenção, especialmente em casos de contaminação por compostos voláteis.
- Compreensão do comportamento de contaminantes específicos: Aprofundar o conhecimento sobre o comportamento de certos contaminantes, como hidrocarbonetos clorados em meios porosos, é fundamental devido às suas propriedades físico-químicas complexas.

Abordar esses pontos de melhoria requer um esforço conjunto de inovação tecnológica, formação especializada e maior colaboração entre a academia, o setor privado e as autoridades reguladoras. Esse enfoque integrado contribuirá para que a investigação ambiental em Portugal seja conduzida de maneira cada vez mais eficaz e abrangente, garantindo a proteção do meio ambiente e da saúde pública.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A gestão de sítios contaminados tem sido um tema amplamente discutida no cenário mundial, envolvendo uma variedade de procedimentos para caracterizar a contaminação, com objetivo central de eliminar condições de risco para a saúde humana e ao ambiente.

Para alcançar esse objetivo, é fundamental realizar uma caracterização detalhada, compreendendo minuciosamente as condições geoquímicas e hidrogeológicas que influenciam a distribuição e o comportamento dos contaminantes. A heterogeneidade do meio físico desempenha um papel fundamental nesse contexto, afetando diretamente a mobilidade e a persistência dos contaminantes no ambiente. Portanto, uma análise aprofundada desses fatores é essencial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de remediação.

Atualmente, em Portugal, observa-se que diversas investigações ambientais apresentam limitações na quantidade e qualidade das informações obtidas. Essas limitações estão associadas a incertezas que dificultam o correto dimensionamento dos danos ambientais e, principalmente, a elaboração de propostas eficazes de ações de reabilitação.

Para discutir esta questão com maior profundidade, neste momento será percorrido um caminho em busca de compreender como a configuração geológica de um sítio influencia o comportamento dos contaminantes e, conseqüentemente, a eficácia das soluções de reabilitação. As heterogeneidades geológicas podem afetar significativamente a distribuição e o transporte de contaminantes no solo e nas águas subterrâneas. Quando essas variações não são devidamente identificadas, as ações implementadas não alcançam os resultados esperados, levando a uma reabilitação ineficaz e, possivelmente, a situações de risco inesperadas.

Como discutido no Capítulo 4.3, sítios industriais podem conter uma ampla gama de contaminantes. Para aprofundar o estudo, optou-se por focar nos hidrocarbonetos alifáticos clorados, especificamente tetracloroetano (PCE), tricloroetano (TCE), dicloroetano (c1,2-DCE) e cloreto de vinilo (CV).

A seleção desses compostos baseou-se nas propriedades químicas específicas, que os tornam particularmente preocupantes em contextos ambientais e de saúde pública. Essas propriedades incluem:

- i. Volatilidade: estes compostos são voláteis, o que significa que podem facilmente evaporar e dispersar no ar, contribuindo para a intrusão de vapores em edifícios e ambientes;
- ii. Estabilidade química: possuem uma estabilidade química, o que implica que podem persistir no meio ambiente por longos períodos. Essa estabilidade dificulta a degradação natural e aumenta o risco de contaminação prolongada;
- iii. Baixa solubilidade em água: a baixa solubilidade em água faz com que eles se acumulem em camadas de solo e sedimentos, além de facilitar sua presença em áreas aquáticas e a sua migração através de diferentes meios;
- iv. Aplicações: são amplamente utilizados como solventes industriais, em processos de limpeza, desgorduramento e como intermédios químicos em diversas aplicações industriais;
- v. Histórico de uso: O uso extensivo desses compostos no contexto industrial resultou em fugas e descarte inadequado, o que levou à contaminação de solo e água subterrânea ao longo das décadas.

Esses compostos estão frequentemente associados a atividades industriais e apresentam comportamento geoquímico complexo, incluindo a formação de produtos de degradação igualmente nocivos. Portanto, a seleção dos hidrocarbonetos alifáticos clorados baseou-se em sua relevância toxicológica e no impacto significativo que podem causar devido às suas propriedades. Além disso, esses compostos representam um desafio substancial nas etapas de investigação e remediação, exigindo o desenvolvimento de estratégias eficazes para mitigar os riscos associados.

6.1 Geoquímica ambiental dos sítios contaminados

No contexto das investigações ambientais, as propriedades físico-químicas dos solos desempenham um papel fundamental na avaliação da mobilidade e do comportamento dos contaminantes. O tipo de solo, influencia diretamente a forma como os compostos interagem com o meio, determinando a velocidade e o alcance de sua migração. Solos arenosos, com alta porosidade e baixa capacidade de retenção, permitem uma maior mobilidade dos contaminantes, enquanto solos argilosos, com maior capacidade de adsorção, podem retardar ou até reter os compostos químicos.

Além disso, a condutividade hidráulica do solo é um fator determinante na dispersão dos contaminantes, especialmente na zona saturada. Solos com alta condutividade permitem o transporte mais rápido dos compostos dissolvidos em água subterrânea, enquanto aqueles com baixa condutividade retardam o fluxo, aumentando o tempo de residência dos contaminantes no meio. Propriedades como capacidade de adsorção, pH, matéria orgânica e textura também afetam a retenção de contaminantes em fases sólidas ou a liberação para fases aquosas e gasosas.

Por outro lado, as características intrínsecas dos compostos químicos, como densidade, solubilidade, viscosidade e taxa de degradação, desempenham um papel complementar. Compostos com alta densidade, como os hidrocarbonetos alifáticos clorados, tendem a migrar para zonas mais profundas, enquanto aqueles com maior solubilidade são mais propensos a se dispersar em águas subterrâneas. Já a viscosidade influencia a facilidade com que os contaminantes se deslocam pelos poros do solo, a resistência à degradação determina a persistência dos compostos no ambiente, e a solubilidade em água e afinidade por matéria orgânica levam à adsorção nos componentes do solo, reduzindo ainda mais sua biodisponibilidade para microrganismos degradadores. A compreensão integrada dessas interações entre solos e contaminantes é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de investigação e remediação ambiental.

A água que percola pelos poros do solo sob a ação da gravidade é um dos principais mecanismos de transporte de contaminantes em subsuperfície. Esse movimento depende diretamente da capacidade de retenção do solo, que controla a quantidade de água armazenada nos poros, e do coeficiente de permeabilidade, que define a velocidade e a facilidade com que a água flui através dos poros do solo. Solos com alta permeabilidade, como areias, permitem o transporte mais rápido e amplo dos contaminantes, enquanto solos com baixa permeabilidade, como argilas, tendem a restringir o fluxo e a reter os contaminantes por mais tempo.

Essas propriedades do solo influenciam diretamente os processos de dispersão e atenuação dos contaminantes. Por exemplo, solos com elevada capacidade de retenção podem retardar a migração de compostos dissolvidos na água, mas também aumentar o tempo de exposição e o potencial de contaminação local. Além disso, a heterogeneidade do solo, como a presença de camadas de materiais com diferentes permeabilidades, pode criar caminhos preferenciais de fluxo ou barreiras naturais que afetam a distribuição dos contaminantes no meio.

Compreender essas características é essencial para prever o comportamento dos contaminantes em áreas impactadas e, a utilização de modelos de fluxo e transporte de massa que integram dados sobre a capacidade de retenção e a permeabilidade do solo são ferramentas indispensáveis para avaliar o risco ambiental e planejar intervenções eficazes em sítios contaminados.

Nesse sentido, o uso de métodos precisos é indispensável na identificação da natureza e extensão da contaminação ambiental, fornecendo dados confiáveis sobre a presença e concentração de substâncias químicas no solo, água e ar. Esses métodos permitem determinar não apenas a fonte dos contaminantes, mas também compreender sua composição e comportamento no ambiente.

A interpretação cuidadosa dos dados analíticos é igualmente importante para contextualizar os resultados em relação às condições locais e ao modelo conceptual de contaminação. Essa interpretação deve considerar fatores como as características do meio físico, o comportamento das substâncias químicas e os possíveis processos de transporte e transformação dos contaminantes. Somente uma análise detalhada dos dados permite delimitar os sítios impactados e identificar os compartimentos ambientais mais vulneráveis e os riscos potenciais aos recetores humanos e ecológicos.

Além disso, a integração de informações históricas, como registos de uso do solo, atividades industriais passadas e relatos de eventos acidentais, pode complementar os dados analíticos, fornecendo uma visão ampla e contextualizada do problema. Esses dados históricos, aliados a indícios relevantes, como padrões de distribuição espacial dos contaminantes, ajudam a direcionar as investigações de forma eficiente, economizando recursos e garantindo maior assertividade na determinação dos responsáveis pela contaminação e na adoção de estratégias de remediação adequadas.

Em síntese, a geoquímica desempenha um papel fundamental na caracterização de sítios contaminados, proporcionando uma compreensão aprofundada dos processos físico-químicos que governam o comportamento dos contaminantes no meio. A análise das propriedades físico-químicas dos solos, como porosidade, permeabilidade e capacidade de adsorção, bem como sua interação com os contaminantes, permite uma avaliação detalhada da distribuição e mobilidade dessas substâncias nos diferentes compartimentos ambientais. Além disso, a aplicação de princípios geoquímicos possibilita a previsão da evolução da contaminação ao longo do tempo e do espaço, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de investigação e remediação mais eficazes e cientificamente embasadas.

A grande questão que se coloca é: como os métodos para determinar as propriedades físico-químicas dos solos podem ser aplicados de forma eficiente diante da diversidade, heterogeneidade e complexidade no meio, especialmente na presença de contaminantes de origem antrópica. Essa realidade impõe desafios significativos que exigem abordagens científicas integradas e metodologias adaptadas às condições específicas de cada sítio investigado.

A caracterização das propriedades físico-químicas dos solos é essencial para avaliar a mobilidade e o comportamento dos contaminantes. Métodos como análises laboratoriais e técnicas *in situ*, incluindo a determinação de parâmetros como pH, potencial de oxirredução, matéria orgânica e capacidade de troca catiônica, ajudam a compreender as interações entre os contaminantes e o meio físico. No entanto, a variabilidade natural dos solos e a distribuição irregular dos contaminantes muitas vezes dificultam a obtenção de resultados representativos.

Além disso, a presença de compostos antrópicos, com propriedades diversas como volatilidade, densidade e toxicidade, acrescenta uma camada de complexidade. Para superar esses desafios, é necessário seguir cada etapa com rigor e totalidade. Isso permite desenvolver uma visão mais completa do sítio investigado, otimizando o planejamento de estratégias de remediação e mitigação de impactos ambientais.

Portanto, uma abordagem detalhada que considere as propriedades do solo, as características dos contaminantes e os processos de transporte e degradação é essencial para uma avaliação completa e precisa da contaminação em um sítio contaminado.

Com base nisso, será percorrido um caminho em busca de compreender de forma pormenorizada, as características e propriedades do solo, as propriedades dos hidrocarbonetos alifáticos clorados, seu comportamento em meio poroso e o mecanismo de transporte e de degradação.

6.1.1 Características e propriedades do solo

Como referido anteriormente, as características geológicas desempenham um papel fundamental no controle da distribuição de contaminantes em subsuperfície, por isso compreender suas propriedades físico-químicas é fundamental para avaliar o processo de migração e transferência de massa dos contaminantes.

Em geral, o solo é uma mistura complexa de material rochoso em desagregação, matéria orgânica, ar, água e minerais dissolvidos. Sua estrutura e composição variam

consideravelmente dependendo do tipo de solo, o que afeta diretamente o comportamento e a dinâmica dos contaminantes. Como um filtro natural, o solo desempenha um importante papel na migração de contaminantes, sendo capaz de imobilizar ou atenuar a presença de substâncias. No entanto, esse processo de atenuação depende diretamente das propriedades físico-químicas do solo, como sua textura, composição mineral, capacidade de adsorção e reatividade. A presença de matéria orgânica e a capacidade de troca catiônica, permitem que o solo interaja com os contaminantes, reduzindo sua mobilidade e, conseqüentemente, limitando os riscos de contaminação para os compartimentos adjacentes, como as águas subterrâneas.

No entanto, quando ocorre um acúmulo contínuo de contaminantes, a capacidade do solo de funcionar como um filtro natural pode ser comprometida. O excesso de substâncias químicas acaba por saturar, reduzindo sua eficácia na retenção de novos contaminantes e, em alguns casos, libertando substâncias previamente imobilizadas de volta para o meio. Nesse sentido, as propriedades do solo desempenham um papel fundamental na mobilidade dos contaminantes.

A porosidade e a permeabilidade do solo determinam a rapidez com que a água e os contaminantes podem se mover através da matriz do solo, enquanto a capacidade de adsorção e retenção do solo pode influenciar a forma como o contaminante é armazenado ou imobilizado. Solos com alta capacidade de retenção podem dificultar a migração do contaminante, enquanto solos mais permeáveis podem permitir uma movimentação mais rápida e disseminação dos contaminantes em áreas maiores. A interação entre as partículas do solo e os contaminantes também pode levar à retenção, adsorção ou imobilização das substâncias, o que impacta diretamente as opções de remediação disponíveis.

Cada tipo de solo apresenta características únicas que influenciam diretamente sua capacidade de fluxo e transporte, sendo a porosidade e a permeabilidade dois fatores-chave nesse processo, que, por sua vez, estão relacionadas com a condutividade hidráulica, e essa por sua vez influencia tanto a difusão quanto o transporte dos contaminantes em meio poroso, afetando sua dispersão e atenuação ao longo do tempo e do espaço.

O comportamento do contaminante no solo e sua migração são profundamente influenciados pela fase em que se encontra, seja ela gasosa, líquida ou sólida. Na zona não saturada, os contaminantes podem estar presentes na fase gasosa ou na fase líquida, enquanto na zona saturada, a fase predominante é a líquida, com a presença de contaminantes dissolvidos ou em fase livre. Dependendo da fase, o contaminante pode se mover com maior ou menor

facilidade através do solo. Contaminantes voláteis podem migrar rapidamente na fase de vapor, enquanto substâncias dissolvidas podem ser transportadas com a água subterrânea, podendo se dispersar para grandes distâncias dependendo da permeabilidade e da condutividade hidráulica do solo.

A transferência de massa de contaminantes entre as diferentes fases é um processo dinâmico e contínuo até que se atinja o equilíbrio, que é influenciado pela partição entre o ar, a água e o solo. Isso significa que os contaminantes podem mudar de fase dependendo das condições ambientais, como a temperatura, a pressão e a umidade do solo, além das características dos próprios contaminantes, como a solubilidade e a volatilidade. De acordo com vários autores (Domenico *et al.* 1997; Pankow *et al.* 1996; Cleary, 1989), esse processo de transferência é essencial para entender a migração e a atenuação dos contaminantes, pois as fases em que os contaminantes se encontram influenciam diretamente a escolha de estratégias de investigação e remediação.

Além disso, a umidade do solo exerce um papel determinante na mobilidade dos contaminantes, uma vez que a presença de água facilita o transporte de substâncias dissolvidas, enquanto a ausência de água pode resultar em maior retenção de contaminantes. Solos com baixa umidade, mas com elevado teor de matéria orgânica, tendem a ter uma sorção de maior peso molecular.

Em meio poroso natural, a geometria do espaço poroso é extremamente irregular e complexa, e interfere na aeração, condução e retenção de água e resistência à percolação. A densidade é um indicador de compactação do solo, a exemplo dos solos com textura argilosa que têm, geralmente, densidades mais elevadas e menor porosidade total. Essas características são fundamentais na seleção de alternativas de remediação tais como: taxa de infiltração (quanto maior é a densidade do solo, menor é a taxa de infiltração), permeabilidade do ar e da água (solos mais compactos tendem a ser menos permeáveis) e condutividade hidráulica (Schifino, 2015).

A presença de matéria orgânica no solo, expressa pelo carbono orgânico total, é o principal responsável pela capacidade de troca de cátions, o que aumenta a retenção desses íons e, portanto, influencia o transporte de contaminantes, além de afetar as suas propriedades químicas, físicas e biológicas. A sua presença reduz a mobilidade da água, e, conseqüentemente, dos contaminantes dissolvidos ou em fase livre. O teor de matéria orgânica no solo também é

utilizado como índice da quantidade de carbono disponível para degradação de hidrocarbonetos alifáticos clorados, uma vez que serve como fonte de energia e nutrientes².

A condutividade hidráulica, que descreve a capacidade do solo de transmitir água, também é uma das propriedades físicas mais importantes, pois determina a dispersão de contaminantes. Deve-se notar que, não é apenas uma propriedade do solo, mas, também do fluido, uma vez que depende da densidade, da viscosidade, do tamanho das partículas, do teor de umidade e estrutura do meio poroso (Fernandes, 2011).

Portanto, devido à grande influência da condutividade hidráulica no transporte dos contaminantes no solo, a sua determinação é de fundamental importância na investigação e seleção de alternativas de remediação de sítios contaminados, uma vez que algumas técnicas só são eficazes em solos com alta condutividade. Outra questão de extrema relevância, tem a ver com a heterogeneidade da condutividade hidráulica, que influencia fortemente a trajetória do fluxo da água subterrânea, a evolução da contaminação e as características das plumas, além de refletir diretamente na eficiência das ações corretivas (Parker *et al.* 2004; Steelman *et al.* 2017). Ambientes deposicionais com baixa condutividade hidráulica favorecem maiores concentrações de carbono orgânico, apresentando alta capacidade de sorção e, conseqüentemente, alto potencial de difusão, bem como a sua capacidade de sustentar plumas de contaminação mesmo após a suspensão de aporte de contaminante. (Sale *et al.* 2011).

A heterogeneidade do solo é outra característica que deve ser levada em conta, pois a variação na composição e nas propriedades do solo ao longo de uma área pode resultar em diferentes taxas de migração e atenuação dos contaminantes. Solos com diferentes camadas, como argilas sobre solos arenosos, podem afetar significativamente o comportamento dos contaminantes, criando barreiras ou facilitando sua migração.

Por fim e não menos importante, o pH do solo é considerado uma propriedade química relevante devido à influência que exerce sobre os processos de sorção e dessorção, precipitação, dissolução e oxidação-redução. São todos processos que controlam a migração e destino dos contaminantes no solo e, portanto, influenciam na seleção das técnicas de remediação aplicáveis. Por exemplo, a biorremediação de etenos clorados é mais eficiente em pH próximo a neutro, sendo totalmente ineficaz em ambiente com pH menor que 5,5 ou maior que 8,5.

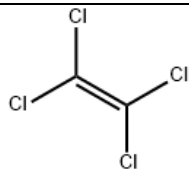
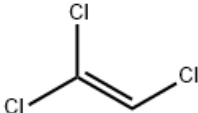
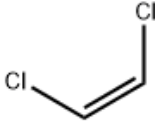
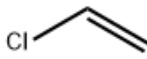
² Uma abordagem mais detalhada será efetuada na seção 6.4.

Em resumo, as propriedades físico-químicas do solo desempenham um papel fundamental no comportamento e na interação dos contaminantes com o meio, influenciando diretamente as estratégias de investigação e remediação de sítios contaminados. Fatores como pH, capacidade de troca catiônica, teor de matéria orgânica e textura do solo afetam a mobilidade, biodisponibilidade e persistência dos contaminantes. Compreender essas interações é essencial para desenvolver abordagens eficazes de investigação e remediação.

6.2 Propriedades dos hidrocarbonetos alifáticos clorados

Os hidrocarbonetos alifáticos clorados ou, simplesmente, etenos clorados abordados nesta tese, são compostos orgânicos da família dos alcenos, possuem dois átomos de carbono (haleto de alquil) formados a partir da substituição de um ou mais átomos de hidrogênio pelo halogênio cloro ligados covalentemente. Caracterizam-se por serem voláteis, líquidos incolores, mais densos que a água, pouco miscíveis em água e possuem alto poder de solubilidade em substâncias orgânicas.

São produzidos artificialmente através de reações de halogenação e a quantidade e posição ocupada pelo átomo de cloro é que determina as propriedades físico-químicas. O cloro, sendo um halogênio muito eletronegativo, gera uma polaridade na ligação cloro-carbono, predispondo certa solubilidade em água. Entretanto, devido ao seu elevado raio atômico, dificulta as transformações químicas e biológicas. A Tabela 6.2.1, apresenta as propriedades físico-químicas dos etenos clorados.

Composto	PCE (tetracloroetano)	TCE (tricloroetano)	c1,2-DCE (dicloroetano)	CV (cloreto de vinilo)
CAS Number ¹	127-18-4	79-01-6	156-59-2	75-01-4
Fórmula ¹	C ₂ Cl ₄	C ₂ HCl ₃	C ₂ H ₂ Cl ₂	C ₂ H ₃ Cl
Fórmula estrutural ¹				
Peso molar ¹ (g/mol)	165,8	131,4	96,9	62,5
Solubilidade ¹ (mg/L)	206	1.280	6.410	8.800

Densidade ¹ 25 C (g/cm ³)	1,62	1,46	1,28	0,91
Viscosidade ¹ 25 C (cp)	0,9	0,57	0,48	0,01
Pressão de va- por ¹ 25 C (mmHg)	18,5	69	200	2.980
Cte. Henry	0,72 (0,0177)	0,4 (9,02x10 ⁻³)	0,17(4,08 x10 ⁻³)	1,14 (0,0278)
K _{oc} ² (L/Kg)	94,94	60,7	39,6	21,7

Tabela 6.2.1 – Propriedades físico-químicas dos hidrocarbonetos alifáticos clorados

Fontes: *Hazardous Substances Data Bank* (HSDB) e Cunha (2010).

Geralmente estes compostos são persistentes no meio e classificados como perigosos por serem tóxicos e mutagênicos para os seres humanos, mesmo em baixas concentrações. Usados em grande escala na indústria, principalmente após ser o solvente substituto do 1,1,1-tricloroetano, controlado pelo Protocolo de Montreal, o tetracloroetano (PCE) e o tricloroetano (TCE) são amplamente usados como desengraxantes de metais, em lavagem a seco, removedores de tintas e fluidos especiais de limpeza (ECSA, 2003).

A sua forte persistência no ambiente também causa preocupação, uma vez que os etenos clorados podem perdurar no ambiente por décadas como fase livre ou residual devido à sua baixa solubilidade; à sua baixa ou inexistente atenuação natural em ambientes oxidantes ou pouco redutores (Pankow *et al.* 1996); e à sua facilidade de armazenamento em poros maiores, mas menos conectados como os presentes nas argilas (Parker *et al.* 2004; Fregona, 2023).

Em geral, estes compostos são relativamente leves (peso molecular variando de 62,5 a 165,8), de solubilidade baixa a moderada (206 a 8.800 mg/L) o que indica que, sua presença, mesmo em fase dissolvida, pode ocasionar altas concentrações na água subterrânea. À exceção do cloreto de vinilo, os outros compostos têm elevada densidade (1,28 a 1,62 g/cm³) o que permite que os etenos clorados percolem em fluxo vertical descendente pela zona saturada em direção a níveis mais profundos do aquífero. Durante o trajeto, ao encontrar poros vazios, acabam por preenchê-los e podem formar bolsões de produtos em fase livre. Se a solubilidade do composto for suficiente e houver água passando pelos poros ocupados por produto em fase livre, esse fenômeno acaba por contribuir para o aumento da contaminação em fase dissolvida presente na água subterrânea (Pankow *et al.* 1996). Estes compostos apresentam pressão de vapor entre 18,5 e 2980 mmHg, o que lhes confere grande mobilidade em espaços intergranulares e a propriedade de serem voláteis (Pankow *et al.* 1996).

Quando dissolvidos em água, também podem sofrer volatilização para a zona não saturada, especialmente o cloreto de vinilo, dado o elevado valor de constante da Lei de Henry. Os valores de coeficiente de partição entre o carbono orgânico e a água (Koc) indicam a afinidade relativamente baixa dos compostos em serem adsorvidos pelo carbono orgânico sólido do material geológico em subsuperfície, à exceção do tetracloroetano. Quanto menor o valor de Koc menor a massa de contaminante adsorvido no solo e maior a concentração em fase dissolvida. Na forma de fase livre, o mesmo fica preso no solo e não adsorvido na matéria orgânica. Essa propriedade indica que a mobilidade destes compostos é relativamente alta. (Bertolo, 2017).

6.3 Comportamento dos hidrocarbonetos alifáticos clorados em meio poroso

Os hidrocarbonetos alifáticos clorados, como o tetracloroetano (PCE), tricloroetano (TCE), dicloroetano (DCE) e cloreto de vinilo (CV), apresentam propriedades físico-químicas específicas que influenciam sua mobilidade, persistência e comportamento em meio poroso. Esses compostos possuem alta densidade, volatilidade moderada e baixa solubilidade em água, o que os tornam contaminantes preocupantes devido à sua capacidade de migrar, acumular-se em diferentes fases e impactar múltiplos compartimentos ambientais, como solo, água e ar.

No ambiente, esses compostos podem estar presentes em diversas formas: dissolvidos na água subterrânea, adsorvidos às partículas do solo, retidos na fase não aquosa (DNAPL) ou como vapor. A interação desses compostos com o meio poroso é controlada por fatores como densidade, solubilidade, volatilidade e pressão de vapor. Por exemplo, devido à sua alta densidade, esses compostos podem migrar para zonas mais profundas do solo, atingindo aquíferos. Sua volatilidade moderada permite que passem para a fase gasosa, podendo contaminar o ar do solo e, eventualmente, o ar interno de edificações através do fenômeno de intrusão de vapores. A baixa solubilidade em água faz com que se dissolvam lentamente, prolongando sua persistência no ambiente e dificultando processos naturais de atenuação.

Além disso, esses compostos podem sofrer processos de biodegradação anaeróbica no meio ambiente, resultando na formação de subprodutos como DCE e cloreto de vinilo, que também são tóxicos e apresentam desafios adicionais para a remediação. Portanto, a compreensão detalhada das propriedades físico-químicas desses hidrocarbonetos alifáticos clorados

é essencial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de gerenciamento e remediação de sítios contaminados.

Por serem mais densos que a água, os hidrocarbonetos alifáticos clorados em fase livre migram para zonas mais profundas do solo e acumulam-se na interface entre a zona saturada e camadas menos permeáveis, formando “piscinas” de DNAPL. Essa migração é influenciada pela heterogeneidade do solo, incluindo a textura e a distribuição da porosidade. Além disso, mesmo com baixa solubilidade em água, os DNAPLs acabam formando plumas de contaminação em fase dissolvida.

O deslocamento de um DNAPL em meio poroso depende de vários fatores, tais como molhabilidade, densidade, viscosidade, tensão superficial e solubilidade (Mercer *et al.* 1990; Nouri *et al.* 2014). Além disso, as propriedades do meio poroso, como capacidade de retenção, condutividade hidráulica e teor de umidade no solo, também desempenham papéis importantes no comportamento do DNAPL em meio poroso (USEPA, 1994).

Sendo pouco solúveis e mais densos que a água, os DNAPL possuem altas pressões de vapor, menor viscosidade do que a água, e baixos coeficientes de sorção, propriedade que frequentemente leva à formação de fase líquida não-aquosa em aquíferos.

No meio poroso, processos como adsorção, difusão e volatilização desempenham papéis críticos no comportamento desses compostos. A adsorção é influenciada pela presença de matéria orgânica no solo e pela polaridade das moléculas cloradas, afetando a mobilidade dos contaminantes clorados. A difusão, facilita o movimento dos contaminantes através dos poros do solo, contribuindo para a dispersão das plumas de contaminação. A volatilização, por sua vez, ocorre principalmente na zona não saturada, podendo levar à intrusão de vapores em edificações. Esses comportamentos reforçam a necessidade de compreender a interação entre as propriedades químicas dos contaminantes e as características do solo para o desenvolvimento de estratégias de investigação que permitam identificar áreas impactadas, mapear plumas de contaminação e implementar técnicas eficazes de remediação.

6.3.1 Fases dos hidrocarbonetos alifáticos clorados em meio poroso

Os hidrocarbonetos alifáticos clorados distribuem-se em diferentes fases dependendo das suas propriedades físico-químicas, das características do meio e das condições de equilíbrio entre as fases. A distribuição entre essas fases é controlada por processos como partição,

volatilização, dissolução e sorção, que determinam o comportamento e a migração desses compostos em meio poroso.

Nesse contexto, a presença de hidrocarbonetos alifáticos clorados em subsuperfície pode gerar até 4 fases distintas e compreender o comportamento dessas fases é essencial para selecionar as melhores alternativas para caracterização e reabilitação. A Figura 6.3.1.1. apresenta um modelo conceptual simplificado da migração de DNAPL em subsuperfície solo.

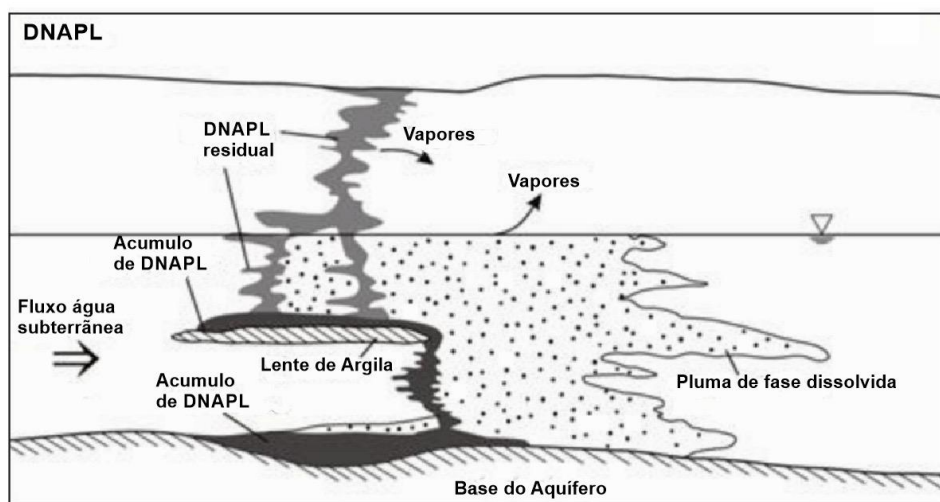


Figura 6.3.1.1.: Modelo conceptual de migração de DNAPL (Fastner *et al.* 2006)

As 4 fases são:

- i. a fase livre ou separada não aquosa (DNAPL) que mantém a sua migração descendente sob a influência da gravidade de forças de capilaridade tanto na zona não saturada como na zona saturada do solo;
- ii. uma parte é sorvida pelos grãos dos solos tornando-se imóvel (fase residual);
- iii. uma parte é dissolvida na humidade do solo na zona não saturada ou solubilizada na água da zona saturada e;
- iv. uma parte volatiliza (USEPA, 1991).

Na forma de DNAPLs, os hidrocarbonetos alifáticos clorados migram verticalmente pela zona não saturada até atingir a zona saturada, onde se acumulam em zonas de baixa permeabilidade. Essa fase atua como uma fonte contínua de contaminação, libertando contaminantes para as outras fases ao longo do tempo. A migração do DNAPL no meio poroso é influenciada pela heterogeneidade do solo, propriedades como porosidade e textura, e pela presença de barreiras geológicas, como camadas de argila.

Parte dos hidrocarbonetos alifáticos clorados pode ser sorvida na matriz sólida do solo, particularmente em materiais ricos em matéria orgânica. A sorção é um processo dependente das características do solo, como textura, teor de matéria orgânica e pH, e das propriedades do contaminante, como hidrofobicidade. Essa fase funciona como uma "reserva" temporária de contaminantes, influenciando a taxa de libertação para as fases líquida e vapor.

Na fase dissolvida, os hidrocarbonetos alifáticos clorados se misturam parcialmente com a água subterrânea, gerando plumas de contaminação que podem se estender por grandes distâncias. A baixa solubilidade desses compostos limita a concentração na fase aquosa, mas, devido à sua toxicidade, mesmo pequenas concentrações podem representar um risco significativo para a saúde humana e ao ambiente. A dissolução é um processo lento, e a liberação contínua do DNAPL mantém a pluma ativa por longos períodos.

Esses compostos podem ainda volatilizar para formar uma fase vapor nos poros preenchidos por ar na zona não saturada. Esses vapores podem migrar em direção à superfície, criando riscos de intrusão de vapor em edificações. A volatilização é influenciada pela pressão de vapor do composto, pela humidade do solo e pelas condições geológicas locais. A fase vapor pode também interagir com a fase líquida e sólida, redistribuindo os contaminantes no meio.

Cada uma dessas fases desempenha um papel importante no transporte e destino dos hidrocarbonetos alifáticos clorados em meio poroso, e sua interação dinâmica determina os impactos ambientais e os desafios associados à sua investigação. Entender essas fases é essencial para o desenvolvimento de modelos conceituais robustos e representativos e estratégias de investigação e remediação eficazes.

Nessa perspectiva, as contribuições de Riyis (2019) destacam um ponto fundamental na dinâmica da contaminação ambiental por DNAPLs: a extensão da fonte secundária, em muitos casos, não é a principal responsável pela maior massa de contaminante nem pela manutenção da pluma ao longo do tempo. Em vez disso, a massa residual, imobilizada no meio poroso, representa uma fonte secundária significativa. Estudos como os de Riyis *et al.* (2015) e Pitkin (2008) reforçam que essa massa residual, muitas vezes retida em zonas de baixa permeabilidade, age como um reservatório persistente de contaminantes. Esse cenário é ainda mais evidente em plumas antigas, conforme observado pelo ITRC (2015), nas quais os processos de difusão reversa (*back diffusion*) mantêm a pluma em fase dissolvida ao longo do tempo.

A difusão reversa ocorre quando os contaminantes retidos em zonas de baixa permeabilidade migram de volta para zonas de maior permeabilidade, reabastecendo a pluma dissolvida de forma contínua. Isso transforma as zonas de baixa permeabilidade em fontes inesgotáveis de contaminação, dificultando significativamente os esforços de remediação. Nesse contexto, o papel dessas zonas como fontes secundárias é especialmente crítico em plumas estabilizadas, na qual a contribuição de fontes primárias pode já estar reduzida ou mesmo eliminada.

Hadley *et al.* (2012) enfatizam que a identificação e compreensão dessas zonas de baixa permeabilidade são essenciais para o correto dimensionamento de um dano ambiental. Sem essa análise, os esforços de remediação podem subestimar a persistência da contaminação, levando a estratégias ineficazes e subótimas, ou seja, pode controlar parte da contaminação, mas não resolver o problema completamente. Portanto, reconhecer a influência dessas zonas no comportamento das plumas dissolvidas é uma condição *sine qua non* para atingir os objetivos pretendidos na remediação.

Partindo deste pressuposto, fica demonstrada a relevância de compreender a taxa de transferência de massa em subsuperfície, além de identificar a trajetória da pluma ao longo do tempo (Kresic *et al.* 2012 *apud* Riyis, 2019). Sob essa perspectiva, e retornando à discussão sobre o modelo conceptual, é possível complementar com a necessidade de responder às seguintes incertezas (ITRC, 2015):

- i. Onde está predominantemente localizada a contaminação?
- ii. Por onde é transportada?
- iii. A massa adsorvida ou residual em zonas de baixa permeabilidade está se dissolvendo ou difundindo-se em zonas mais permeáveis podendo gerar uma pluma expansiva ou persistente?

Com o objetivo de responder a estas incertezas, Sale *et al.* (2011) introduziu o modelo de 14 compartimentos, recomendado pelo ITRC (2015). Trata-se de uma ferramenta que auxilia uma visão holística das liberações de etenos clorados, uma vez que identifica as fases, tanto em zonas de baixa permeabilidade, como em zonas transmissivas, nas quais os etenos clorados ocorrem como fontes e como plumas. Esse modelo contribui para especificar a zona na qual estão os contaminantes nos vários compartimentos subterrâneos, indicando onde há transferência de massa. Um exemplo bastante comum são os dados de qualidade da água provenientes de monitorização de piezômetros, que fornecem uma compreensão da fase dissolvida em zonas transmissivas. No entanto, estes dados fornecem pouca ou nenhuma informação

sobre zonas de baixa permeabilidade ou de fases sorvidas em zonas transmissivas (Marquardt *et al.* 2014).

Essa concepção é ilustrada pela Figura 6.3.1.2 que, apresenta o modelo dos 14 compartimentos para etenos clorados e representa a distribuição destes contaminantes entre os compartimentos. O DNAPL está presente somente nas áreas fontes por isso é identificado como não aplicável (NA) nas plumas.

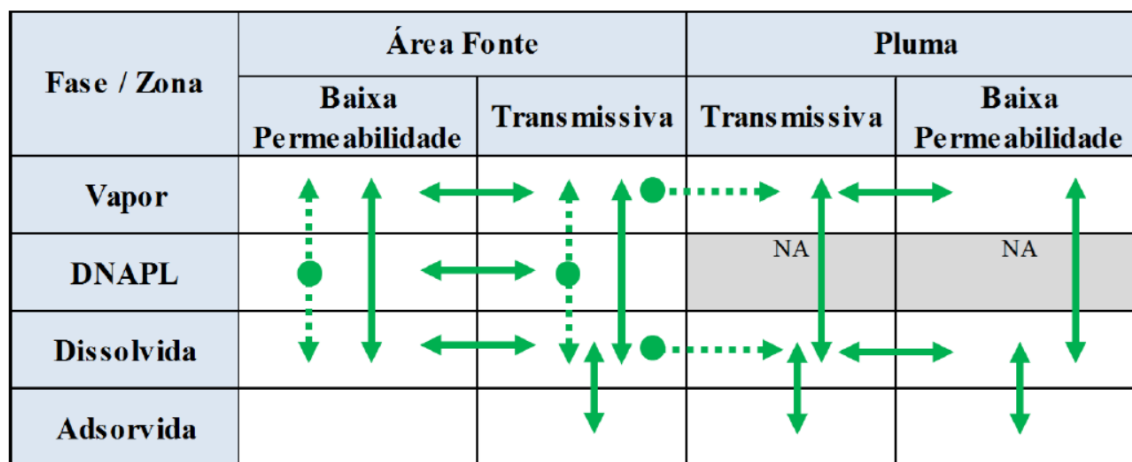


Figura 6.3.1.2: Modelo dos 14 compartimentos para distribuição de etenos clorados

Fonte: Vanderkooy *et al.* (2014)

As flechas no modelo de 14 compartimentos representam os fluxos de transporte ou as transformações dos etenos clorados entre os compartimentos. Cada flecha indica um processo que ocorre, determinando como os contaminantes se movem ou se transformam no ambiente. Flechas a cheio representam fluxos reversíveis; flechas a tracejado, fluxos irreversíveis.

Na fase inicial, o problema principal está na própria fase livre (DNAPL), na zona mais transmissiva da área fonte. Nesta fase a contaminação move-se da fonte para os compartimentos adjacentes. Há uma distribuição moderada de massa do contaminante nas fases vapor, dissolvida e adsorvida na zona transmissiva da área fonte e baixa em todas as fases nas zonas de baixa permeabilidade da área fonte. As plumas ainda são insignificantes fora da área fonte neste estágio inicial.

Durante um estágio intermediário, o problema continua na zona mais transmissiva da área fonte, estendendo-se pelas 4 fases (DNAPL, vapor, dissolvida e adsorvida). Neste estágio, as zonas de baixa permeabilidade da área fonte e as plumas de vapor, fase dissolvida e adsorvida apresentam contaminações moderadas. Num estágio mais avançado, a presença de DNAPL é quase nula, assim como a presença de vapor, destacando-se as plumas de fase

dissolvida e adsorvida e nas zonas de baixa permeabilidade da área fonte (Kueper *et al.* 2014; Vanderkooy *et al.* 2014). A Tabela 6.3.1.1 apresenta a distribuição dos etenos clorados de acordo com o estágio de contaminação.

Inicial	Área fonte		Plumas	
Zona/Fase	Baixa permeabilidade	Transmissiva	Baixa permeabilidade	Transmissiva
Vapor	Baixa	Moderada	Baixa	Baixa
DNAPL	Baixa	Alta		
Dissolvida	Baixa	Moderada	Baixa	Baixa
Adsorvida	Baixa	Moderada	Baixa	Baixa
Intermediário	Área fonte		Plumas	
Zona/Fase	Baixa permeabilidade	Transmissiva	Baixa permeabilidade	Transmissiva
Vapor	Moderada	Alta	Moderada	Moderada
DNAPL	Moderada	Alta		
Dissolvida	Moderada	Alta	Moderada	Moderada
Adsorvida	Moderada	Alta	Moderada	Moderada
Avançado	Área fonte		Plumas	
Zona/Fase	Baixa permeabilidade	Transmissiva	Baixa permeabilidade	Transmissiva
Vapor	Baixa	Moderada	Moderada	Baixa
DNAPL	Baixa	Baixa		
Dissolvida	Alta	Moderada	Moderada	Alta
Adsorvida	Alta	Moderada	Moderada	Alta

Tabela 6.3.1.1. - Distribuição dos etenos clorados de acordo com o estágio de contaminação, Inicial, Intermédio e Avançado.

Fonte: Kueper *et al.* (2014); Vanderkooy *et al.* (2014).

Conhecer o comportamento em cada uma das fases em subsuperfície é extremamente importante para orientar as investigações e a seleção de alternativas de remediação. Por exemplo, uma contaminação avançada pode estar atuando na pluma de fase dissolvida com altas concentrações, porém as zonas de baixa permeabilidade da área fonte ainda podem fornecer nova massa de contaminante, realimentando a pluma de fase dissolvida durante ou após a sua remediação e dificultar a reabilitação da área (Kueper *et al.* 2014; Vanderkooy *et al.* 2014).

Ao atingir a zona saturada, os etenos clorados podem continuar a migrar verticalmente por gravidade, mas esta migração também é influenciada pela heterogeneidade da matriz e pela massa de contaminante em deslocamento pois, para que ocorra migração, é necessário

que a pressão hidrostática exercida pelo contaminante seja maior do que as forças capilares que retêm água entre as paredes dos poros da matriz (Ferreira, 2018). Ou seja, a pressão capilar é inversamente proporcional à granulometria do meio (e.g. baixa para areias e alta, para siltes e argilas). Ademais, na zona saturada, a alta pressão capilar existente em poros pequenos pode dificultar, ou até impedir o deslocamento do DNAPL, que então tende a mover-se através dos poros saturados maiores (Soares, 2023). Detalhes sobre como mensurar propriedades físicas que interferem no deslocamento do DNAPL podem ser obtidas em Lyman *et al.* (1990), Mercer *et al.* (1990) e Agaoglu *et al.* (2015).

Nesse cenário, a migração vertical do contaminante continua até atingir uma camada de baixa permeabilidade, como um solo argiloso, e, ao longo do deslocamento, o produto deixa uma fase residual que se imobiliza entre os poros. Esta fase residual atua como fonte secundária reabastecendo a pluma de fase dissolvida ao longo do tempo (Pankow *et al.* 1996; Fetter, 2018, *apud* Ferreira, 2018). Segundo Bertolo (2017), os valores observados para o coeficiente de partição entre o carbono orgânico do solo e a água (Koc) indicam uma baixa tendência destes compostos a serem absorvidos pela matriz, o que leva a uma facilidade de migração destes contaminantes (Bersch, 2022).

A fase separada é imiscível ou parcialmente miscível e pode ser encontrada em fase livre ou residual, e a fração do espaço poroso preenchido com DNAPL (saturação de poro) de dimensão suficiente para que o DNAPL seja contínuo, interconectado. Com o passar do tempo, o DNAPL pode ser esgotado por drenagem, dissolução e/ou volatilização, processos que reduzem a saturação de DNAPL e transformam as vias de fluxo contínuo em bolhas descontínuas, formando a fase residual (Wilson *et al.* 1990).

Segundo Soares (2023), todo o DNAPL será transferido para as fases dissolvida, vapor e sorvida, o que faz com que a natureza dos problemas associados ao transporte do DNAPL em meio poroso mude com o passar do tempo. Um exemplo comum em meios heterogêneos é o DNAPL presente na zona saturada ocupar preferencialmente os poros maiores, originando a formação de “piscinas”.

A fase dissolvida é gerada pela partição de DNAPL em água subterrânea, quando os seus constituintes são dissolvidos. A mobilidade das plumas de contaminação resultantes depende das condições hidrogeológicas do meio e é influenciada por processos como advecção, dispersão, difusão e degradação. Em zonas de fluxo, especialmente em porções mais arenosas do aquífero, o transporte advectivo pode formar plumas que se estendem por grandes distâncias. Durante esse percurso, os contaminantes dissolvidos podem ser retidos por sorção ou

sofrer difusão em camadas de baixa permeabilidade. Esse armazenamento por difusão na matriz do solo é um mecanismo importante de aparente atenuação de contaminantes nas águas subterrâneas, conhecido como "*back diffusion*", uma das principais razões para remediações malsucedidas, pois os contaminantes armazenados podem ser libertados de volta para a água subterrânea, prolongando a contaminação.

A sorção refere-se à interação de contaminantes com a matriz porosa do aquífero e pode ocorrer por adsorção, quando ocorre acúmulo de contaminantes na superfície das partículas sólidas do solo ou por absorção quando ocorre a incorporação dos contaminantes na estrutura interna das partículas do solo. As reações de sorção tendem a reduzir a concentração de contaminantes na fase dissolvida, retardando seu transporte no aquífero e influenciando a eficácia das estratégias de remediação.

De todas as propriedades, a sorção de contaminantes é a que mais interfere no transporte dos contaminantes no meio subterrâneo, uma vez que resulta numa redução na velocidade de transporte dos contaminantes dissolvidos. Assim, o coeficiente de partição é um dos parâmetros mais relevantes para compreensão desse transporte, pois indica a transferência de massa entre a fase sólida e a fase líquida.

Tanto o DNAPL sorvido nos poros da zona não saturada como o presente na fase dissolvida, pode particionar para a fase vapor, sendo transportado por difusão, e com o aumento da humidade há também o aumento da tortuosidade do fluxo, quando o transporte pode passar a ocorrer por advecção (Sale *et al.* 2011). A transferência de massa do DNAPL para fase vapor é descrita pela Lei de Raoult e a partição dos componentes da fase dissolvida para a fase vapor é regida pela Lei de Henry.

Relativamente à volatilidade dos etenos clorados, Ferreira (2018) considera que há uma tendência de aumento com a perda de cloro, enquanto a tendência à adsorção tende a diminuir, o que torna os compostos com menos cloro mais móveis no aquífero.

A ocorrência de cada situação depende das:

- i. das propriedades físico-químicas do contaminante como solubilidade, polaridade e carga elétrica;
- ii. da composição da fase sólida, incluindo a presença de minerais de argila e matéria orgânica; e

- iii. das propriedades do fluido circundante: como pH, temperatura e composição iônica.

Compreender a distribuição das fases dos contaminantes no solo é fundamental para a tomada de decisões eficazes na caracterização e remediação de sítios contaminados. Essa compreensão permite a seleção de ferramentas e técnicas mais adequadas para cada situação específica, aumentando a eficiência das estratégias de remediação.

6.3.2 Mecanismo de transporte de hidrocarbonetos alifáticos clorados em meio poroso

A eficácia das intervenções para reabilitação de um sítio contaminado está associada diretamente ao conhecimento das características hidrogeológicas, as características dos DNAPLs e as propriedades físico-químicas em subsuperfície que governam o transporte e destino dos contaminantes. Nesse sentido, o principal desafio na determinação do modelo de dispersão e transporte de contaminantes é compreender a natureza heterogênea dos aquíferos bem como os processos bioquímicos e geoquímicos que afetam a interação do contaminantes com o meio.

Como referido anteriormente, os etenos clorados podem particionar em 4 fases distintas e o transporte desses contaminantes nessas fases pode ser agrupado em duas categorias:

- i. processos de transporte: advecção, difusão e dispersão; e
- ii. processos químicos de transferência de massa: volatilização, sorção e dissolução e biodegradação (Sharma *et al.* 2004).

O transporte de contaminantes em subsuperfície ocorre em duas zonas distintas e com comportamentos distintos: a zona não-saturada e a zona saturada. A zona não saturada, também conhecida como zona de aeração ou vadosa, estende-se desde a superfície do solo até a franja capilar. Nessa região, os poros do solo contêm tanto ar quanto água, resultando em pressões negativas nos poros, o que reduz a condutividade hidráulica em comparação com solos saturados. A zona saturada, por sua vez, situa-se abaixo da franja capilar e é caracterizada por poros completamente preenchidos por água. Além disso, a zona não saturada apresenta maior atividade microbiana devido à maior disponibilidade de oxigênio e matéria orgânica, o que influencia os processos de degradação de contaminantes (Haest *et al.* 2010).

Quando um contaminante atinge a superfície do solo, ele infiltra e durante a sua percolação é adsorvido, alterado quimicamente e/ou degradado pela ação de microrganismos, até atingir a água subterrânea. Na zona não saturada, os contaminantes estão particionados em:

fase livre, fase gasosa, fase adsorvida nos grãos do solo e fase dissolvida na água intersticial. Nesta zona, podem ocorrer os processos de volatilização, adsorção, dispersão, advecção e/ou decaimento.

A volatilização caracteriza o particionamento do contaminante entre as fases líquida e gasosa, sendo função da pressão de vapor e da solubilidade; a adsorção representa o particionamento do contaminante entre a fase dissolvida na água intersticial e adsorvida nos grãos do solo; a dispersão corresponde à soma dos efeitos de difusão molecular e dispersão mecânica, que ocorre em função da variabilidade da velocidade de migração através dos poros, que gera espalhamento; a advecção caracteriza a percolação do contaminante através do solo e; o decaimento, a redução de concentração de contaminante ao longo do tempo, devido às reações de decomposição química e/ou degradação biológica (Cetesb, 2001).

Ao atingir a zona saturada, os contaminantes estão sujeitos à advecção, difusão molecular, adsorção e decaimento e, são transportados através dos fluxos advectivo e difusivo para outras regiões.

O principal mecanismo de transporte de contaminantes na zona saturada é a advecção, e seu fluxo é regido pela lei de Darcy, onde a velocidade de fluxo é proporcional ao gradiente hidráulico (Domenico *et al.* 1997). Esse mecanismo ocorre por meio do fluxo do próprio fluido. Nesses casos, as características da matriz, como a rugosidade, distância entre os poros e tortuosidade do caminho tem influência direta na dispersão da fase dissolvida (Ferreira, 2018).

A migração por difusão molecular, refere-se ao movimento de contaminantes devido a um gradiente de concentração, ou seja, os contaminantes dissolvidos na água deslocam-se de uma área de maior concentração para uma área de menor concentração, e esse processo só cessa quando entrar em equilíbrio. Trata-se de um mecanismo de transporte lento, pois requer o alcance da condição de equilíbrio, mas apresenta relevância significativa em áreas de menor permeabilidade, como solos argilosos e/ou fraturas (Wiedemeier *et al.* 1999). Importa referir que o transporte por difusão molecular ocorre independentemente da velocidade de infiltração e da direção de escoamento, podendo ocorrer na direção oposta ao fluxo (Sharma *et al.* 2004).

Nesse tipo de migração, os principais parâmetros a serem estudados são: densidade, pressão de vapor, solubilidade e viscosidade. A densidade e a viscosidade representam variáveis importantes na medição da capacidade do solo de transmitir água - condutividade

hidráulica do solo. À medida que a densidade aumenta, a facilidade de transmissão do líquido no meio poroso também aumenta. Por outro lado, em relação à viscosidade, com o aumento da resistência do fluido em escoar, mais energia é requerida e menor é a condutividade hidráulica (Schifino, 2015).

A pressão de vapor, é a propriedade que mede a tendência de volatilização de um composto, e quanto menor a pressão de vapor, maior é a volatilização. Nos etenos clorados, os compostos maiores têm pressão de vapor menor e, conseqüente, alta volatilidade. Em relação à solubilidade de um composto é a medida da máxima concentração desse composto que se dissolverá em água, a uma determinada temperatura, e está diretamente relacionada ao transporte de contaminantes em meios porosos. A solubilidade é considerada umas das propriedades mais relevantes no processo de migração de contaminante no solo.

A respeito das propriedades físico-químicas dos etenos clorados como pressão de vapor (PV), constante de Henry (KH), ponto de ebulição (PE), coeficientes de partição (octanol/água – Kow, carbono orgânico/água – Koc) e distribuição (Kd), solubilidade em água (S), densidade (d), peso molecular (PM) e viscosidade, Minnich (1993) afirma que, as propriedades físicas (como tamanho das partículas, porosidade, humidade, densidade aparente e condutividade hidráulica), químicas (carbono orgânico total, capacidade de troca catiónica, pH) e biológicas (cobertura vegetal, micro-organismos, bactérias, fungos, cianobactérias, entre outros) do solo, além dos fatores externos do ambiente como temperatura, humidade e pressão, afetam diretamente as concentrações e a retenção de compostos orgânicos voláteis na matriz do solo (Amaral *et al.* 2020).

6.4 Degradação de hidrocarbonetos alifáticos em meio poroso

As três principais formas de atenuação dos etenos clorados são a dissolução, a volatilização e a biodegradação. Estes mecanismos são influenciados pelas propriedades físico-químicas dos etenos clorados, bem como pelas propriedades do meio, e a partição ocorre até que sejam atingidas condições de equilíbrio químico, conforme referido anteriormente.

O processo de dissolução refere-se à partição entre a fase aquosa e o contaminante em fase separada e, a propriedade que descreve essa partição é a solubilidade (S). Quando a concentração na fase dissolvida é inferior ao que seria esperado em condições de equilíbrio, o contaminante presente em fase separada dissolve-se até que o equilíbrio seja atingido ou até a fase separada seja extinta. Neste processo, o coeficiente de partição Kow, definido como a

razão das concentrações de equilíbrio, é uma medida da hidrofobicidade do composto (Cetesb, 2023).

O processo de volatilização ocorre quando o contaminante particiona para a fase gasosa nas zonas não saturada e saturada. A tendência de volatilização é governada pela pressão de vapor e a constante de Henry. A pressão de vapor, indica a tendência de evaporação de uma substância, e a constante da Lei de Henry descreve a partição entre a fase dissolvida e a fase vapor, portanto, quanto maior a constante de Henry mais volátil é o composto (Cetesb, 2023).

Nesta tese, tomar-se-á como foco a biodegradação, um processo natural em que os microrganismos presentes no solo degradam os contaminantes em outros compostos menos tóxicos, como dióxido de carbono e água, gerando uma redução da massa de contaminantes e retardando a velocidade de migração da frente da pluma (Fitts, 2015).

Segundo Freeze *et al.* (1979) as principais reações envolvidas no processo de biodegradação são oxidação, redução, desalogenação e hidrólise. Quando os microrganismos utilizam o oxigênio para o seu metabolismo, a biodegradação é aeróbia, do contrário, é anaeróbia, e as bactérias podem usar ainda azoto, ferro (III), manganês (IV), sulfato, carbonato como aceptores de elétrons para oxidar a matéria orgânica.

As reações de oxidação (perda de elétrons) e de redução (ganho de elétrons), ocorrem devido ao estado de oxidação de cada contaminante e resultam na mudança da valência dos elementos. Conhecer o estado de oxidação do carbono em cada composto é importante para compreender a sua tendência de degradação. No ambiente, essas reações podem ser controladas por microrganismos que agem como catalisadores, e obtêm energia através da oxidação de compostos orgânicos, hidrogênio ou formas reduzidas inorgânicas de ferro, azoto e enxofre. Para que estas reações ocorram, são necessários recetores de elétrons, como o oxigênio em ambientes aeróbios, e azoto, sulfatos e dióxido de carbono em condições anaeróbias (Freeze *et al.* 1979).

Os hidrocarbonetos alifáticos clorados, nomeadamente o PCE e o TCE, possuem alto grau de oxidação devido à quantidade de átomos de cloro nas suas moléculas. Quanto maior a quantidade de átomos de cloro, menor será a probabilidade de degradação em ambientes aeróbios, assim como compostos com menor grau de cloração tendem a ser menos degradados em ambientes anaeróbios (Morrison *et al.* 2013; Cunha, 2010). Segundo Bersch (2022), os etenos clorados com três e quatro átomos de cloro não degradam por oxidação biológica direta,

estando mais suscetíveis a sofrer redução (Bersch, 2022). Portanto, os compostos situados no final da cadeia de decloração redutiva tendem a degradar por oxidação (Bertolo, 2017; Wiedemeier *et al*, 1999), conforme ilustrado na Figura 6.4.1 que indica a facilidade de ocorrência da decloração redutiva em cada etapa.

O que se observa é que, a partir do dicloroetano (DCE), a taxa de degradação tende a diminuir, resultando em um acúmulo maior de produtos intermediários, como o cloreto de vinilo (CV), no ambiente. A solubilidade do CV em água é relativamente baixa, o que influencia sua mobilidade e persistência no solo e nas águas subterrâneas. Além disso, a degradação do CV ocorre lentamente em condições anaeróbicas, especialmente em sedimentos e águas subterrâneas, contribuindo para sua persistência no ambiente. Esses fatores ressaltam a importância de monitorar e gerenciar cuidadosamente os locais contaminados por esses compostos, devido aos riscos ambientais e à saúde pública associados.

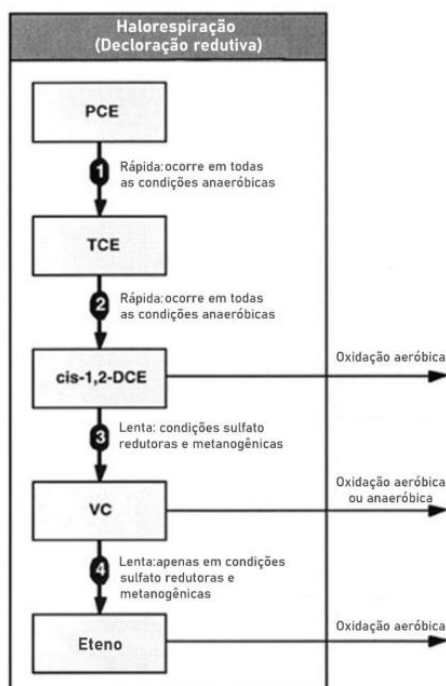


Figura 6.4.1 – Sequência de reações em etenos clorados

Fonte: Adaptado de USEPA (1998)

Portanto, deve ter-se em conta que, os etenos clorados não são suscetíveis a processos oxidativos aeróbicos, devido ao seu caráter oxidante, ficando restritos a processos anaeróbicos, seja por processos químicos ou biológicos (USEPA, 1998).

A via de degradação biológica preferencial dos etenos clorados é por decloração redutiva anaeróbica, na qual os contaminantes sofrem redução química, ou seja, são recetores de elétrons e oxidam outra substância. Entretanto, para que a reação ocorra o ambiente deve ser

fortemente anaeróbico, com baixo potencial oxirredução, ausência de oxigênio livre e de íons azoto dissolvidos (Wiedemeier *et al*, 1999).

Segundo Mazzuco (2004), na presença de muitos recetores de eletrões, os microorganismos tendem a utilizar inicialmente os compostos que menos gastam energia ao serem consumidos, tendo como preferência a ordem: $O_2 > NO_3^- > Mn^{4+} > Fe^{3+} > SO_4^{2-} > CO_2$. A Figura 6.4.2. ilustra o consumo de acetores finais de eletrões.

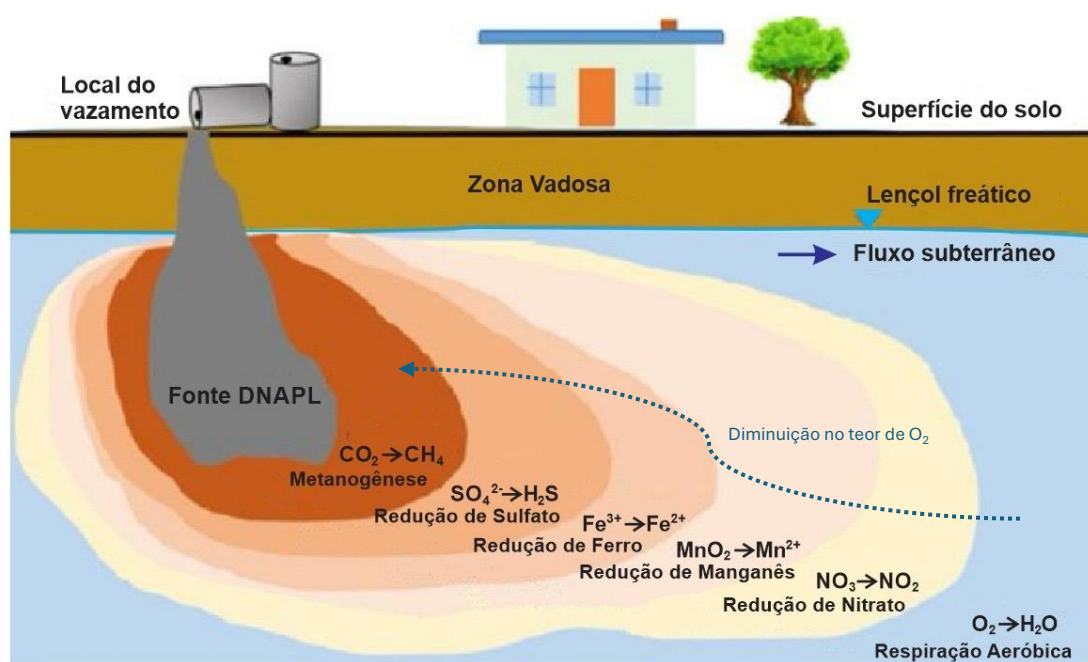


Figura 6.4.2: Indicadores de consumo de acetores finais de eletrões
Fonte: Rabus et al. (1998)

Na redução microbiana do NO_3^- para N_2 o azoto serve como recetor terminal de eletrões quando ocorre a oxidação de um eteno clorado, e o gás nitrogenado (N_2) é o composto final. Essa redução do azoto só ocorre em concentrações baixas de oxigênio (Mazzuco, 2004), em temperaturas próximas dos $24^\circ C$ e em pH entre 6,6 e 7,5 (Barnes *et al*. 1983).

Após o oxigênio e o nitrato serem reduzidos, o Fe^{3+} passa a ser usado como recetor de eletrões, no processo chamado redução férrica. Para que essa redução ocorra, é necessário que o teor de oxigênio esteja abaixo de 0,5 mg e o valor do pH em torno de 7 (Barros, 2001). A redução férrica em subsuperfície é um processo lento, quando comparada com a degradação sob circunstâncias aeróbicas e de desnitrificação. No entanto, é um processo de extrema importância, devido a sua elevada biodisponibilidade no ambiente subterrâneo. O aumento na concentração de Fe (II) é um forte indicativo da degradação dos contaminantes (Mazzuco,

2004). Tanto o aumento na concentração de Fe (II) quanto a diminuição de azoto indicam um ambiente anaeróbico. Segundo Mariano (2006), o declínio do potencial de oxirredução (Eh), de valores positivos para negativos, reflete a mudança de condições oxidantes (favoráveis aos microrganismos aeróbios) para condições redutoras (melhores condições aos processos anaeróbios) (Queiroz *et al.* 2007).

Após a redução da disponibilidade de oxigênio dissolvido, do azoto e do Fe (III) no aquífero, passa a ocorrer a redução do sulfato que começa a ser usado como recetor de eletrões. Esse processo, chamado de sulfato-redução, resulta na produção de sulfeto. O decaimento na produção de sulfato e o surgimento de sulfeto no aquífero são usados como indicadores da degradação anaeróbica (Mazzuco, 2004; Queiroz *et al.* 2007).

Tendo esgotado o sulfato começa a ocorrer a metanogénese, que é o processo no qual o dióxido de carbono e os contaminantes são usados como recetores de eletrões e, como resultado, é gerado gás metano. Nesse momento, inicia-se a biodegradação dos etenos clorados. Os microrganismos que realizam a metanogénese atuam em pH entre 6,6 e 7,4 e valores negativos de Eh (Metcalf *et al.* 2003).

A Tabela 6.4.1 apresenta os parâmetros analíticos para avaliação de ocorrência de degradação anaeróbica, indicando as concentrações mínimas necessárias de cada parâmetro para que ocorra a oxidação. No caso dos etenos clorados, quando utilizados como recetor de eletrões, são inicialmente reduzidos a subprodutos menos clorados para posteriormente serem utilizados como acetores de eletrões ou oxidados (USEPA, 2004; Queiroz *et al.* 2007).

Análise	Concentração na zona contaminada
Oxigênio	>5 mg/L
Azoto	<1 mg/L
Ferro II	>1 mg/L
Sulfato	<20 mg/L
Sulfito	>1 mg/L
Metano	<5 mg/L

Tabela 6.4.1. Parâmetros analíticos da degradação anaeróbica

Fonte: Queiroz *et al.* 2007.

Conforme referido anteriormente, para que os microrganismos realizem a biodegradação são necessárias algumas condições físico-químicas específicas, como temperatura, pH, humidade e oxigênio dissolvido. A temperatura é um fator relevante, pois a velocidade das reações metabólicas tende a aumentar com a sua elevação e, assim, os microrganismos degradam mais rápido os contaminantes. A faixa ideal de temperatura situa-se entre 20 e 30°C e, para o pH, o ideal é neutro ou próximo de neutro. Porém pode ocorrer um aumento devido ao

consumo de prótons durante a redução do ferro ou do azoto. Os microrganismos podem manter as suas funções metabólicas até valores de pH entre 5 e 9 (Mesquita, 2004).

Um terceiro fator é a humidade, determinante para a sobrevivência de bactérias no solo. Na estiagem, elas podem sobreviver entre 3 e 7 dias e em solos com alta capacidade de retenção de água, como os solos argilosos, a sobrevivência desses organismos pode ser superior a 42 dias (Burbarelli, 2004; Queiroz *et al.* 2007). O quarto fator é disponibilidade de oxigénio dissolvido (OD) que determina se os processos de degradação serão aeróbios ou anaeróbios (Mariano, 2006). Por fim, o potencial de oxirredução (Eh) influencia os tipos de reações bioquímicas que ocorrem no ambiente, afetando diretamente a atividade microbiana (Queiroz *et al.* 2007).

A Tabela 6.4.2 demonstra os processos oxidativos e seus respectivos valores de potencial de oxirredução.

Potencial de oxirredução	
Processos oxidativos	Eh* (V)
Respiração aeróbica	805
Denitrificação	708
Redução férrica	-118
Sulfatização	-278
Decloração redutiva	-552
Metanogénese	-259

Tabela 6.4.2. Relação entre processo oxidativo e potencial de oxirredução (Eh)

*Dados referentes a valores orientadores da USEPA (1998)

O processo de degradação de etenos clorados em ambiente anaeróbico só tem início após a metanogénese, pois os microrganismos são incapazes de utilizar o PCE e o TCE como substratos primários (doadores de eletrões), mas conseguem utilizar etenos clorados menos oxidados como o cloreto de vinilo (USEPA, 1998).

Esse processo é caracterizado por uma via sequencial de decloração redutiva, na qual ocorre substituição de átomos de cloro por átomos de hidrogénio (USEPA, 1998). Quando todos os recetores de eletrões estiverem esgotados, algumas bactérias passam a usar moléculas orgânicas tanto como recetores, quanto como doadores de eletrões pela via metabólica de fermentação.

A degradação começa com o tetracloroetano (PCE), quando ocorre a substituição de um átomo de cloro por um átomo de hidrogénio e a formação de tricloroetano (TCE). Esse composto por sua vez é transformado em cis-1,2, dicloroetano (1,2-DCE), que é posteriormente

transformado em cloreto de vinila (CV), que por último é transformado em eteno, um composto não tóxico. A Figura 6.4.3. ilustra o processo de redução desses compostos.

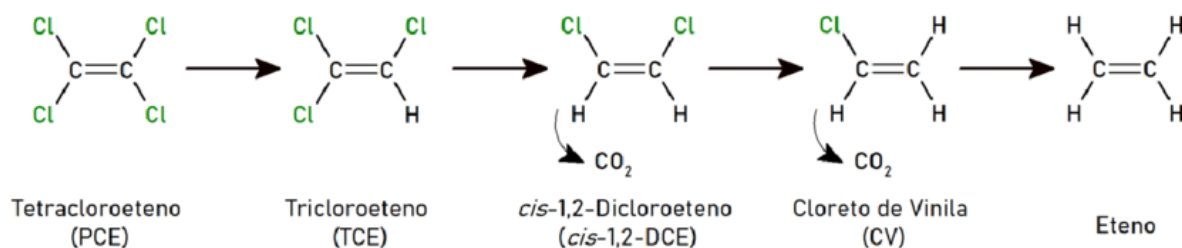


Figura 6.4.3. Processo de redução de compostos hidrocarbonetos alifáticos clorados.

Fonte: Leite (2020)

Essa sequência pode ser interrompida conforme as condições presentes no meio (USEPA, 1998). Ambientes anaeróbios redutores podem propiciar a degradação de PCE e TCE até DCE, mas podem ocasionar o acúmulo de CV (composto de maior toxicidade), já que a ausência de oxigênio no interior da pluma limitará sua degradação para eteno, seguido para dióxido de carbono e água (Suthersan *et al.* 2005).

Importa referir ainda que, apesar da possibilidade da biodegradação de etenos clorados até a sua completa mineralização, não são todas as áreas que apresentam características favoráveis ao desenvolvimento de microrganismos e, nesses casos, estudos indicam que a meia-vida desses contaminantes pode ser alta, na ordem de milhares de anos (USEPA,1998). Outra limitação é que, a biodegradação não ocorre em fase livre ou separada, primeiro, por ser um ambiente altamente hostil para a sobrevivência de microrganismos e, segundo, porque os requisitos básicos para proliferação microbológica são difíceis, se não impossíveis, de se manter (USEPA, 1998).

Reavendo os aspetos já referidos, os etenos clorados possuem forte grau de halogenação e por essa razão não são muito suscetíveis a processos aeróbicos. Nessa perspectiva, a concentração de hidrogênio (H) é utilizada para avaliar o potencial de oxirredução e, assim, caracterizar a eficiência de decloração redutiva, uma vez que, em baixas concentrações de hidrogênio, a decloração não é eficiente. Nesse sentido, o potencial de oxirredução (E_h) é uma característica essencial uma vez que, soluções com maior E_h , são mais propensas a oxidar e, soluções com menor E_h , são mais propensas a reduzir. Por outro lado, E_h positivo tem uma tendência para a oxidação aeróbica de etenos clorados, enquanto o E_h negativo, preferencialmente abaixo de -200 milivolts (mV) é mais favorável a decloração redutora (USEPA, 2013).

Resumidamente, o PCE é rapidamente reduzido em condições anaeróbicas, com a substituição de átomos de cloro, o que diminui o potencial oxidativo e exige condições cada vez mais redutoras para a sua biodegradação. Nesse contexto, a decloração reductiva do TCE para DCE ocorre em condições ferro-redutoras, enquanto o DCE é degradado a cloreto de vinilo (CV) em condições sulfato-redutoras. A redução do CV para eteno está associada a condições fortemente redutoras, tipicamente metanogénicas (Wiedemeier *et al.* 1999; Bradley, 2000).

A velocidade das reações na decloração reductiva sequencial também diminui à medida que mais átomos de cloro são removidos, o que muitas vezes resulta em decloração incompleta e no acúmulo de DCE e CV no aquífero (Bradley, 2000; USEPA, 1998). A Tabela 6.4.3 resume os processos de degradação dos etenos clorados.

Composto	Halorespiração	Oxidação aeróbica	Oxidação anaeróbica	Cometabolismo aeróbico	Cometabolismo anaeróbico
PCE	x				x
TCE	x			x	x
DCE	x	x	x	x	x
CV	x	x	x	x	x

Tabela 6.4.3. Processos de degradação dos etenos clorados

Fonte: USEPA (1998)

A biodegradação de compostos organoclorados, como o tetracloroeteno (PCE) e o tricloroeteno (TCE), é mais eficiente em condições redutoras, na qual esses compostos atuam como aceptores de elétrons, sendo progressivamente dehalogenados para formar subprodutos menos clorados, como o dicloroeteno (DCE) e o cloreto de vinilo (CV). No entanto, a remoção sequencial dos átomos de cloro diminui o potencial de oxirredução das moléculas, tornando o processo de degradação mais lento e exigindo ambientes com condições redutoras mais fortes para a completa mineralização dos subprodutos.

A dehalogenação incompleta pode levar ao acúmulo de intermediários como DCE e CV no aquífero, o que é preocupante, pois esses compostos, especialmente o CV, são altamente tóxicos e persistentes no ambiente. Portanto, é fundamental compreender os diferentes estágios das condições redutoras, como as fases ferro-redutoras, sulfato-redutoras e metanogénicas, para aplicar técnicas de remediação que promovam a completa degradação desses contaminantes

Concluindo esse raciocínio, surge a seguinte reflexão: como assegurar justiça na atribuição de responsabilidades por danos ambientais sem a aplicação de uma metodologia sólida e

amplamente reconhecida, capaz de garantir não apenas a reparação dos danos, mas também a proteção da comunidade contra os riscos invisíveis e muitas vezes subestimados?

Compreender o comportamento dos contaminantes em subsuperfície é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de remediação. A partir dessa base, exploraremos as metodologias mais avançadas para a obtenção de dados precisos e confiáveis, essenciais para a caracterização e tratamento de sítios contaminados.

6.5 Estado da arte na obtenção de dados em aquífero sedimentar

A caracterização de aquíferos sedimentares é um desafio técnico que exige metodologias avançadas para garantir a precisão na obtenção de dados hidrogeológicos. O estado da arte nessa área envolve o uso de técnicas modernas de investigação que permitem identificar a dinâmica das águas subterrâneas, avaliar a distribuição de contaminantes e determinar as propriedades físico-químicas dos sedimentos que compõem o meio aquífero. Métodos como a hidrogeoquímica aplicada, testes de bombeamento e a monitorização em alta resolução são amplamente utilizados para aprimorar a compreensão da estrutura e do comportamento desses sistemas. Além disso, a integração de modelos conceituais robustos com simulações numéricas tornou-se essencial para prever a evolução da contaminação e fundamentar estratégias de remediação mais eficazes.

A garantia da qualidade e confiabilidade dos dados periciais é fundamental para a integridade das investigações e decisões judiciais. Para assegurar essa qualidade, é essencial a adoção de métodos padronizados e cientificamente validados, que proporcionam uniformidade e precisão na obtenção e análise dos dados.

Nesse contexto, é essencial destacar as fragilidades e incertezas associadas às investigações de sítios contaminados, especialmente no que diz respeito às limitações da abordagem convencional. Muitas investigações focam predominantemente na fase dissolvida dos contaminantes, desconsiderando a fase adsorvida nos solos e a fase residual, que podem atuar como fontes secundárias de contaminação ao longo do tempo. Essa limitação metodológica compromete a precisão na caracterização da contaminação e subestima significativamente a contaminação real, comprometendo tanto a avaliação do risco para a saúde humana quanto a definição de estratégias eficazes de remediação. Além disso, a falta de integração entre diferentes técnicas de investigação, como perfis geoquímicos detalhados, modelagem hidrogeológica e

análises avançadas de transporte de contaminantes, amplia as incertezas e pode levar a falhas na tomada de decisão.

A negligência da fase adsorvida e residual é particularmente problemática porque esses contaminantes podem atuar como fontes secundárias de contaminação, libertando substâncias para a fase dissolvida ao longo do tempo, o que prolonga a contaminação e dificulta sua completa remediação. Além disso, não considerar esses aspectos pode resultar em decisões judiciais e administrativas baseadas em informações incompletas, impactando a responsabilização dos poluidores e mantendo, muitas vezes, o risco à saúde humana. Dessa forma, é imperativo que as investigações de sítios contaminados incorporem uma abordagem mais abrangente, que contemple todas as fases da contaminação, garantindo uma avaliação mais precisa da extensão do dano e promovendo soluções mais eficazes para a mitigação dos impactos ambientais.

Os modelos conceptuais desenvolvidos com base na abordagem tradicional, amplamente utilizada até o final do século XX, apresentam um baixo nível de detalhamento tanto na caracterização do meio físico quanto na distribuição dos contaminantes. Essa limitação decorre do facto de esses modelos serem construídos, predominantemente, a partir de concentrações obtidas por meio de piezômetros e da recolha de amostras até a franja capilar, sem considerar de forma abrangente as interações geoquímicas e os processos de transporte e retenção dos contaminantes em diferentes fases do solo e da água subterrânea (Riyis *et al.* 2015; Sale *et al.* 2013). Como consequência, essa abordagem pode subestimar a extensão real da contaminação e a persistência de fontes secundárias, comprometendo a eficácia da remediação.

A evolução dos métodos de investigação, com a incorporação de técnicas avançadas de perfilagem de contaminantes, sensores de alta resolução e modelagem tridimensional, tem demonstrado a importância de modelos mais precisos e integrados, capazes de representar de forma realista os mecanismos de dispersão e retenção dos contaminantes no meio.

Os piezômetros, conforme apontado por diversos estudiosos (e.g., Welty *et al.* 2016), não são a ferramenta mais adequada para a investigação de um sítio contaminado, pois sua função é a de monitorar os impactos na água subterrânea ao longo do tempo. Um dos principais desafios associados ao uso de piezômetros para caracterização de contaminação está relacionado ao comprimento da secção filtrante. Em Portugal, é comum que esses dispositivos sejam instalados com secções filtrantes longas, variando entre 3 e 6 metros ou mais, o que compromete a precisão dos dados obtidos.

O problema central dessa configuração é que a secção filtrante longa interceta múltiplas unidades hidroestratigráficas, resultando em medições que refletem uma média ponderada da condutividade hidráulica das diferentes camadas atravessadas, em vez de representar com exatidão a camada de interesse, como a zona de fluxo preferencial. Além disso, os filtros devem ser instalados de acordo com o objetivo da investigação. Nas zonas de fluxo, os filtros permitem monitorizar a dinâmica das águas subterrâneas, fornecendo informações sobre a direção e velocidade do fluxo, essenciais para a compreensão do transporte de contaminantes. Já nas zonas de armazenamento, a instalação de filtros possibilita a avaliação da capacidade de retenção e libertação de contaminante e possibilitar o cálculo da massa de contaminante no aquífero.

Além disso, a diluição das concentrações dos contaminantes devido à mistura de águas de diferentes camadas reduz a representatividade dos dados, mascarando a real extensão da contaminação e dificultando a definição de estratégias eficazes de remediação (Riyis, 2012). Essa limitação torna os piezômetros mais apropriados para fins de monitorização da qualidade da água subterrânea do que para a caracterização detalhada da contaminação. Como apontado por Sale *et al.* (2013), a caracterização eficaz de um sítio contaminado requer ferramentas de alta resolução, como amostradores discretos e perfilagem vertical, que permitam uma avaliação mais precisa da distribuição dos contaminantes e das propriedades hidrogeológicas do aquífero.

A recolha de amostras de água subterrânea é um procedimento complexo que envolve uma série de etapas rigorosas para garantir a representatividade e a confiabilidade dos dados obtidos. Contrariamente à ideia de que basta remover um volume de água do piezómetro, transferi-lo para um frasco e enviá-lo ao laboratório, a amostragem requer um protocolo bem definido para evitar contaminações cruzadas e garantir que os resultados reflitam com precisão as condições reais do aquífero. Diversos fatores influenciam a qualidade da amostra, incluindo a escolha da metodologia apropriada, o uso de equipamentos calibrados para medições *in situ* e a adoção de técnicas adequadas de filtragem e preservação da amostra ainda em campo.

Além disso, a integridade dos resultados depende do uso de consumíveis descartáveis para cada ponto de amostragem, da descontaminação rigorosa dos equipamentos não descartáveis e do correto manuseio, armazenamento e transporte das amostras até o laboratório. A negligência em qualquer uma dessas etapas pode comprometer a confiabilidade dos dados, afetando a interpretação dos níveis de contaminação e, conseqüentemente, as decisões relacionadas à remediação do sítio. Portanto, a capacitação técnica da equipa envolvida é

fundamental para assegurar que cada etapa do processo seja conduzida conforme os protocolos de boas práticas, minimizando incertezas e garantindo uma avaliação ambiental precisa e confiável.

Com base nessas premissas, é essencial destacar que a purga do piezômetro deve ser realizada por baixa vazão, um procedimento fundamental para garantir que a amostra recolhida seja representativa das condições reais do aquífero. A água estagnada dentro do piezômetro pode apresentar características físico-químicas distintas da água subterrânea em fluxo, devido a processos como oxirredução e interação com o material do próprio piezômetro. Portanto, a retirada controlada da água deve ser conduzida até que se atinja o equilíbrio dos principais parâmetros físico-químicos, incluindo pH, potencial de oxirredução (Eh), condutividade elétrica e oxigênio dissolvido.

Essa monitorização contínua deve ser realizada por meio de células de fluxo acopladas ao sistema de purga, permitindo a medição em tempo real dos parâmetros físico-químicos até que se estabilizem. Somente quando essa estabilidade for alcançada é que a amostra poderá ser considerada representativa do aquífero. O uso dessa abordagem reduz significativamente os riscos de viés nos dados, melhorando a confiabilidade da caracterização hidrogeoquímica e garantindo que as análises laboratoriais reflitam com precisão a qualidade da água subterrânea, sem interferências de processos artificiais induzidos pela amostragem.

Como premissa fundamental, deve-se considerar a sequência correta de recolha das amostras, iniciando pelo piezômetro com menor concentração de contaminantes e avançando gradativamente até aqueles com concentrações mais elevadas. Essa abordagem minimiza o risco de contaminação cruzada entre os pontos amostrados e assegura que os resultados reflitam com maior precisão as condições reais do aquífero. Além disso, a ordem de recolha é primordial para evitar interferências que possam comprometer a interpretação dos dados, garantindo que as concentrações registradas correspondam à distribuição real dos contaminantes no meio subterrâneo.

Após a recolha, as amostras devem ser devidamente preservadas com reagentes químicos específicos, conforme as orientações do laboratório responsável pelas análises. A correta preservação química assegura a estabilidade dos parâmetros a serem analisados, evitando reações químicas que possam alterar as concentrações dos compostos de interesse. Além disso, a refrigeração imediata é um requisito essencial para manter a integridade das amostras. As boas práticas indicam que as amostras devem ser armazenadas em gelo logo após a recolha e

mantidas a uma temperatura de 4 C (± 2 C) até sua chegada ao laboratório. O controle rigoroso dessas condições é indispensável para garantir a confiabilidade dos resultados analíticos e evitar degradações ou transformações químicas que possam comprometer a precisão das análises.

Para a caracterização ambiental, a escolha do método de perfuração deve priorizar a representatividade das amostras recolhidas, garantindo que reflitam com fidelidade as condições do meio subterrâneo. Amostras destinadas a análises ambientais não podem sofrer qualquer tipo de contaminação por fluidos de perfuração, incluindo água, ou serem submetidas a procedimentos que alterem suas propriedades químicas e físicas. O uso inadequado de fluidos pode comprometer a precisão dos dados, mascarando concentrações reais de contaminantes ou induzindo reações químicas que alterem os resultados das análises.

No caso específico dos etenos clorados, contaminantes altamente voláteis, a volatilização pode ser um fator crítico na perda de representatividade das amostras. O manuseio inadequado, como agitação excessiva, rebaixamento exagerado do nível d'água ou até mesmo a manipulação prolongada dentro do piezômetro, pode resultar na perda parcial ou total desses compostos. Para evitar essas interferências, é essencial adotar procedimentos rigorosos, como a recolha com dispositivos de amostragem de baixo fluxo, a vedação imediata das amostras em frascos apropriados e a minimização do tempo de exposição ao ar.

Os procedimentos de campo para a obtenção de amostras desempenham um papel decisivo na garantia da confiabilidade da caracterização do dano ambiental. Para assegurar a representatividade das amostras e evitar interferências nos resultados, é essencial que todas as etapas do processo sejam rigorosamente seguidas, desde a recolha até a chegada ao laboratório. Isso inclui a correta execução dos protocolos de recolha, manuseio, preservação, armazenamento e transporte, garantindo que as condições locais sejam fielmente refletidas nas análises laboratoriais.

A adoção de boas práticas minimiza a possibilidade de alterações químicas das amostras, seja por volatilização, biodegradação ou reações químicas indesejadas. Além disso, procedimentos rigorosos ajudam a identificar e prevenir contaminações cruzadas, que podem ocorrer tanto durante as atividades de campo quanto no trânsito das amostras. O uso de equipamentos descontaminados, consumíveis estéreis e técnicas adequadas de preservação, como refrigeração imediata e uso de reagentes estabilizantes, são medidas indispensáveis para garantir a precisão dos resultados e a confiabilidade na caracterização do impacto ambiental.

Durante todas as atividades de investigação em campo, é fundamental adotar medidas rigorosas para evitar a contaminação das matrizes amostradas, garantindo a confiabilidade dos dados obtidos. A principal fonte de contaminação das amostras ocorre por meio do contacto com equipamentos inadequadamente limpos, que podem transferir traços de contaminantes de um ponto de amostragem para outro, comprometendo a precisão dos resultados.

Para minimizar o risco de contaminação cruzada, é essencial que todos os equipamentos utilizados sejam devidamente descontaminados antes do início das atividades no local e entre cada ponto de amostragem. O processo de descontaminação deve seguir protocolos padronizados, incluindo a limpeza com detergentes neutros, enxague com água desionizada e a utilização de materiais descartáveis. Além disso, a equipa de campo deve ter formação para manusear os equipamentos de forma criteriosa, reduzindo a possibilidade de introdução acidental de contaminantes. Essas práticas são indispensáveis para assegurar a representatividade das amostras e a integridade das informações recolhidas, contribuindo para uma investigação ambiental confiável e de alta qualidade.

Um dos principais equívocos no planeamento da caracterização de um sítio contaminado é a ausência de amostras de solo recolhidas na zona saturada, especialmente em investigações que envolvem compostos orgânicos voláteis halogenados (COVH). A falta dessa etapa crítica compromete a construção do modelo conceptual, resultando em incertezas significativas que pode ter impacte direto na eficácia da reabilitação do local. Sem a correta quantificação da massa de contaminantes na fase vapor, na fase adsorvida e/ou residual, torna-se impossível estimar com precisão a extensão da contaminação e seu potencial de remobilização ao longo do tempo.

De acordo com Riyis (2019), a fração adsorvida e residual representa a maior parte da massa total de contaminantes orgânicos em um sítio contaminado. Dessa forma, quando essa caracterização é negligenciada, a estimativa da massa de contaminante pode ser severamente subestimada, resultando na seleção inadequada de estratégias de remediação e na possibilidade de recontaminação. A adoção de protocolos de investigação mais abrangentes, que incluam a recolha sistemática de amostras de solo na zona saturada, é fundamental para garantir um diagnóstico mais preciso e embasar decisões técnicas e jurídicas mais eficazes na gestão de sítios contaminados.

No caso do Brasil, a Lei do Estado de São Paulo nº 13.577/2009 (São Paulo, 2009) estabelece a obrigatoriedade da implementação de medidas de intervenção que priorizem a remoção

de massa de contaminantes, independentemente da fase em que se encontram. No entanto, a efetividade dessa exigência depende diretamente da qualidade da caracterização ambiental realizada no sítio contaminado. A principal questão que se coloca é: como remover a massa de contaminantes se a maior parte dela não foi devidamente identificada e quantificada?

Quando a caracterização ambiental é deficiente, o modelo conceptual torna-se impreciso, resultando em abordagens de remediação inadequadas ou ineficazes. Como demonstrado, grande parte da massa de contaminantes pode permanecer em formas menos evidentes, como adsorvida em solos de baixa permeabilidade ou acumulada em zonas de fluxo preferencial, dificultando sua remoção por métodos convencionais. Assim, antes da adoção de qualquer medida de intervenção, é fundamental garantir que a investigação do local seja conduzida de maneira criteriosa, utilizando técnicas avançadas de amostragem e análise, para que a estratégia de remoção de massa seja tecnicamente viável e alinhada com as melhores práticas internacionais de remediação.

Outra fragilidade crítica está relacionada ao manuseio inadequado das amostras, que, por vezes, são acondicionadas em sacos plásticos, onde se realiza a medição preliminar da concentração de compostos voláteis com equipamentos portáteis de fotoionização (PID). Posteriormente, essas amostras são transferidas para outro saco e, dias após a recolha, ainda podem ser manipuladas novamente para serem colocadas em frascos apropriados para análise laboratorial. A excessiva manipulação da amostra provoca uma perda significativa de compostos voláteis, comprometendo a precisão dos resultados analíticos. Por essa razão, esse método é amplamente desaconselhado por especialistas e pesquisadores quando o alvo da caracterização são os compostos orgânicos voláteis. Para garantir a integridade das amostras, é essencial adotar protocolos rigorosos de recolha, como o uso de amostradores herméticos e o acondicionamento imediato em frascos específicos, minimizando ao máximo a exposição ao ar e as perdas por volatilização.

Nessas circunstâncias, a recolha de uma amostra de solo para análise laboratorial de compostos voláteis, deve ser realizada utilizando um amostrador tubular (*liner*) descartável, garantindo a preservação da integridade da amostra e minimizando perdas por volatilização. A preparação e preservação da amostra devem ser realizadas imediatamente após a recolha, com a extração direta do solo do *linere* a adição de metanol como agente preservante, inibindo tanto a biodegradação quanto a perda de compostos voláteis durante o transporte e armazenamento (ABNT, 2015). Esse procedimento reduz significativamente as incertezas analíticas, garantindo que as concentrações detetadas no laboratório sejam representativas das condições do meio.

Além disso, é fundamental ressaltar que, para a caracterização de dano ambiental, é expressamente vedada a utilização de amostras compósitas, ou seja, a mistura de solos provenientes de diferentes profundidades ou pontos de amostragem. A combinação de amostras pode mascarar a variabilidade da contaminação no solo, diluindo ou concentrando artificialmente os compostos de interesse e comprometendo a precisão dos resultados analíticos.

O transporte das amostras de solo e de água subterrânea deve ser realizado de forma criteriosa, garantindo que cada matriz seja acondicionada em caixas de transporte separadas para evitar contaminação cruzada. Essa segregação é fundamental para preservar a integridade das amostras e assegurar que os resultados analíticos reflitam com precisão as condições reais do meio investigado. Além disso, as caixas térmicas utilizadas no transporte devem ser devidamente identificadas, lacradas e mantidas sob temperatura controlada, conforme exigido pelos protocolos de boas práticas laboratoriais. Outro aspecto essencial é a escolha do laboratório responsável pelas análises químicas, que deve ser acreditado pela norma ISO/IEC 17025, garantindo a rastreabilidade, confiabilidade e precisão dos resultados. Os métodos analíticos adotados devem possuir limites de quantificação adequados, ou seja, iguais ou inferiores aos valores de referência estabelecidos para cada parâmetro analisado. Esse critério é indispensável para assegurar que a detecção de contaminantes seja sensível o suficiente para avaliar conformidades ambientais e embasar decisões técnicas e jurídicas com maior precisão e segurança.

O modelo conceptual é uma ferramenta fundamental para atingir os objetivos na avaliação de um sítio contaminado. Por se tratar de um instrumento que descreve detalhadamente o transporte dos contaminantes até os recetores, sua função vai além da simples caracterização inicial, sendo essencial para o planejamento das próximas etapas da investigação, a interpretação contínua dos dados e a adaptação das estratégias adotadas. Como um modelo dinâmico, ele deve ser constantemente atualizado à medida que novos dados são obtidos, reduzindo incertezas e garantindo uma visão mais realista e integrada do comportamento dos contaminantes no meio físico. Além disso, o modelo conceptual permite a identificação de lacunas de dados e fontes de incerteza, auxiliando na definição de estratégias para preenchê-las de forma eficiente. Quanto mais completo e refinado estiver, maior será sua contribuição na seleção das melhores tecnologias de remediação e na tomada de decisões.

O estado da arte na obtenção de dados em aquíferos sedimentares está cada vez mais voltado para a integração de múltiplas técnicas e o uso de tecnologias de alta resolução para melhorar a precisão e eficiência das investigações. O avanço das técnicas de investigação tem

permitido uma compreensão mais precisa da estrutura hidrogeológica, da dinâmica do fluxo subterrâneo e da dispersão de contaminantes.

Compreendendo, então, as diretrizes essenciais para a realização de uma investigação ambiental voltada para a caracterização de danos, a próxima seção abordará os desafios técnicos frequentemente enfrentados na caracterização de sítios contaminados. A complexidade desses desafios exige uma abordagem multidisciplinar, na qual a integração de diferentes técnicas de investigação é fundamental para garantir um diagnóstico preciso e a seleção das estratégias de remediação mais eficazes.

Como resta demonstrado, a geoquímica desempenha um papel decisivo, pois permite entender a dinâmica dos contaminantes no meio, sua interação com os diferentes tipos de solo e com a água subterrânea, bem como os processos naturais que podem influenciar sua mobilidade e atenuação. O estudo detalhado das propriedades físico-químicas dos contaminantes, aliado à caracterização do meio geológico e hidrogeológico, é indispensável para a construção de modelos conceituais robustos. Esses modelos são essenciais para prever a evolução da contaminação ao longo do tempo e embasar decisões técnicas e jurídicas mais assertivas.

DESAFIOS TÉCNICOS NA CARACTERIZAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO

Conforme discutido nos capítulos anteriores, a caracterização da contaminação é um processo complexo e faseado, que abrange diversas etapas e técnicas para compreender detalhadamente a extensão e a natureza da contaminação. Diante da complexidade, é normal surgirem desafios que dificultem a obtenção dos dados, tais como a heterogeneidade do solo, a variabilidade espacial e temporal dos contaminantes, a presença de múltiplos contaminantes e as limitações das técnicas disponíveis. Além disso, fatores sociais, econômicos e regulatórios podem influenciar a eficácia das estratégias de remediação adotadas.

A caracterização precisa de um sítio contaminado é uma tarefa desafiadora que, mesmo em cenários de menor complexidade, depende da integração de múltiplos fatores. Qualquer incerteza que permaneça no modelo conceptual pode comprometer ou até inviabilizar o sucesso da remediação, prolongando exposição da comunidade a riscos e à degradação do meio físico. A compreensão imprecisa da extensão e natureza da contaminação pode resultar na aplicação de técnicas de remediação inadequadas ou insuficientes, reduzindo a eficácia do processo e gerando custos adicionais. Além disso, a variabilidade espacial dos contaminantes e a heterogeneidade do solo demandam abordagens investigativas adaptadas a cada caso, tornando essencial a elaboração de um modelo conceptual robusto e embasado em dados de alta qualidade.

De acordo com o ITRC - *Interstate Technology and Regulatory Council* (ITRC, 2017), os principais desafios técnicos na caracterização de sítios contaminados estão relacionados a:

- i. Condições geológicas: e.g. heterogeneidade geológica, presença rochas fraturadas e zonas de baixa permeabilidade que influenciam o transporte de contaminantes;
- ii. Condições hidrogeológicas: variação da velocidade de fluxo subterrâneo, flutuações sazonais do nível de água e a presença de contaminações em grandes profundidades;

- iii. Condições geoquímicas: condições geoquímicas extremas, como pH, alcalinidade e condições de oxirredução atípicas, além de temperaturas elevada ou muito baixas da água subterrânea;
- iv. Características dos contaminantes: presença de líquidos imiscíveis (NAPL), concentrações elevadas de contaminantes e mistura de substâncias químicas com diferentes comportamentos ambientais.; e
- v. Sítios de grande escala: Extensão espacial da contaminação, diversidade de receptores expostos e plumas extensas ou combinadas que dificultam a caracterização e remediação.

A seguir, serão discutidos em detalhes os principais desafios técnicos na caracterização de sítios contaminados, com foco na sua relevância para o desenvolvimento de estratégias de investigação e remediação.

7.1 Complexidade geológica

A geologia de um sítio contaminado é um fator determinante na escolha das estratégias investigativas e das tecnologias de remediação. Em terrenos com elevada complexidade geológica, a caracterização da contaminação torna-se mais desafiadora devido à heterogeneidade dos materiais, que pode incluir variações texturais, diferenças de permeabilidade e contrastes na composição mineral. Essas variações influenciam diretamente a dinâmica dos contaminantes, dificultando a definição de um modelo conceitual preciso.

A presença de fraturas em rochas e de zonas de baixa permeabilidade afeta significativamente a movimentação da água subterrânea e a migração de contaminantes. Materiais de baixa permeabilidade, como argilas e siltitos, podem atuar como barreiras que retardam ou interrompem o transporte de substâncias químicas. Já as rochas fraturadas podem acelerar a mobilidade dos contaminantes, criando caminhos preferenciais de fluxo. Essa complexidade impõe desafios na definição dos locais de amostragem e na modelagem da pluma de contaminação, uma vez que diferentes tipos de solos e rochas podem influenciar de maneiras distintas a dispersão e o armazenamento de contaminantes.

O desenvolvimento de um modelo conceptual eficaz em um cenário de geologia complexa, requer a integração de dados físicos, geoquímicos e hidrogeológicos para representar com precisão a interação entre os contaminantes e o meio geológico. Esse modelo deve incluir a porosidade e a permeabilidade do solo, bem como as características específicas das fraturas e zonas de baixa permeabilidade, que podem atuar tanto como reservatórios quanto como

barreiras para a migração dos contaminantes. Como resultado, a modelagem tridimensional torna-se uma ferramenta fundamental para prever a dispersão dos contaminantes e planejar as etapas de investigação e remediação.

A migração das substâncias na subsuperfície é um processo altamente não linear, condicionado pela heterogeneidade geológica e pelas interações químicas e físicas com os materiais do meio. Materiais como argilas e rochas de baixa permeabilidade possuem elevada capacidade de adsorção e retenção de contaminantes, dificultando sua mobilização e tornando a remediação mais desafiadora. Assim, a compreensão detalhada dessas interações é essencial para a construção de um modelo conceptual que forneça subsídios sólidos para a caracterização da contaminação e a definição das estratégias de mitigação mais adequadas.

7.2 Dinâmica hidrogeológica

Assim como as condições geológicas, as condições hidrogeológicas são complexas, devido à heterogeneidade e anisotropia dos aquíferos, dificultando a elaboração de um modelo conceptual robusto e representativo.

A hidrodinâmica do aquífero tem um papel fundamental na definição das estratégias de investigação e remediação. A variação da velocidade do fluxo subterrâneo e as flutuações sazonais do nível da água são fatores críticos que podem modificar a mobilidade dos contaminantes ao longo do tempo. Durante períodos de recarga, o aumento do fluxo pode dispersar os contaminantes, ampliando a área impactada. Em contrapartida, a rebaixamento do nível freático pode concentrar contaminantes na zona não saturada, alterando as interações geoquímicas no meio.

A baixa velocidade das águas subterrâneas prolonga o tempo necessário para que os objetivos de remediação sejam alcançados, enquanto proporcionem mais tempo para a adsorção de contaminantes nos sólidos do aquífero, e dificultam a dispersão dos contaminantes.

A flutuação dos níveis de água pode ter implicações significativas para a remoção de certos contaminantes, especialmente em casos de LNAPL. Quando os níveis das águas subterrâneas aumentam, esses contaminantes podem ser capturados abaixo do lençol freático, dificultando a sua remoção por técnicas convencionais. Isso exige a adaptação das estratégias de remediação para lidar com a dinâmica de migração e as flutuações dos níveis de água, tornando as soluções mais complexas e, muitas vezes, mais dispendiosas. O entendimento

aprofundado desses comportamentos hidrológicos é, portanto, fundamental para a construção de modelos conceituais robustos para o sucesso da remediação.

A presença de plumas contaminantes em grandes profundidades representa um desafio adicional, uma vez que a identificação e delimitação dessas plumas exigem metodologias avançadas de amostragem e monitorização. Métodos convencionais podem não ser suficientes para detectar e caracterizar adequadamente esses contaminantes, sendo necessária a utilização de técnicas de alta resolução, como a instalação de poços multívias.

7.3 Influência da geoquímica

A geoquímica do solo e das águas subterrâneas é específica para cada sítio, refletindo a complexidade das interações entre os contaminantes e os diferentes componentes do meio geológico. Variações na mineralogia do solo, na composição química das águas subterrâneas e na presença de materiais orgânicos e inorgânicos naturais influenciam diretamente os processos de transporte, atenuação e transformação dos contaminantes na subsuperfície.

Esses fatores controlam diretamente a mobilidade e a persistência das substâncias químicas, afetando a dinâmica da contaminação. Parâmetros como pH, alcalinidade, condições de oxirredução e temperatura da água subterrânea influenciam a solubilidade e a reatividade química das substâncias presentes no ambiente. Ambientes altamente ácidos ou alcalinos podem favorecer a dissolução ou precipitação de metais pesados, enquanto condições redutoras podem promover a mobilização dos hidrocarbonetos clorados.

A composição mineralógica do solo desempenha um papel fundamental na adsorção e na mobilidade dos contaminantes, influenciando diretamente sua persistência no ambiente. Minerais como argilas e óxidos de ferro apresentam alta capacidade de adsorção, o que pode resultar na retenção de substâncias químicas e, conseqüentemente, na limitação de sua migração. Da mesma forma, a presença de matéria orgânica no solo pode interagir com os contaminantes, afetando sua solubilidade e modulando os processos de degradação e transformação geoquímica. Essas interações influenciam significativamente o comportamento dos contaminantes na subsuperfície e devem ser cuidadosamente consideradas na elaboração de modelos conceituais e no planejamento das estratégias de remediação, garantindo abordagens mais eficazes e realistas para a mitigação dos impactos ambientais.

A composição química das águas subterrâneas exerce um papel determinante na mobilização e transformação dos contaminantes. Parâmetros geoquímicos, como pH, a

concentração de íons, potencial de oxirredução e a presença de espécies químicas redutoras ou oxidantes, influenciam diretamente os processos de atenuação natural, incluindo reações de oxidação-redução, precipitação-dissolução e adsorção-desorção. Essas interações podem alterar significativamente a biodisponibilidade e a reatividade dos contaminantes, influenciando sua persistência e potencial de dispersão no meio subterrâneo. Assim, a caracterização detalhada da química da água subterrânea é essencial para compreender os mecanismos de transporte e transformação dos contaminantes, fornecendo subsídios fundamentais para o modelo conceptual e para a seleção de estratégias de remediação mais eficazes.

Em locais que apresentam condições geoquímicas extremas—isto é, fora dos intervalos tipicamente observados em ambientes naturais—, a eficácia das tecnologias de remediação pode ser significativamente comprometida. Parâmetros como alcalinidade, pH, potencial de oxirredução (Eh), salinidade, condutividade elétrica, dureza da água e temperatura influenciam diretamente os processos físico-químicos e biológicos que governam o transporte, a transformação e a atenuação dos contaminantes. A variação extrema desses fatores pode afetar a solubilidade e a especiação química dos contaminantes, modificar a atividade microbiana envolvida na biodegradação e interferir na eficiência de reagentes utilizados em técnicas de remediação *in situ*.

A alcalinidade de um aquífero refere-se à sua capacidade de neutralizar ácidos, influenciando diretamente a estabilidade do pH e a dinâmica geoquímica do meio subterrâneo. Tanto valores elevados quanto reduzidos de alcalinidade podem aumentar a complexidade dos processos geoquímicos, impactando a mobilidade e a transformação dos contaminantes. Em aquíferos com alta alcalinidade, a fermentação de substratos orgânicos adicionados para estimular a biodegradação pode levar à geração de dióxido de carbono dissolvido em concentrações superiores ao seu limite de solubilidade. Esse fenômeno pode resultar na formação de bolhas ou vapores na zona saturada, comprometendo a eficiência da injeção de soluções remediadoras e reduzindo a condutividade hidráulica do meio (ITRC, 2017).

Por outro lado, aquíferos com baixa alcalinidade podem apresentar quedas acentuadas no pH, afetando significativamente os processos bioquímicos. No caso da degradação de solventes clorados, por exemplo, a eficiência da decloração redutiva biológica pode ser severamente comprometida quando o pH do meio subterrâneo cai abaixo de 6. Esse processo é mediado por diferentes grupos de bactérias, entre os quais *Dehalococcoides mccartyi* se destaca por sua capacidade de realizar a respiração organoclorada de forma altamente especializada. No ambiente natural, essa espécie anaeróbia estrita utiliza exclusivamente o hidrogênio

molecular (H_2) como doador de elétron para sua atividade metabólica, desempenhando um papel fundamental na transformação de compostos organoclorados em produtos menos tóxicos (Grostern *et al.*, 2005). Dessa forma, variações no pH podem não apenas inibir a atividade microbiana benéfica, mas também alterar a eficácia de estratégias de remediação baseadas na estimulação biológica.

Valores extremos de pH ou variações nas condições de oxirredução podem exercer um impacto significativo na biodisponibilidade e mobilidade dos contaminantes, interferindo na sua remoção ou degradação. Em ambientes altamente ácidos, determinados contaminantes podem apresentar maior solubilidade, o que favorece sua dispersão na fase aquosa. No entanto, nessas mesmas condições, os processos biológicos essenciais para a biorremediação podem ser severamente inibidos, uma vez que a maioria dos microrganismos degradadores possui uma faixa restrita de pH para atividade metabólica eficiente.

Por outro lado, em meios com alta alcalinidade ou pH elevado, pode ocorrer a precipitação de contaminantes metálicos na forma de hidróxidos insolúveis, reduzindo sua mobilidade e, conseqüentemente, dificultando sua remoção por processos convencionais. Além disso, em ambientes alcalinos, certos contaminantes orgânicos podem sofrer transformações geoquímicas que resultam na formação de produtos de degradação mais persistentes ou recalcitrantes, comprometendo a eficácia das estratégias de remediação.

A salinidade e a condutividade elétrica são parâmetros geoquímicos fundamentais que podem influenciar significativamente a eficácia das estratégias de remediação em aquíferos contaminados. Em ambientes com alta salinidade, a mobilidade dos contaminantes pode ser alterada devido à intensa competição entre os íons dissolvidos e os contaminantes pelos sítios de adsorção na matriz sólida do solo. Esse fenômeno pode reduzir a disponibilidade dos contaminantes na fase aquosa, dificultando sua remoção por processos tradicionais. Além disso, a presença de elevadas concentrações de sais pode modificar a solubilidade de determinados compostos, promovendo sua precipitação ou, inversamente, aumentando sua dissolução e mobilidade em meio aquoso.

A condutividade elétrica, que reflete a concentração de íons dissolvidos na água subterrânea, também exerce um papel crítico na eficiência de algumas técnicas de remediação. Métodos baseados em processos eletrocinéticos, como a eletroremediação, dependem diretamente da mobilidade iônica para promover a remoção de contaminantes. Alterações na condutividade elétrica do meio podem comprometer a eficiência desses processos, reduzindo a taxa de transporte dos contaminantes e limitando a eficácia da técnica aplicada. Assim, a

caracterização detalhada da salinidade e da condutividade elétrica do aquífero é essencial para o planejamento e a implementação de estratégias de remediação adequadas às condições geoquímicas locais.

A temperatura das águas subterrâneas exerce influência direta sobre as taxas cinéticas das reações químicas e sobre a atividade metabólica dos microrganismos envolvidos nos processos de biodegradação. Em sistemas físico-químicos, variações extremas de temperatura podem modificar significativamente a dinâmica dos contaminantes no meio subterrâneo. O aumento da temperatura pode intensificar reações de oxidação química, promovendo, por exemplo, a hidrólise de etanos clorados, compostos notoriamente recalcitrantes à biodegradação. Além disso, técnicas de remediação térmica baseiam-se no aquecimento controlado do meio para induzir processos de volatilização, dessorção e destruição *in situ* de contaminantes orgânicos persistentes. Entretanto, elevações abruptas na temperatura podem alterar os mecanismos de fluxo e transporte dos contaminantes, modificando gradientes hidráulicos e influenciando processos como sorção e dessorção, o que pode complicar a previsibilidade dos modelos conceituais de contaminação (ITRC, 2017).

Por outro lado, temperaturas reduzidas tendem a desacelerar as taxas de reações químicas e biológicas, o que pode comprometer a eficácia de tecnologias de remediação baseadas em injeção de reagentes, uma vez que essas técnicas dependem de interações reativas para a degradação ou imobilização dos contaminantes. Quando combinadas a fatores como plumas contaminantes de grande extensão ou contaminação em profundidade, temperaturas mais baixas podem prolongar substancialmente o tempo necessário para a remediação, limitar as opções tecnológicas disponíveis e aumentar os custos operacionais do processo (ITRC, 2017). Dessa forma, a temperatura deve ser considerada um parâmetro geoquímico essencial na definição de estratégias de remediação ambiental, exigindo a adaptação dos métodos utilizados às condições térmicas específicas do aquífero em estudo.

A dureza da água subterrânea representa um fator geoquímico relevante, particularmente em ambientes caracterizados por elevadas concentrações de íons cálcio e magnésio. A presença desses íons pode impactar significativamente processos de remediação que envolvem a complexação química, como o uso de agentes quelantes na mobilização e remoção de metais pesados. Em sistemas de tratamento *in situ*, a dureza pode favorecer a precipitação de compostos insolúveis, reduzindo a biodisponibilidade de determinados reagentes e, conseqüentemente, comprometendo a eficácia das tecnologias empregadas.

Dessa forma, ambientes com condições geoquímicas extremas frequentemente demandam abordagens remediadoras mais sofisticadas. A adaptação de tecnologias específicas ou a integração de diferentes estratégias de remediação pode ser necessária para superar as limitações impostas pela geoquímica local. Nesse contexto, a caracterização detalhada da geoquímica torna-se essencial, pois permite a seleção e o ajuste das estratégias remediadoras às condições ambientais específicas, maximizando sua eficiência e viabilidade operacional.

7.4 Características dos Contaminantes

A natureza dos contaminantes exerce influência direta nos desafios associados à caracterização da contaminação, exigindo abordagens diferenciadas conforme suas propriedades físico-químicas. A presença de NAPLs (*Non-Aqueous Phase Liquids*) introduz um nível adicional de complexidade, uma vez que esses compostos podem formar fases livres que migram independentemente da água subterrânea, acumulando-se em zonas de baixa permeabilidade e atuando como fontes contínuas de contaminação.

Os DNAPLs, devido à sua densidade superior à da água subterrânea, tendem a migrar para profundidades maiores, infiltrando-se em camadas de baixa permeabilidade, como argilas e fraturas rochosas saturadas. Nesses ambientes, podem permanecer retidos por longos períodos, difundindo-se lentamente para camadas mais permeáveis e alimentando plumas persistentes de contaminação. Esse fenômeno, conhecido como retrodifusão (*back diffusion*), dificulta a remoção completa dos contaminantes e prolonga os impactos ambientais. Além disso, a baixa solubilidade dos DNAPLs favorece a manutenção de concentrações elevadas na fase dissolvida, representando um passivo ambiental de longa duração que pode persistir por décadas ou até mesmo séculos (ITRC, 2011).

Os desafios técnicos associados à contaminação por DNAPLs são amplamente reconhecidos e detalhados na Estratégia Integrada para Sítios Contaminados por DNAPLs do *Inters-tate Technology and Regulatory Council* (ITRC, 2011) e pelo *National Research Council* (NRC, 2013). Um dos principais desafios está na heterogeneidade da distribuição da massa contaminante, que pode resultar na retrodifusão de compostos adsorvidos na matriz do solo para a água subterrânea. Esse fenômeno ocorre mesmo após a implementação de estratégias de remediação inicial, dificultando a caracterização precisa da contaminação e prolongando a persistência das plumas subterrâneas.

As zonas de baixa permeabilidade representam um desafio significativo na remediação de DNAPLs, pois sua capacidade de reter contaminantes por adsorção e difusão reversa

dificulta a remoção eficiente desses compostos. Como resultado, essas regiões atuam como fontes secundárias de contaminação, liberando gradualmente os contaminantes para camadas mais permeáveis e perpetuando a contaminação. Para lidar com esse cenário, é essencial a adoção de técnicas avançadas de investigação, como a instalação de poços multiníveis, sensores de alta resolução e perfilagens geoquímicas detalhadas. Essas metodologias permitem uma caracterização mais precisa da distribuição dos contaminantes e subsidiam a definição de estratégias de remediação mais eficazes (ITRC, 2017).

Além disso, a migração de contaminantes na fase gasosa requer métodos avançados de amostragem e monitoramento, dada a volatilidade dos compostos envolvidos e seu potencial de intrusão em ambientes fechados. A volatilização de contaminantes, como hidrocarbonetos leves e solventes clorados, pode resultar na formação de vapores tóxicos que se acumulam em espaços confinados, representando riscos à saúde humana. A avaliação da intrusão de vapores, portanto, é um componente essencial da caracterização de áreas contaminadas, exigindo o uso de medições diretas de concentrações no ar do solo e modelagens de fluxo de vapores.

Outro desafio significativo na caracterização e remediação de sítios contaminados é a presença de misturas complexas de contaminantes, nas quais compostos com diferentes propriedades físico-químicas interagem, influenciando sua mobilidade, persistência e transformação no ambiente. A coexistência de metais pesados, solventes orgânicos e hidrocarbonetos de petróleo pode gerar efeitos sinérgicos ou antagonistas, modificando tanto o comportamento dos contaminantes individuais quanto os processos naturais de atenuação. Essas interações podem aumentar a toxicidade global do meio contaminado e dificultar a escolha de estratégias de remediação eficazes, uma vez que alguns compostos podem inibir a degradação de outros ou competir por sítios de adsorção no solo e sedimentos.

Além disso, a presença simultânea de compostos solúveis e não solúveis, como DNAPLs e metais, pode resultar na formação de fases residuais estáveis, prolongando a persistência da contaminação e aumentando os desafios técnicos na remoção desses contaminantes. Assim, a investigação detalhada das interações entre os contaminantes presentes é essencial para a definição de abordagens integradas que maximizem a eficiência das estratégias de remediação e minimizem os impactos ambientais a longo prazo.

7.5 Escala e extensão da contaminação

A extensão da contaminação é um dos desafios técnicos mais complexos na caracterização de sítios contaminados, influenciando diretamente a definição das estratégias de investigação e remediação. Áreas de grande extensão demandam um volume significativo de dados para garantir uma caracterização precisa, tornando essencial o uso de ferramentas avançadas de modelagem e interpolação geoespacial. Métodos como a modelagem tridimensional de fluxo e transporte de contaminantes permitem avaliar a dispersão ao longo do tempo e prever sua evolução em diferentes cenários hidrogeológicos.

Além disso, a proximidade da fonte contaminante com áreas urbanizadas, corpos hídricos ou aquíferos utilizados para abastecimento público aumenta significativamente os riscos ambientais e sociais. Nessas situações, a avaliação de risco deve ser conduzida com rigor, considerando múltiplas vias de exposição e potenciais recetores. A integração de dados hidrogeológicos, geoquímicos e toxicológicos é essencial para garantir um diagnóstico completo e embasar a tomada de decisão, permitindo que as ações de mitigação sejam direcionadas de maneira eficiente, reduzindo os impactos ambientais e protegendo a saúde pública.

A complexidade e os custos inerentes de sítios contaminados de grande extensão impõem restrições significativas. Com o aumento da área impactada, os desafios técnicos e as incertezas associadas à caracterização e remediação tornam-se mais difíceis de gerir. Além disso, a presença de múltiplas fontes potenciais de contaminação agrava a complexidade do processo, exigindo estratégias mais robustas e um maior investimento de recursos.

7.6 Complexidade da contaminação

A complexidade de um sítio contaminado não está exclusivamente relacionada à sua dimensão, mas também à interação de múltiplos fatores que influenciam a dinâmica da contaminação e a viabilidade das estratégias de remediação. A presença de plumas extensas e misturadas, associadas a contaminantes com diferentes propriedades físico-químicas, pode dificultar a delimitação precisa das zonas de maior risco e a seleção das abordagens de mitigação adequadas.

A complexidade de sítios contaminados resulta da interação de diversos fatores que influenciam a distribuição, mobilidade e persistência dos contaminantes no meio ambiente. Entre os principais aspetos, destacam-se:

- **Localização e natureza da contaminação:** A distribuição espacial dos contaminantes é um fator determinante na definição das estratégias de investigação e remediação. Sítios localizados em áreas urbanas densamente povoadas ou próximos a corpos hídricos requerem abordagens diferenciadas, especialmente quando a pluma de contaminação se estende por múltiplos compartimentos ambientais. Além disso, a natureza química dos contaminantes influencia diretamente sua mobilidade e persistência no ambiente. Compostos com baixa solubilidade e alta sorção ao solo, por exemplo, podem formar fontes secundárias persistentes, dificultando sua remoção.
- **Profundidade da contaminação:** A profundidade em que os contaminantes se encontram impacta diretamente a viabilidade técnica e econômica das técnicas de remediação. Contaminações superficiais podem ser tratadas por métodos relativamente simples. No entanto, quando os contaminantes atingem grandes profundidades, sua remoção torna-se mais complexa, exigindo a aplicação de tecnologias *in situ*.
- **Número, tipo e proximidade dos recetores:** A presença de recetores próximos ao sítio contaminado, como populações humanas, ecossistemas sensíveis ou aquíferos de abastecimento, aumenta a complexidade do processo de avaliação de risco e tomada de decisão. Em locais onde há risco direto de exposição, pode ser necessário implementar medidas emergenciais de contenção para mitigar os impactos antes mesmo da conclusão das investigações detalhadas. Além disso, a avaliação do risco deve considerar os diferentes tipos de exposição, incluindo contato dérmico, inalação de vapores e ingestão de água contaminada.
- **Plumas misturadas:** A ocorrência de múltiplos contaminantes num mesmo sítio pode dificultar a escolha da técnica de remediação mais apropriada. Contaminantes orgânicos voláteis (VOCs) e metais pesados, por exemplo, exigem abordagens distintas, já que os processos de remediação que favorecem a degradação de compostos orgânicos podem não ser eficazes para a remoção de metais. Além disso, a presença de diferentes contaminantes pode resultar em interações químicas inesperadas, como a formação de subprodutos tóxicos durante a aplicação de tratamentos químicos ou biológicos. Dessa forma, a investigação deve ser conduzida de forma abrangente para identificar e quantificar todos os compostos presentes, garantindo que as estratégias adotadas sejam eficazes para a remediação completa do sítio.

A detecção e quantificação de contaminantes em diferentes fases (líquida, gasosa e sólida) representam desafios adicionais, que demandam o uso de técnicas específicas e de alta sensibilidade. A caracterização de NAPLs (*Non-Aqueous Phase Liquids*), por exemplo, é particularmente complexa em ambientes de baixa permeabilidade, onde os contaminantes podem permanecer retidos na matriz do solo, dificultando sua identificação e remediação. Além disso, a migração de contaminantes na fase gasosa exige métodos avançados de amostragem e monitorização, dada a volatilidade dos compostos envolvidos.

Ferramentas inovadoras, como amostragem passiva e sensores de monitorização em tempo real, vêm se destacando como alternativas promissoras para aprimorar a precisão da caracterização e o controle dos riscos ambientais. No entanto, essas tecnologias ainda não são amplamente implementadas em Portugal, o que limita a capacidade de obtenção de dados mais representativos e a adoção de estratégias mais eficazes para a gestão de sítios contaminados.

Os métodos de amostragem direta, como sondagens a trados, podem apresentar limitações significativas, especialmente em solos altamente compactados, em sítios de contaminação severa ou quando a investigação ocorre em grandes profundidades. Nessas condições, a obtenção de amostras representativas torna-se desafiadora, podendo comprometer a precisão da caracterização ambiental. Além disso, a possibilidade de contaminação cruzada durante a perfuração, recolha e manuseio das amostras representa um fator crítico, capaz de alterar a confiabilidade dos dados analíticos e dificultar a interpretação dos resultados. A adoção de boas práticas de amostragem, o uso de barreiras para evitar a migração de contaminantes entre camadas e a aplicação de técnicas indiretas complementares podem minimizar essas limitações e aumentar a robustez da investigação ambiental.

A compreensão dos processos de transporte, difusão e degradação dos contaminantes na subsuperfície é essencial para a avaliação dos impactos ambientais e para o desenvolvimento de estratégias de remediação eficazes. No entanto, a modelagem desses processos apresenta um elevado grau de complexidade, uma vez que envolve a interação dinâmica entre os contaminantes e as propriedades físico-químicas do solo. Essa complexidade demanda o uso de modelos geoquímicos avançados e técnicas sofisticadas de modelagem de fluxo e transporte de contaminantes. Entretanto, a calibração desses modelos representa um desafio significativo, frequentemente dificultado pela escassez de dados de alta qualidade e pela variabilidade espacial e temporal das condições ambientais do local investigado. Assim, a obtenção de um modelo representativo exige abordagens integradas, que combinem investigações

detalhadas de campo, ensaios laboratoriais e modelagem numérica para reduzir incertezas e melhorar a confiabilidade das previsões sobre o comportamento dos contaminantes.

Em Portugal, apesar dos avanços nas tecnologias de caracterização ambiental, a implementação dessas soluções ainda enfrenta desafios. Entre os principais obstáculos estão as restrições financeiras e a carência de infraestrutura especializada, que limitam a aplicação de técnicas inovadoras. Em muitas regiões, especialmente naquelas com histórico de atividades industriais ou contaminação difusa, os recursos destinados à gestão ambiental são insuficientes para suportar investigações mais aprofundadas. Como consequência, há uma forte dependência de abordagens convencionais, que, embora amplamente utilizadas, podem apresentar limitações em termos de eficácia na caracterização e remediação da contaminação. A ausência de investimentos direcionados para o aprimoramento das metodologias e a capacitação técnica das equipas envolvidas também contribui para a manutenção desse cenário, dificultando a adoção de estratégias mais avançadas e sustentáveis na gestão de sítios contaminados.

Para superar essas limitações, é fundamental adotar novas técnicas e investir na formação e capacitação dos profissionais envolvidos, garantindo uma abordagem mais eficaz. Nesse sentido, a caracterização de sítios contaminados deve ser realizada de forma abrangente e rigorosa, integrando novas tecnologias e modelos científicos avançados. A adoção de abordagens mais sofisticadas, como modelagem geoquímica, análises de risco detalhadas e técnicas avançadas de amostragem, é essencial para uma compreensão precisa da extensão e dos impactos da contaminação. Dessa forma, será possível desenvolver soluções de remediação mais eficazes e garantir a segurança e a saúde das populações afetadas.

O estado da arte na caracterização de sítios contaminados demonstra que a abordagem tradicional, frequentemente simplificada, já não é suficiente para lidar com a complexidade dos problemas ambientais contemporâneos. A proteção da saúde humana e dos ecossistemas exige uma análise detalhada e multidisciplinar, que vá além da mera identificação dos contaminantes, considerando também suas interações com o meio e os impactos de longo prazo.

Além disso, as metodologias empregadas devem ser cada vez mais precisas e adaptadas às particularidades de cada sítio, incorporando fatores como geologia, hidrologia e as propriedades físico-químicas dos solos e das águas subterrâneas. A simplificação excessiva desses processos pode levar à subestimação dos riscos envolvidos, comprometendo tanto a eficácia das estratégias de remediação quanto a segurança ambiental e a saúde pública.

CASO DE ESTUDO

Inicialmente, esta tese pretendia apresentar um caso de estudo localizado em território português. No entanto, a ausência de investigações conduzidas com base nas premissas metodológicas e científicas discutidas nos capítulos anteriores inviabilizou essa abordagem. Além disso, restrições associadas à confidencialidade de dados, ainda comuns em diversos estudos no país, representaram um obstáculo adicional à seleção de um caso adequado. Essas limitações reforçam a necessidade de maior transparência e padronização das práticas investigativas no contexto da gestão de sítios contaminados em Portugal.

Diante desse contexto, o caso de estudo selecionado baseia-se em uma investigação conduzida no Brasil, refletindo uma realizada frequentemente observado naquele país. Desde 1996, sucessivas investigações foram realizadas para a caracterização do dano ambiental no sítio em questão. No entanto, em 2017, o local ainda não havia sido reabilitado e continuava a representar riscos à saúde dos recetores expostos. Esse cenário decorre, principalmente, da não aplicação, até aquele momento, da metodologia proposta nesta tese. Somente em 2017, com o ajuizamento de uma Ação Civil Pública (ACP, 2016)³ pelo Ministério Público do Estado de São Paulo, foram adotadas medidas mais estruturadas para a gestão da contaminação e mitigação dos riscos ambientais e à saúde pública.

Em 2018, um novo responsável técnico assumiu a coordenação do caso, permanecendo à frente das investigações até o presente momento. A partir de então, os trabalhos passaram a ser conduzidos em conformidade com a metodologia defendida nesta tese. Os estudos anteriores não foram descartados, mas submetidos a uma análise crítica, com o objetivo de identificar lacunas e incertezas. Com base nessa revisão, as novas investigações foram planejadas e executadas de forma estruturada, garantindo maior consistência dos dados e aprofundamento na caracterização do sítio contaminado. A seguir, serão apresentadas as etapas e os resultados dessa abordagem aprimorada.

³ A Ação Civil Pública é um mecanismo do ordenamento jurídico brasileiro, voltado para a proteção de direitos coletivos e difusos, ou seja, aqueles que não pertencem a um único indivíduo, mas a grupos ou à sociedade como um todo.

8.1 Sítio de estudo

O local de estudo está situado em uma zona industrial que permaneceu sem ocupação até meados da década de 1950, quando teve início a instalação das primeiras indústrias na região. Até 1980, o sítio já estava completamente ocupado por empreendimentos industriais.

O sítio de estudo possui aproximadamente 101.500 m² e está localizada às margens do atual curso do Rio Pinheiros, no distrito industrial de Jurubatuba, município de São Paulo/SP, Brasil (Figura 8.1.1).

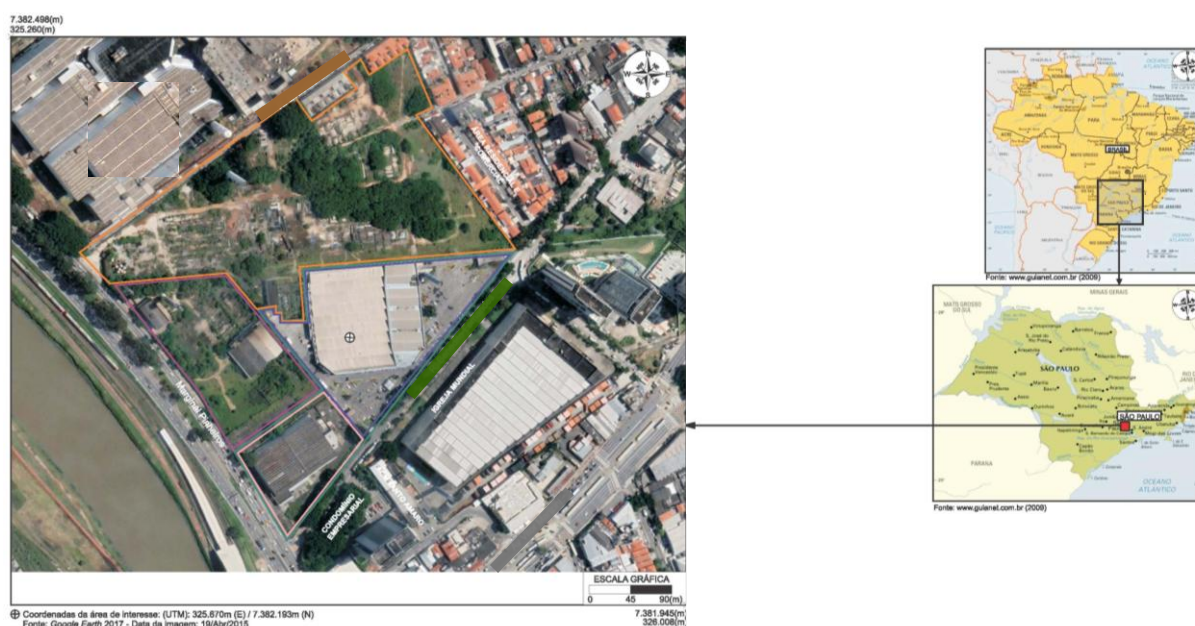


Figura 8.1.1. Localização do sítio investigado

Fonte: Cetesb, 2021

A empresa do setor automobilístico, com presença global em todos os continentes, operou no local entre 1957 e 2007.

A unidade fabril utilizou desengraxante organoclorados tetracloreto (PCE) e tricloroeteno (TCE) até 1996. Na unidade operava uma Estação de Tratamento de Águas Residuais Industriais (ETARI). Além disso, o local possuía seis tanques com capacidade de 15 m³ para o armazenamento de gasóleo, álcool e diesel, bem como uma área específica para o armazenamento de transformadores contendo óleo dielétrico com ascarel.

Os recetores existentes na envolvente foram identificados como sendo:

- A nordeste: zona comercial e residencial;
- A noroeste: zona industrial;
- A sudoeste: Rio Pinheiros;
- A sul: zona industrial e comercial.

8.1.1 Enquadramento geológico e hidrogeológico

A Região Metropolitana de São Paulo, onde se localiza o sítio de estudo, está inserida em terrenos sedimentares de idade Cenozóica que compõem a Bacia de São Paulo. Essa bacia é formada pelas unidades Resende, Tremembé e São Paulo (Grupo Taubaté), além da Formação Itaquaquetuba. A sequência estratigráfica é completada por depósitos aluvionares e coluvionares quaternários da planície fluvial do Rio Pinheiros. Esses depósitos fluviais apresentam uma granulometria variada, com sedimentos grosseiros na base, gradando para sedimentos mais finos, como siltes, argilas e turfas, no topo. Essas unidades sedimentares estão sobrepostas ao embasamento cristalino, composto predominantemente por rochas gnáissicas, micaxistos e migmatitos.

Em relação ao enquadramento geológico local, as informações obtidas a partir das sondagens indicam uma geologia altamente heterogênea, caracterizada pela alternância de camadas com diferentes granulometrias. Essa variabilidade reflete a dinâmica do ambiente deposicional fluvial, onde a energia do sistema influencia a deposição dos sedimentos. A heterogeneidade geológica observada sugere uma sequência estratigráfica composta por materiais de distintas origens e propriedades, o que pode impactar diretamente a migração e distribuição dos contaminantes no subsolo. Essas variações litológicas influenciam os processos de advecção, difusão e adsorção dos contaminantes, tornando primordial uma caracterização detalhada para o desenvolvimento de estratégias eficazes de remediação.

O perfil geológico do sítio apresenta as seguintes características principais, a partir da superfície do terreno:

Nível Raso:

- Aterro argilo-arenoso compactado;
- Areia fina a grossa, pouco argilosa.

Nível A:

- Argila orgânica plástica e húmida, com eventual presença de laminações com silte e areia fina;

- Seixos arredondados com matriz de textura arenosa e granulação média a grossa a areno-argilosa.

Nível B:

- Rocha alterada branda (RAM), com textura silte pouco arenosa, granulação fina a média.
- Rocha alterada dura, correspondente ao material impenetrável intercetado em algumas sondagens em diferentes profundidades.

Com base nessas informações foram traçados os perfis geológicos (Figuras 8.1.1.1. e 8.1.1.2) nas direções transversal e longitudinal do sentido de transporte dos contaminantes.

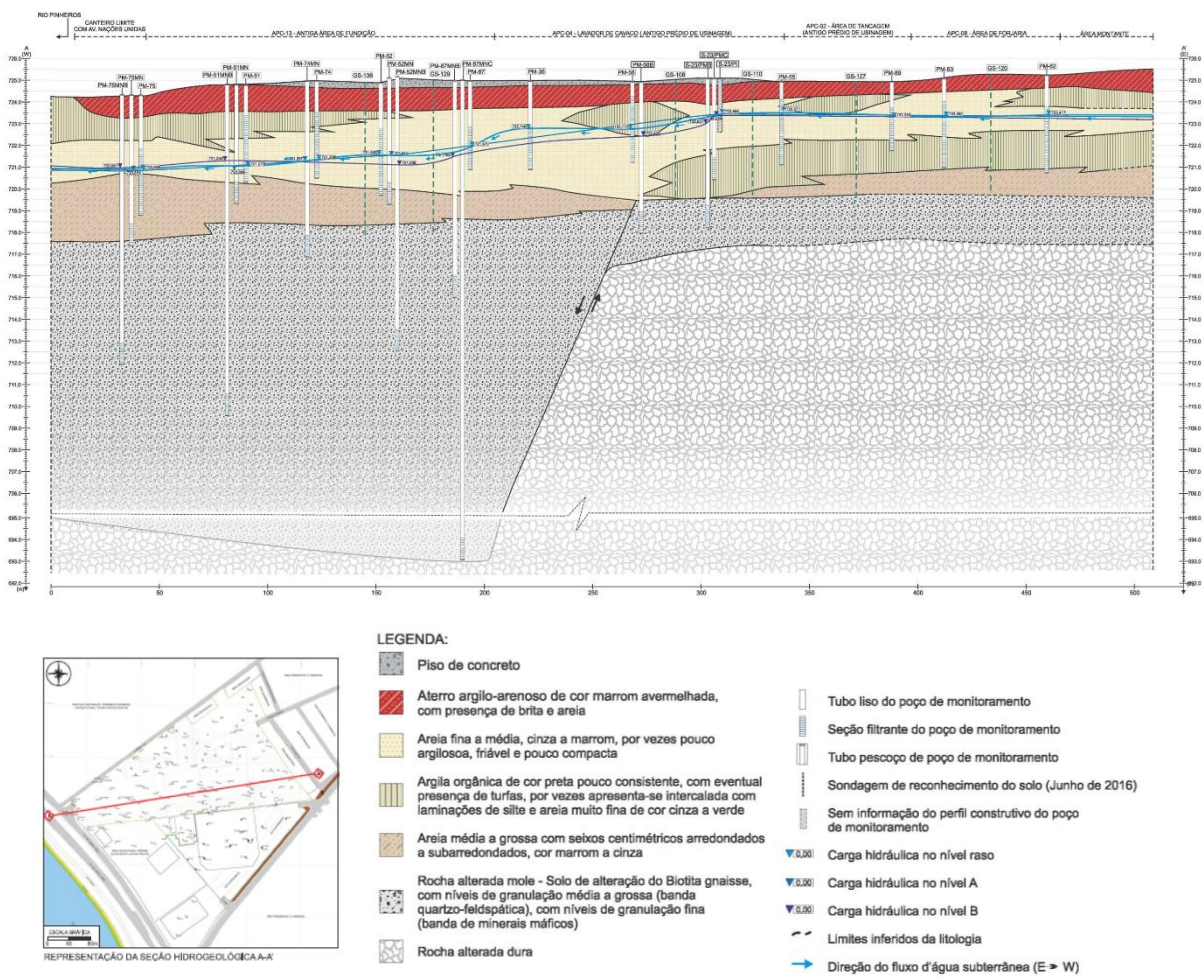


Figura 8.1.1.1.: Perfil geológico transversal A-A'
Fonte: ACP (2016)

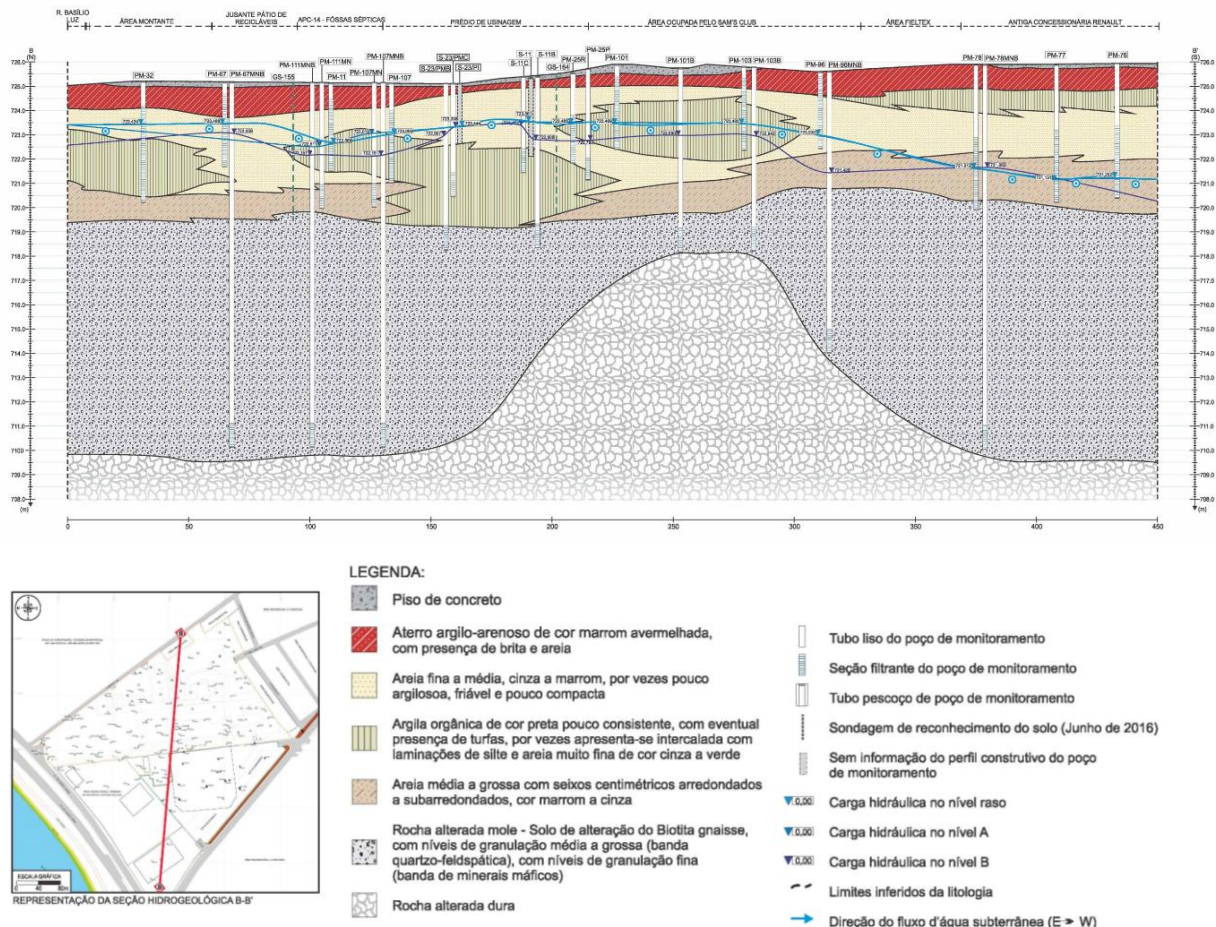


Figura 8.1.1.2: Perfil geológico longitudinal B-B'
Fonte: ACP (2016)

A alternância entre camadas de diferentes permeabilidades e granulometrias, típicas de um ambiente fluvial, gera um cenário geológico complexo, que influencia diretamente a dinâmica de migração de contaminantes. Este perfil geológico heterogêneo exige uma abordagem detalhada na modelagem do transporte de contaminantes e na escolha das técnicas adequadas tanto para investigação quanto para a remediação, levando em consideração as características específicas de cada camada e suas interações.

Em termos hidrogeológico, o sítio de estudo está inserido num contexto de retificação do leito originário do Rio Pinheiros, portanto, na planície de inundação, onde são previstas variações/inflexões significativas nas curvas equipotenciais, a depender do período do ano em que os dados são obtidos. A Figura 8.1.1.3 ilustra o traçado original e o traçado atual.

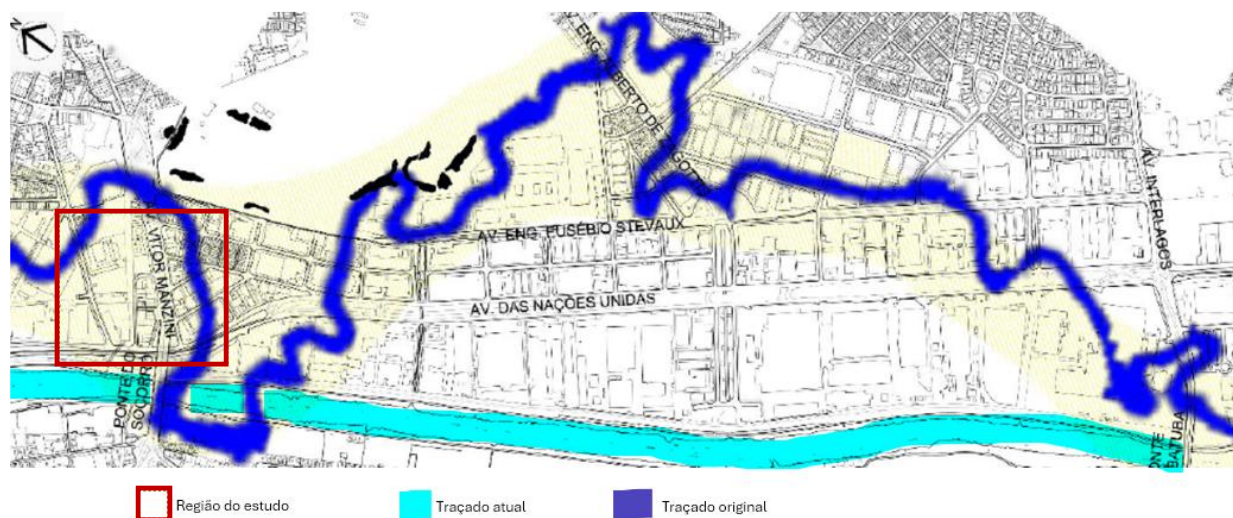


Figura 8.1.1.3: Antigo curso do Rio Pinheiros antes da retificação em 1940

Fonte: Damasio (2018)

8.2 Estudos ambientais realizados no local

Os estudos realizados englobam uma abordagem metodológica abrangente, incluindo sondagens, amostragem de águas subterrâneas, análises de solo e do vapor do solo, bem como a caracterização detalhada das fontes de contaminação. O principal objetivo dessa investigação é obter uma compreensão aprofundada do histórico de contaminação, identificando os contaminantes presentes, suas concentrações e distribuição espacial, além de avaliar os potenciais riscos para a saúde humana e o meio ambiente. Essa caracterização detalhada é essencial para fundamentar a escolha das técnicas de remediação mais eficazes, assegurando que as ações adotadas sejam direcionadas para mitigar os impactos ambientais de forma eficiente e sustentável.

A Figura 8.2.1 apresenta um cronograma detalhado das etapas de investigação e remediação realizadas no sítio, evidenciando a evolução do processo ao longo dos anos. Esse cronograma permite visualizar a progressão das atividades, destacando os marcos mais relevantes e a inter-relação entre as diferentes fases do estudo. A organização estruturada dessas informações possibilita uma análise crítica do desenvolvimento das ações implementadas e do seu impacto na gestão ambiental do sítio contaminado.

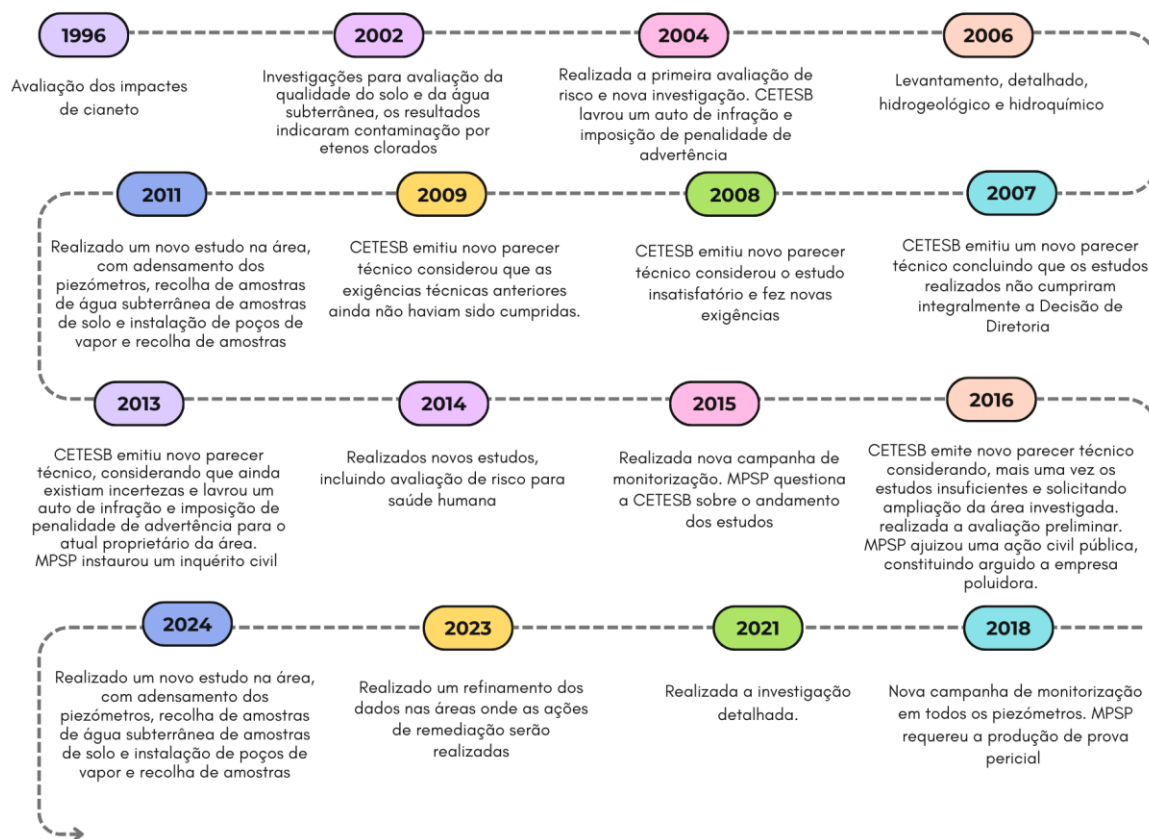


Figura 8.2.1. Cronograma dos estudos de investigação e remediação realizados

Os primeiros trabalhos de avaliação ambiental no sítio ocorreram em 1996, com o objetivo de avaliar os impactos causados pelo uso de cianetos no tratamento térmico das peças produzidas. Posteriormente, em 2002, foram conduzidas as primeiras investigações voltadas para a avaliação da qualidade do solo e da água subterrânea. Os resultados dessas investigações indicaram a presença de contaminação por hidrocarbonetos alifáticos clorados (PCE, TCE, DCE e CV). Em sequência, em 2004, foi realizada a primeira avaliação quantitativa de risco, a qual identificou um risco significativo para a saúde humana.

Importa referir que, identificar uma contaminação e avançar imediatamente para uma análise de risco, sem a devida caracterização detalhada do sítio, resulta em abordagens incompletas e ineficazes. Antes de avaliar os riscos, é imprescindível realizar uma investigação detalhada que contemple a caracterização integral do local. Essa investigação deve abranger a extensão da contaminação, a concentração dos contaminantes, suas vias de transporte, os receptores potenciais e os mecanismos de interação entre os contaminantes e o meio ambiente.

Tal como referido anteriormente, o dimensionamento adequado do dano ambiental é essencial para a construção de um modelo conceptual representativo e para a definição de

cenários realistas de exposição, que são a base para uma análise de risco precisa. A ausência dessas informações pode levar à subestimação dos riscos, comprometendo a tomada de decisões e reduzindo a eficácia das estratégias de remediação.

Com base nesses resultados, ainda em 2004, foi conduzida uma nova investigação com objetivo de aprimorar a caracterização da contaminação por hidrocarbonetos alifáticos clorados. Durante esse processo, foi identificada a presença tanto de fase livre (DNAPL), além de concentrações elevadas de contaminantes em fase dissolvida. A avaliação de vapores do solo não foi contemplada nesta etapa.

Os dados obtidos indicaram 15 áreas prioritárias para a delimitação das plumas de fase livre e fase dissolvida. Essas áreas foram definidas com base na distribuição espacial e na concentração dos contaminantes, visando direcionar as investigações e estratégias de remediação. As maiores concentrações detectadas para cada composto são apresentadas na Tabela 8.2.1.

Compostos	Concentrações	Valor de referência*
tetracloroetano	186.000 ug/L	40 ug/L
tricloroetano	8.225 ug/L	70 ug/L
cis-1,2-dicloroetano	29.725 ug/L	-
cloroeto de vinilo	não detetado	5 ug/L

Tabela 8.2.1 Resultados da investigação ambiental de 2004

*VR: Cetesb (2005)

Em 2006, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb), em conformidade com os preceitos legais brasileiros, lavrou um auto de infração e impôs uma penalidade de advertência à empresa responsável, em razão da constatação da contaminação do solo e das águas subterrâneas. A autuação reforçou a necessidade de aprofundamento das investigações ambientais no local, com o objetivo de dimensionar adequadamente o impacto da contaminação e definir medidas de mitigação. A partir desse momento, a empresa foi instada a conduzir estudos mais detalhados e a apresentar um plano de intervenção ambiental.

Em cumprimento às exigências da agência ambiental, foi conduzido um levantamento hidrogeológico e hidroquímico, visando aprimorar a compreensão da dinâmica dos contaminantes no local. Esse estudo incluiu a perfuração de 46 pontos e a instalação de 35 piezômetros, dos quais 11 foram multiníveis, uma medida essencial devido à natureza dos DNAPLs (*Non-Aqueous Phase Liquids*), que, por serem mais densos que a água, tendem a migrar para maiores profundidades e acumular-se em camadas de baixa permeabilidade.

Os filtros dos piezômetros foram instalados a profundidades variando entre 1 e 3 metros, considerando a configuração hidrogeológica do sítio. O nível médio da superfície piezométrica foi registrado em 1,27 metros, indicando um aquífero raso e suscetível à interação com contaminantes presentes na zona insaturada.

Foram recolhidas 61 amostras de água subterrânea para a análise de compostos orgânicos voláteis halogenados (COVHs), provenientes tanto dos 26 piezômetros previamente instalados quanto dos 35 novos. Durante a recolha, foram monitorizados os parâmetros físico-químicos pH e condutividade elétrica. A condutividade hidráulica calculada para o aquífero livre foi de $1,5 \times 10^{-4}$ cm/s, valor característico de áreas de várzea, onde a presença de sedimentos finos pode influenciar a permeabilidade do meio. A velocidade do fluxo da água subterrânea foi estimada em 7 m/ano para o aquífero livre e 24 m/ano para o aquífero semiconfinado, sugerindo um transporte relativamente lento dos contaminantes, mas suficiente para a formação e expansão de plumas contaminantes ao longo do tempo.

Embora as medições *in situ* de pH e condutividade elétrica sejam importantes para avaliar as condições geoquímicas básicas de um sítio contaminado, elas representam apenas uma parte do conjunto de dados necessários para uma caracterização ambiental completa. Parâmetros adicionais, como a concentração de oxigênio dissolvido, potencial de oxirredução e temperatura são fundamentais para compreender os processos de transporte e transformação dos contaminantes no ambiente. A ausência desses parâmetros limita a capacidade de interpretar adequadamente os mecanismos de interação entre os contaminantes e o meio poroso, dificultando a construção de um modelo conceptual robusto e comprometendo a eficácia das estratégias de remediação a serem adotadas.

Um aspeto relevante neste caso diz respeito ao cálculo da condutividade hidráulica com base em valores de porosidade obtidos na literatura, em vez de dados experimentais provenientes de ensaios realizados no sítio de estudo. Essa abordagem introduz incertezas significativas na caracterização hidrogeológica, uma vez que a porosidade varia amplamente de acordo com as condições específicas do solo ou da rocha do sítio em estudo. O uso de valores genéricos pode resultar em estimativas imprecisas do fluxo de água subterrânea e do transporte de contaminantes.

Para garantir maior precisão na caracterização hidrogeológica, é fundamental realizar ensaios específicos, como ensaios geotécnicos, testes de permeabilidade ou ensaios de bombeamento. Esses métodos permitem a determinação da condutividade hidráulica com base nas

condições reais do meio poroso, reduzindo as incertezas e possibilitando uma avaliação mais confiável do comportamento hidrogeológico do local.

Os resultados da investigação indicaram que 90% dos piezômetros analisados apresentavam concentrações de tetracloroetano (PCE) acima dos valores de referência calculados na avaliação de risco para recetores comerciais *on-site* (SSTL 1), enquanto 32% dos piezômetros ultrapassaram os valores definidos para recetores comerciais externos (SSTL 2). Além disso, no que se refere ao risco de volatilização a partir da água subterrânea, foram identificados 11% dos piezômetros com concentrações excedendo os valores máximos admissíveis para ambiente interno (SSTL 3) e 6% dos piezômetros acima dos limites estabelecidos para ambiente externo (SSTL 4).

É importante destacar que, à época da investigação, a legislação brasileira estabelecia um valor máximo de 40,00 µg/L para PCE em água subterrânea. A Tabela 8.2.2 apresenta os valores máximos admissíveis definidos na avaliação de risco para a saúde humana, fornecendo uma base para a interpretação dos dados e para a definição de estratégias de mitigação e remediação.

Cenários	SSTL (<i>site specific target levels</i>)
SSTL 1 – recetores comerciais <i>on-site</i>	12,00 µg/L
SSTL 2 - recetores comerciais externos	38,00 µg/L
SSTL 3 - ambiente interno e recetores comerciais <i>on-site</i>	1.200,00 µg/L
SSTL 4 - ambiente externo <i>on-site</i>	7.200,00 µg/L

Tabela 8.2.2 Resultados da avaliação de risco para a saúde humana para PCE

A presença de tricloroetano (TCE) foi identificada em 72% dos piezômetros, com concentrações acima dos limites estabelecidos para diferentes vias de exposição. Desses piezômetros 20% apresentaram concentrações superiores ao valor máximo admissível para ingestão de água subterrânea em recetores comerciais *on-site* (SSTL 1), enquanto 15% ultrapassaram esse limite para recetores comerciais externos (SSTL 2). No que se refere ao risco de volatilização a partir da água subterrânea, 6% piezômetros excederam os valores admissíveis para ambientes internos (SSTL 3), enquanto quatro ultrapassaram os limites para ambientes externos (SSTL 4) e 6% para SSTL 5.

À época da investigação, a legislação brasileira estabelecia um valor máximo de 70,00 µg/L para TCE em água subterrânea. A Tabela 8.2.3 apresenta os resultados obtidos na avaliação de risco para a saúde humana, fornecendo subsídios para a interpretação dos dados e a definição das estratégias de mitigação e remediação.

Cenários	SSTL (<i>site specific target levels</i>)
SSTL 1 – recetores comerciais on-site	56,00 ug/L
SSTL 2 - recetores comerciais externos	180,00 ug/L
SSTL 3 - ambiente interno e recetores comerciais on-site	430,00 ug/L
SSTL 4 - ambiente externo on-site	660 ug/L
SSTL 5 – off site	3.900,00 µg/L

Tabela 8.2.3 Resultados da avaliação de risco para a saúde humana para TCE

*VR: Cetesb (2005)

Em 24% dos piezômetros, foram detetadas concentrações de DCE superiores aos valores máximos admissíveis para ingestão de água subterrânea nos cenários de exposição SSTL 1 e SSTL 5, bem como em 24% dos piezômetros para SSTL 2. À época, o valor de referência estabelecido pela legislação brasileira era de 50,00 µg/L. A Tabela 8.2.4 apresenta os resultados obtidos na avaliação de risco para a saúde humana em relação ao DCE.

Cenários	SSTL (<i>site specific target levels</i>)
SSTL 1 – recetores comerciais on-site	410,00 ug/L
SSTL 2 - recetores comerciais externos	1.300,00 ug/L
SSTL 5 – off-site	410,00 ug/L

Tabela 8.2.4 Resultados da avaliação de risco para a saúde humana para DCE

*VR: Cetesb (2005)

Por fim, em 65% dos piezômetros as concentrações de CV excederam os valores máximos admissíveis para os cenários de exposição SSTL 1 e SSTL 2, bem como para volatilização a partir da água subterrânea em SSTL 3. Adicionalmente, em 56% dos piezômetros, os valores ultrapassaram os limites estabelecidos para SSTL 4 e SSTL 5. À época, o valor de referência estipulado pela legislação brasileira era de 5,00 µg/L. A Tabela 8.2.5 apresenta os resultados obtidos na avaliação de risco para a saúde humana em relação ao CV.

Cenários	SSTL (<i>site specific target levels</i>)
SSTL 1 – recetores comerciais on-site	0,32 ug/L
SSTL 2 - recetores comerciais externos	1,00 ug/L
SSTL 3 - ambiente interno e recetores comerciais on-site	1,20 ug/L
SSTL 4 - ambiente externo on-site	7,10 ug/L
SSTL 5 – off site	7,10 µg/L

Tabela 8.2.5 Resultados da avaliação de risco para a saúde humana para CV

*VR: Cetesb (2005)

É importante destacar que, nesta fase da investigação, foram detetados, em maior quantidade, produtos primários, como PCE e TCE, em comparação com seus produtos de degradação, como DCE e CV. Esse fato pode indicar duas hipóteses principais: a primeira é a existência de um aporte contínuo de contaminantes na área, o que prolongaria a persistência dos

compostos primários no meio e a segunda é que as condições ambientais, tais como pH, potencial de oxirredução (Eh), disponibilidade de doadores ou aceitadores de elétrons e presença de nutrientes, não são favoráveis à ocorrência efetiva dos processos de biodegradação natural.

Entretanto, a ausência de dados complementares impede a determinação precisa do fator responsável pela baixa taxa de biodegradação. Sem essas informações, não é possível concluir se a persistência dos contaminantes resulta de um aporte contínuo ou da ausência de condições adequadas para sua degradação natural.

Com base nas concentrações obtidas, foi realizada uma avaliação da tendência de ocorrência de DNAPL de PCE e TCE. Em dois piezômetros, as concentrações ultrapassaram 10% do coeficiente de solubilidade, atingindo 90% e 14%, respectivamente, o que sugere a possível presença de fase livre nestes pontos de monitoramento.

No contexto da identificação de uma fase não aquosa (NAPL), o coeficiente de solubilidade refere-se à quantidade máxima que um composto pode dissolver em água sob determinadas condições de temperatura e pressão. Assim, quando a concentração de um contaminante em fase aquosa ultrapassa 10% de sua solubilidade máxima, há um forte indicativo da presença de NAPL. Esse indicativo sugere que o contaminante excede sua capacidade de dissolução e pode estar presente como uma fase separada.

Importa destacar que o DCE e o CV são produtos de degradação do PCE e do TCE, e, portanto, encontram-se dissolvidos na água subterrânea, não constituindo fase livre. No entanto, no caso do CV, as concentrações detectada em alguns piezômetros - tanto no aquífero sedimentar livre quanto no semiconfinado - ultrapassaram ou se aproximaram do coeficiente de solubilidade de 1.100 µg/L. Isso indica uma concentração significativa de CV dissolvido, o que pode representar um risco adicional à qualidade da água e para a saúde humana.

A presença de CV em níveis tão elevados exige uma avaliação criteriosa do seu potencial de dispersão no meio hídrico, dada sua maior toxicidade em comparação aos demais compostos identificados. Além disso, a elevada concentração desse contaminante sugere a necessidade de uma investigação detalhada para compreender os mecanismos que favorecem sua acumulação e mobilidade, possibilitando o desenvolvimento de estratégias de mitigação mais eficazes.

Em junho de 2006, sem que a investigação ambiental tivesse sido devidamente concluída, sem a realização prévia de uma avaliação quantitativa de risco e sem a aplicação de uma modelagem matemática adequada, foi elaborado um projeto de remediação. Esse projeto propôs a utilização de oxidação química *in-situ*, utilizando o reagente Fenton. O reagente de Fenton consiste em uma solução de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) ativada por íons ferrosos (Fe^{2+}), resultando na geração de radicais hidroxila ($-OH$) altamente reativos. Esses radicais possuem elevado poder oxidante e são capazes de degradar compostos orgânicos complexos, convertendo-os em subprodutos menos tóxicos, como água e dióxido de carbono.

Contudo, a decisão de implementar essa tecnologia sem um entendimento completo da extensão da contaminação, do comportamento hidrogeológico do local e dos processos geoquímicos envolvidos constituiu uma falha metodológica significativa. A ausência de um diagnóstico adequado comprometeu a eficácia do tratamento, pois a interação entre o reagente e os contaminantes não foi devidamente modelada, aumentando as incertezas quanto ao desempenho da remediação e à possível formação de subprodutos secundários.

Apesar dessas limitações, o sistema de remediação operou durante dois anos, resultando na redução parcial das concentrações de contaminantes na fase dissolvida. No entanto, sem um entendimento abrangente das fontes primárias e secundárias de contaminação, bem como dos processos de transporte dos contaminantes no meio poroso, os resultados obtidos foram restritos às áreas de maior acessibilidade do reagente. Regiões de baixa permeabilidade e processos de difusão reversa, frequentemente responsáveis pela remobilização dos contaminantes ao longo do tempo, não foram adequadamente abordados, o que limitou a efetividade da intervenção.

A escolha da tecnologia de remediação, sem a realização de um estudo detalhado de alternativas, comprometeu significativamente a eficácia da intervenção no sítio em questão. Conforme destacado pela USEPA (2006), a aplicação do reagente Fenton é altamente dependente das condições químicas do meio, especialmente do pH, cuja faixa ideal situa-se entre 3,0 e 4,0. Quando o pH excede 5,0, ocorre a precipitação de Fe^{3+} na forma de hidróxidos insolúveis, o que reduz a disponibilidade do ferro para catalisar a reação e, conseqüentemente, compromete a eficiência do processo de oxidação química. No caso específico deste estudo, os valores médios de pH foram de 6,3, evidenciando um ambiente desfavorável para a aplicação do reagente Fenton com máxima eficiência.

Além do pH, outros fatores, como temperatura e quantidade de matéria orgânica, influenciam diretamente na cinética da reação de oxidação química. Estudos indicam que a

temperatura ideal para maximizar a eficiência do reagente Fenton é superior a 45 C, pois, em temperaturas mais baixas, a velocidade da reação é reduzida, limitando a degradação dos contaminantes. Além disso, a presença de matéria orgânica compromete o desempenho do processo, uma vez que os radicais hidroxila (-OH) - extremamente reativos - podem se ligar a outros compostos presentes no meio, reduzindo a disponibilidade do reagente para atuar sobre os contaminantes-alvo. No presente estudo, a temperatura média registrada foi de 23,4 C, reforçando que as condições do local não eram propícias para a aplicação do reagente Fenton com máxima eficiência. Além disso, a conversão de Fe^{+2} em Fe^{+3} durante o processo, em um pH superior a 4,0, favorece a formação de compostos insolúveis, agravando ainda mais a ineficiência do método aplicado. O pH médio medido foi 6,3.

A presença de matéria orgânica nos solos é um fator crítico que reduz significativamente a eficiência da reação do reagente de Fenton. Solos argilosos, como os encontrados em profundidades rasas e ambientes fluviais, apresentam altos teores de matéria orgânica, tornando-se especialmente desfavorável para aplicação da oxidação química. No presente estudo, foi identificado que o solo do sítio em questão é predominantemente argiloso, uma condição adversa para o uso dessa tecnologia. A matéria orgânica não apenas consome os radicais hidroxila (-OH) gerados durante o processo, reduzindo sua disponibilidade para a degradação dos contaminantes, mas também interfere na interação entre o Fe^{+} e o peróxido de hidrogênio, prejudicando a formação de radicais livres e, conseqüentemente, comprometendo a eficácia do tratamento a longo prazo.

Com base nas condições observadas, conclui-se que a oxidação química com o reagente de Fenton não ocorreu de forma eficiente devido a três fatores principais: (i) a natureza argilosa do solo, que favorece a retenção de matéria orgânica e reduz a disponibilidade dos radicais hidroxila; (ii) a temperatura média do local (23,4 C), inferior à faixa ideal para a reação (acima de 45 C); e (iii) o pH elevado (6,3), fora da faixa ideal (3,0-4,0), levando à precipitação do Fe^{+3} e reduzindo sua interação com o peróxido de hidrogênio. Diante desse cenário, a ineficácia da remediação evidencia que a escolha da tecnologia não levou em consideração as condições geoquímicas específicas do local, resultando em uma redução limitada das concentrações de contaminantes e em um processo de remediação ineficaz.

Em 2007, a agência ambiental emitiu um novo parecer técnico, no qual destacou que os estudos realizados até então não haviam atendido integralmente os requisitos estabelecidos na legislação vigente à época. A exigência de complementações e esclarecimentos adicionais

pela agência ambiental demonstra que a investigação realizada até então não havia sido suficientemente abrangente para fornecer um diagnóstico preciso da contaminação.

A necessidade de revisar e aprimorar a caracterização geológica e hidrogeológica, instalar novos piezômetros para delimitação das plumas e monitorizar novamente os contaminantes, incluindo metais, evidencia que os estudos anteriores apresentavam lacunas significativas, que poderiam comprometer a eficácia das estratégias de remediação. Além disso, a solicitação de um modelo conceptual atualizado reforça a importância de integrar as informações geoquímicas, geológicas e hidrológicas do local para uma compreensão mais precisa da dinâmica dos contaminantes.

Em 2008, a agência ambiental emitiu um novo parecer técnico, reafirmando que o estudo apresentado ainda era insatisfatório e não atendia integralmente aos requisitos técnicos e normativos estabelecidos. Diante disso, a agência determinou a necessidade de complementações e esclarecimentos adicionais, reforçando a importância de uma investigação mais abrangente e detalhada. As principais exigências incluíram:

- i. Ampliação da investigação na envolvente do empreendimento, com ênfase nos poços de captação existentes, a fim de avaliar se a contaminação já havia ultrapassado os limites da propriedade;
- ii. Revisão e aprimoramento da caracterização geológica e hidrogeológica do local, com a elaboração de um modelo conceptual atualizado que considerasse as condições geoquímicas e a dinâmica dos contaminantes;
- iii. Monitorização abrangente de todos os piezômetros existentes, incluindo uma avaliação completa dos contaminantes presentes, com destaque para a inclusão de metais na análise;
- iv. Apresentação da evolução das concentrações dos contaminantes, desde o início dos levantamentos, evidenciando tendências e variações ao longo do tempo;
- v. Esclarecimento do aumento das concentrações observadas em determinados piezômetros, identificando possíveis fatores responsáveis por essa elevação;
- vi. Instalação de novos piezômetros para delimitação das plumas e projeção de sua evolução em cenários de médio e longo prazo (5 a 10 anos);
- vii. Incorporação do consumo de água na avaliação quantitativa de risco, considerando os recetores expostos e as vias potenciais de exposição;
- viii. Investigação de áreas na envolvente do sítio, que até o momento não haviam sido avaliadas;
- ix. Comprovação de que os objetivos de remediação propostos estavam sendo atingidos, por meio de dados e análises técnicas;

- x. Especificação do processo químico gerado pela aplicação do reagente de Fenton, detalhando os produtos finais da reação e os possíveis impactos ambientais; e
- xi. Realização de uma nova campanha de amostragem de solo, abrangendo todas as possíveis fontes primárias de contaminação.

Essas exigências sublinham a necessidade de um processo de investigação contínuo e detalhado, garantindo que as decisões sejam baseadas em dados robustos e representativos. A solicitação de investigar a envolvente, explicar o aumento das concentrações em alguns piezômetros e apresentar a evolução histórica da contaminação revela que a avaliação de risco inicial não considerava todas as variáveis ambientais relevantes. Assim, a falta de um entendimento completo da extensão da contaminação e da interação dos contaminantes com o meio físico comprometeu as primeiras abordagens de remediação. O parecer da agência reforça a importância de adotar uma metodologia científica rigorosa, assegurando que as soluções propostas sejam efetivas para reduzir riscos ambientais e proteger a saúde humana.

O processo contínuo de monitorização revelou desafios significativos na avaliação da eficácia das medidas de remediação implementadas. A discrepância observada entre os resultados da quarta campanha e as medições anteriores evidencia problemas metodológicos e limitações no controlo de qualidade dos dados.

A apresentação dos primeiros dados geoquímicos *in-situ* foi no relatório da quarta campanha de monitorização que trouxe informações essenciais para a avaliação da eficácia da remediação e a compreensão da dinâmica da contaminação no local. No entanto, os resultados obtidos revelaram um cenário mais complexo do que o previsto, indicando que a estratégia adotada até aquele momento não estava considerando adequadamente as condições ambientais que influenciam a mobilidade e a persistência dos contaminantes.

Os dados indicaram:

- pH alcalino elevado (10,4) é um fator preocupante, pois pode alterar a solubilidade e a reatividade dos contaminantes, afetando diretamente a eficiência de processos como a biodegradação e a adsorção no solo;
- potencial de oxirredução predominantemente redutor sugere que o ambiente pode favorecer a estabilização de compostos menos reativos, como os DNAPLs, dificultando sua degradação natural e aumentando o risco de contaminação persistente; e

- variação nos níveis de oxigênio dissolvido, com zonas aeróbicas e anaeróbicas coexistindo, evidencia uma distribuição heterogênea das condições químicas do local, o que representa um desafio adicional para a remediação, uma vez que diferentes processos de degradação e transporte ocorrem simultaneamente, exigindo abordagens diferenciadas para cada compartimento ambiental;
- oxigênio dissolvido misto, com alguns locais apresentando um ambiente é anaeróbico, enquanto outros indicavam um ambiente fortemente aeróbico. Essa heterogeneidade de oxigenação reflete uma complexidade adicional para a remediação, uma vez que diferentes processos de degradação e interação dos contaminantes podem ocorrer de maneira desigual em diferentes zonas do local.

Um dos fatores críticos foi a variação do pH, que saltou de uma média de 6,3 em 2006 para 10,4 na última campanha. Esse aumento expressivo sugere erros operacionais na calibragem dos instrumentos de medição ou possíveis alterações geoquímicas induzidas por reações químicas associadas ao processo de remediação. Além disso, as condições de oxirredução indicaram um ambiente predominantemente redutor, o que pode favorecer a persistência de contaminantes menos reativos, como os DNAPLs, dificultando sua degradação natural. A variação nos níveis de oxigênio dissolvido também revelou uma heterogeneidade nas condições ambientais, com zonas aeróbicas e anaeróbicas coexistindo no mesmo sítio, o que complica ainda mais a escolha de tecnologias de remediação eficazes. Essas condições inconsistentes reforçam a necessidade de uma abordagem integrada e multidisciplinar, na qual a caracterização geoquímica seja realizada com técnicas rigorosas e controles de qualidade adequados para evitar interpretações equivocadas e falhas na tomada de decisão.

As concentrações obtidas na quarta campanha de monitorização, que deveriam representar a fase final do processo de remediação, são apresentadas na Tabela 8.2.6. No entanto, os dados indicaram que os níveis de contaminação ainda permaneciam acima dos valores de referência para encerramento, demonstrando que a estratégia adotada não foi completamente eficaz na redução das concentrações dos contaminantes a patamares aceitáveis.

Compostos	Concentrações	Valor de referência*
Tetracloroetano	13.098 ug/L	40 ug/L
Tricloroetano	1.663 ug/L	70 ug/L
cis-1,2-dicloroetano	3.778 ug/L	-
Cloreto de vinilo	591 ug/L	5 ug/L

Tabela 8.2.6 Resultados obtidos na 4ª campanha de monitorização – 2009

*VR: Cetesb (2005)

A persistência de concentrações elevadas de compostos como PCE, TCE, DCE e CV, aliada às condições geoquímicas identificadas (pH alcalino elevado e potencial de oxirredução redutor), reforça a necessidade de uma reavaliação da abordagem de remediação utilizada. Esses fatores indicam que, além da remediação da fase dissolvida, a contaminação em zonas de baixa permeabilidade e a possível difusão reversa dos contaminantes não foram adequadamente controladas, comprometendo os resultados esperados.

Os resultados obtidos nessa nova investigação trouxeram informações relevantes sobre a real extensão da contaminação, demonstrando que as plumas de hidrocarbonetos alifáticos clorados extrapolavam os limites do empreendimento e avançavam para áreas adjacentes. A instalação de novos piezômetros permitiu um refinamento na delimitação tridimensional das plumas, identificando zonas de maior concentração e evidenciando a presença de contaminantes em profundidades superiores às previamente estimadas.

Além disso, a inclusão da investigação de vapores foi um avanço significativo, pois permitiu avaliar os riscos de intrusão de vapores em edificações e recetores externos, um fator crítico para a gestão de sítios contaminados. Os dados obtidos reforçaram a necessidade de adotar medidas complementares de remediação, com um foco maior no controle da fase livre e na mitigação dos riscos de volatilização. Assim, ficou evidente que a estratégia de remediação aplicada até então não havia sido suficiente para garantir a segurança ambiental e a proteção da saúde humana, tornando imprescindível uma reavaliação da abordagem utilizada.

O parecer da agência ambiental em 2009 destacou que as ações realizadas até aquele momento não eram suficientes para garantir a segurança ambiental e a proteção da saúde pública. A persistência de concentrações elevadas de hidrocarbonetos alifáticos clorados, mesmo após a remediação, indicava falhas na abordagem adotada e a necessidade de uma avaliação mais abrangente. A falta de uma delimitação tridimensional adequada das plumas de contaminação e a ausência de investigação na área externa representavam um risco potencial para os recetores na envolvente, exigindo novas campanhas de investigação.

Diante dessas falhas, a agência reforçou a necessidade de medidas corretivas mais rigorosas e emitiu um auto de infração, acompanhado de uma penalidade de advertência, enfatizando a gravidade do caso. Essa decisão evidenciou a importância de um processo de remediação fundamentado em uma caracterização detalhada e na aplicação de metodologias eficazes, garantindo que a contaminação fosse completamente identificada e mitigada, evitando riscos futuros para a população e o ambiente.

Em atendimento à exigência da agência ambiental, em 2011, foi realizada nova investigação na área, que incluiu o adensamento dos piezômetros, a recolha de amostras de água subterrânea e de solo. Os resultados confirmaram a permanência dos hidrocarbonetos alifáticos clorados no solo e na água subterrânea, indicando que a contaminação ainda não havia sido completamente delimitada. Outro achado crítico foi a baixa presença de microrganismos capazes de degradar os contaminantes, o que comprometia a eficácia dos processos naturais de atenuação. Esse fator revelou que as condições ambientais não favoreciam a biodegradação e que as estratégias de remediação precisavam ser reavaliadas. Assim, tornou-se evidente a necessidade de abordagens complementares ou a implementação de técnicas mais avançadas, como o ajuste das condições geoquímicas do meio para estimular a biodegradação ou a aplicação de metodologias alternativas que garantissem uma remediação mais efetiva e sustentável.

A emissão do parecer técnico pela agência ambiental em 2013 evidenciou que, mesmo após anos de investigação e remediação, persistiam lacunas significativas na caracterização e no controle da contaminação. A ausência de dados sobre vapores do solo, a falta de um modelo atualizado de fluxo e transporte de contaminantes e a necessidade de revisão da avaliação quantitativa de risco indicavam que as estratégias adotadas até então eram insuficientes para garantir a completa reabilitação do local.

Diante dessas pendências, a decisão da agência de lavrar um auto de infração e aplicar uma penalidade de advertência ao atual proprietário da área reforçou a necessidade de ações corretivas imediatas e mais eficazes. Além de assegurar o cumprimento das normas ambientais, essa medida visava responsabilizar diretamente o proprietário pelo atraso na implementação das diretrizes exigidas e garantir que a gestão do passivo ambiental fosse conduzida com maior rigor técnico e comprometimento com a mitigação dos riscos para a saúde pública e ao ambiente.

Os resultados obtidos no estudo de 2013 indicaram uma redução nas concentrações de hidrocarbonetos alifáticos clorados, acompanhada de sinais de degradação do PCE, refletida pelo aumento das concentrações de seus produtos de transformação. A análise das condições geoquímicas revelou um ambiente favorável para a decloração reductiva, com baixos índices de potencial de oxirredução, reduzida disponibilidade de oxigênio dissolvido e um pH adequado para processos biológicos de degradação. No entanto, a baixa concentração de sulfato e azoto indicava limitações potenciais ao metabolismo microbiano, enquanto a elevada concentração de cloreto sugeria que o meio já apresentava um histórico de decloração ativa.

Além disso, as análises de vapor demonstraram uma correlação direta entre os contaminantes presentes na água subterrânea e os valores obtidos no solo, validando a hipótese levantada no modelo conceptual sobre a migração dos vapores. Esses achados reforçam a necessidade de expandir a rede de investigação de vapores, visando delimitar melhor os riscos potenciais de exposição e definir estratégias de mitigação mais eficazes.

A atualização do modelo conceptual revelou dois centros de massa de PCE, reforçando a necessidade de estratégias específicas para lidar com diferentes fontes de contaminação. Além disso, pela primeira vez, foi identificada uma fonte secundária, caracterizada pela presença de uma camada de argila sobreposta a uma camada arenosa, o que pode influenciar significativamente a retenção e a mobilidade dos contaminantes. Outro aspecto crítico identificado foi a mudança na direção do fluxo da água subterrânea, que passou de leste (E) para oeste (W), conforme evidenciado pelo adensamento da rede de piezômetros. Essa alteração tem implicações diretas no transporte de contaminantes, podendo afetar a dispersão da pluma e a identificação de novos sítios impactados.

As vias de exposição foram confirmadas, abrangendo inalação, contacto dérmico e ingestão, e os recetores expostos incluíam trabalhadores de obras locais e um poço de abastecimento na área circundante. A investigação também indicou que, embora a contaminação não esteja completamente delimitada na horizontal, existe o risco de migração para além dos limites da propriedade. No entanto, no eixo vertical, a contaminação foi considerada delimitada devido à presença do topo rochoso, identificado nas sondagens, funcionando como uma barreira natural à migração dos contaminantes para camadas mais profundas.

A instauração do inquérito civil pelo Ministério Público do Estado de São Paulo (MPSP), em 2013, marcou um novo momento na gestão da contaminação do local, ampliando o escopo da investigação e reforçando a necessidade de responsabilização e implementação de medidas corretivas. O MPSP notificou tanto a empresa responsável pela contaminação, quanto a agência ambiental e o atual proprietário do imóvel, buscando esclarecer as responsabilidades individuais e assegurar que as ações necessárias para mitigar os impactes ambientais e proteger a saúde pública fossem devidamente executadas. O inquérito também evidenciou a preocupação com as falhas na gestão anterior da contaminação, destacando a relevância de um acompanhamento rigoroso para garantir o cumprimento das normas ambientais.

No mesmo ano, a agência ambiental emitiu um parecer técnico endereçado ao MPSP, no qual reafirmou a falta de clareza sobre a real situação ambiental do sítio, consequência de

investigações incompletas e inconclusivas. O documento apontou falhas críticas na gestão das incertezas ambientais, principalmente no que diz respeito à intrusão de vapores, um risco potencial à saúde pública que ainda não havia sido adequadamente avaliado. Além disso, a agência destacou que as plumas de contaminação continuavam sem delimitação completa, tanto horizontal quanto verticalmente, podendo extrapolar os limites da propriedade. A ausência de uma revalidação da avaliação quantitativa de risco e a falta de respostas às pendências dos pareceres técnicos emitidos em 2009 e 2011 reforçaram a necessidade de intervenção mais rigorosa. Como consequência dessas deficiências persistentes na gestão ambiental, a agência lavrou um auto de infração e aplicou uma penalidade de advertência à empresa poluidora, concedendo um prazo de 120 dias para o cumprimento das exigências técnicas pendentes.

Os estudos realizados em 2014 e 2015 foram fundamentais para o aprimoramento do modelo conceptual da área e para a avaliação da evolução da contaminação ao longo do tempo. Em 2014, a investigação teve como foco a avaliação de risco para a saúde humana, trazendo informações inéditas sobre a presença de ferro e manganês nos piezômetros mais profundos, bem como dados adicionais sobre azoto e sulfato. Esses novos elementos foram essenciais para compreender as condições geoquímicas do meio subterrâneo e seus possíveis efeitos sobre o transporte e a degradação dos contaminantes. Além disso, a comparação dos resultados com as campanhas anteriores revelou uma tendência de redução das concentrações de PCE e TCE nos centros de massa da contaminação, acompanhada de um aumento nas concentrações dos subprodutos de degradação, como DCE e CV. Essa dinâmica indicou que as condições ambientais estavam se tornando mais favoráveis à degradação natural dos contaminantes, sinalizando um progresso no processo de atenuação da contaminação, embora ainda fossem necessárias ações adicionais para mitigar os riscos ambientais e para a saúde pública.

Já em 2015, uma nova campanha de monitorização foi conduzida, utilizando os piezômetros já instalados para uma avaliação atualizada das condições ambientais do local. Os resultados obtidos reforçaram a complexidade do ambiente subterrâneo e forneceram evidências adicionais sobre os processos de degradação em curso. Os principais achados dessa campanha incluem:

- Medições *in-situ* do pH, indicando valores ligeiramente ácidos em algumas áreas e alcalinos em outras, o que pode impactar os processos de biodegradação e mobilidade dos contaminantes;
- Condições predominantemente redutoras em 90% piezômetros avaliados, favorecendo processos de degradação anaeróbica dos contaminantes clorados;

- Baixas concentrações de oxigênio dissolvido (<1 mg/L), indicando um ambiente essencialmente anaeróbico, compatível com processos de decloração reductiva, mecanismo essencial para a transformação de compostos como PCE e TCE em seus subprodutos de degradação.

Esses resultados confirmam a influência das condições ambientais na degradação dos contaminantes e destacam a importância de uma abordagem integrada e contínua para o monitoramento e remediação do sítio contaminado.

As maiores concentrações encontradas são apresentadas na Tabela 8.2.7.

Compostos	Concentrações	Valor de referência*
Tetracloroetano	2.313,40 ug/L	40 ug/L
Tricloroetano	1.975,50 ug/L	20 ug/L
cis-1,2-dicloroetano	6.274,60 ug/L	50 ug/L
Cloreto de vinilo	751,80 ug/L	2 ug/L

Tabela 8.2.7 Resultados obtidos na investigação de 2015

*VR: Cetesb (2014)

No âmbito do inquérito civil, o Ministério Público do Estado de São Paulo (MPSP) questionou a agência ambiental em 2015 acerca da evolução dos estudos realizados no sítio. Em resposta, a agência informou que, mesmo após sucessivos autos de infração e penalidades de advertência, a empresa não atendeu às exigências técnicas adequadamente, razão pela qual foi autuada novamente. Em resposta, o poluidor informou ter contratado um novo responsável legal para realização de uma investigação detalhada, avaliação de risco completa e um plano de intervenção. Esse cenário demonstra a importância de um monitoramento contínuo por parte dos órgãos ambientais e do poder público, garantindo que a responsabilidade pela contaminação seja devidamente assumida e que medidas eficazes sejam implementadas para proteger a saúde humana e o ambiente.

A análise retrospectiva dos estudos realizados deixa claro que a abordagem inicial falhou em seguir os princípios metodológicos recomendados nesta tese, impactando diretamente a qualidade dos dados gerados e a confiabilidade das estratégias adotadas. A ausência de uma avaliação preliminar detalhada comprometeu a identificação precisa das fontes primárias e secundárias de contaminação, limitando o entendimento da distribuição e migração dos contaminantes ao longo do tempo. Além disso, não houve uma caracterização geoquímica completa do meio, impossibilitando a calibragem adequada dos modelos de fluxo e transporte, fundamentais para prever o comportamento das plumas contaminantes. Como consequência, os modelos conceptuais desenvolvidos inicialmente estavam incompletos, levando à adoção

de estratégias de remediação inadequadas e ineficazes. Essa situação destaca a necessidade de uma abordagem integrada e faseada, que contemple investigação, modelagem e monitorização contínua, assegurando que as decisões de remediação sejam baseadas em dados confiáveis e representativos da realidade do local.

A ausência de uma avaliação preliminar bem estruturada comprometeu a base de toda a investigação, levando a um processo deficiente na identificação das fontes contaminantes e na delimitação das plumas de contaminação. Sem um mapeamento adequado das zonas impactadas, tanto horizontal quanto verticalmente, tornou-se impossível prever com precisão a migração dos contaminantes e, conseqüentemente, estimar os riscos reais para os recetores expostos. Além disso, falhas na calibração dos instrumentos de medição, associadas ao uso de modelos conceituais excessivamente simplificados, impediram uma avaliação realista do comportamento da contaminação ao longo do tempo. Ignorar variáveis essenciais, como as condições geoquímicas e hidrogeológicas do local, resultou na adoção de estratégias de remediação inadequadas, o que prolongou a persistência dos contaminantes no ambiente e impediu a mitigação dos riscos de maneira eficiente.

Na prática, o início direto com a investigação exploratória, sem uma avaliação preliminar estruturada, revelou-se um erro metodológico significativo. A falta de uma caracterização detalhada desde o princípio comprometeu a qualidade dos dados gerados e dificultou a definição de um modelo conceptual preciso, impactando diretamente a eficácia das decisões tomadas ao longo do processo. Esse procedimento acelerado impediu a identificação detalhada das fontes primárias e secundárias de contaminação, bem como a determinação das vias de exposição, resultando em uma gestão ambiental fragmentada e reativa, que precisou ser revista e aprimorada anos depois.

A falha na definição de um plano de intervenção eficaz, aliada à ausência de um acompanhamento adequado, resultou em uma remediação insuficiente, que não conseguiu eliminar as fontes de contaminação nem conter a migração das plumas de contaminantes. A implementação de técnicas de remediação sem um conhecimento aprofundado das condições geoquímicas e hidrogeológicas do sítio resultou em intervenções inadequadas, gerando apenas reduções temporárias das concentrações dos contaminantes, sem proporcionar uma solução definitiva. Esse cenário reforça a necessidade de seguir metodologias rigorosas e baseadas em evidências científicas, garantindo que a gestão de sítios contaminados seja conduzida com precisão, segurança e responsabilidade. O não cumprimento das etapas essenciais não apenas reduz a eficiência das medidas de remediação, como também prolonga tempo de exposição de recetores a riscos ambientais e onera o responsável legal.

A falta de planejamento adequado e de execução rigorosa tende a gerar um ciclo vicioso, no qual estudos sucessivos se acumulam por anos ou até décadas, sem a adoção de medidas definitivas. Essa abordagem fragmentada e reativa não resolve o problema central da contaminação, resultando em soluções paliativas que apenas atenuam momentaneamente os impactos ambientais, sem eliminar os riscos. Para evitar esse desfecho, é fundamental que cada etapa da investigação seja estrategicamente planejada, com base em um modelo conceptual atualizado, garantindo que todas as decisões sejam tomadas a partir de um conhecimento completo da dinâmica da contaminação e de seus possíveis desdobramentos no meio.

A perpetuação de estudos fragmentados e remediações ineficazes não apenas prolonga a contaminação, mas também gera um ciclo de custos elevados e desperdício de recursos que poderiam ser direcionados para soluções mais eficazes e definitivas. Em vez de solucionar o problema, a gestão da contaminação se torna um processo repetitivo e pouco produtivo, no qual diagnósticos são refeitos, intervenções são aplicadas sem a devida fundamentação, e os resultados não atingem os objetivos desejados. Além dos impactos ambientais e para a saúde pública, essa abordagem fragiliza a credibilidade das partes envolvidas, dificultando a tomada de decisão e comprometendo o avanço da reabilitação do sítio.

No caso específico deste estudo, a troca constante de responsável técnico ao longo de 19 anos exemplifica um dos maiores entraves na gestão de sítios contaminados no Brasil: a falta de continuidade investigativa e a ausência de um plano estratégico unificado. Com sete responsáveis técnicos diferentes conduzindo as investigações, cada um com sua própria abordagem e metodologia, gerou um acúmulo de dados desconectados e falta de consistência na construção de um modelo conceptual. Essa descontinuidade dificulta a identificação das causas primárias da contaminação, atrasa a implementação de medidas eficazes e reforça a necessidade de um planejamento integrado, que garanta a coerência técnica ao longo de todo o processo, evitando repetições desnecessárias e garantindo um avanço real na remediação do sítio.

A constante rotatividade de responsável técnico e a fragmentação das decisões técnicas resultaram em análises desconectadas e superficiais, agravando o cenário de incerteza quanto à segurança dos recetores e ao controle efetivo da contaminação. Sem um modelo conceptual unificado e atualizado, muitas investigações ignoraram informações fundamentais levantadas anteriormente, levando a repetições desnecessárias, atrasos na tomada de decisão e aumento dos custos envolvidos. Esse ciclo de ineficiência e descontinuidade compromete não apenas a gestão ambiental, mas também a saúde pública e a credibilidade dos órgãos reguladores, que veem seus esforços dificultados pela falta de uma abordagem integrada e bem estruturada.

Em 2016, diante da persistente insuficiência dos estudos, a agência ambiental emitiu um novo parecer técnico, reiterando a necessidade de ampliar o sítio investigada. Como consequência, foram aplicadas novas penalidades: o atual proprietário do terreno recebeu uma multa de aproximadamente € 3.000, enquanto o poluidor original foi novamente penalizado apenas com uma advertência. Esse desfecho evidencia um padrão recorrente de punições brandas para o poluidor, que, apesar das reiteradas falhas na gestão do passivo, continuou a sem sanções mais severas. Essa postura fragiliza a aplicação da legislação ambiental, reduzindo a efetividade das penalidades como ferramenta para garantir a responsabilização dos agentes envolvidos e a implementação de medidas eficazes de remediação.

Esse cenário evidencia uma dissonância na aplicação das sanções ambientais, onde a responsabilidade civil *propter rem* recai de maneira mais rigorosa sobre o proprietário atual do imóvel, enquanto o poluidor original continua a receber penas brandas, apesar de sua reincidência no descumprimento das exigências técnicas. Embora a legislação ambiental estabeleça claramente a obrigação de reparação dos danos, a falta de uma fiscalização mais rigorosa e a aplicação seletiva das penalidades comprometem a efetividade do processo sancionador, permitindo que o responsável direto pela contaminação prolongue a situação sem arcar com as consequências proporcionais ao impacto causado.

A Resolução SMA/32 (2010) estabelece que reincidentes devem receber penalidades mais severas, incluindo multas simples e diárias em caso de continuidade da infração. No entanto, os registros históricos demonstram que o poluidor original recebeu sucessivas advertências, sem que a penalidade de multa fosse aplicada conforme previsto na norma. Essa inconsistência regulatória não apenas desestimula a adoção de medidas corretivas eficazes, mas também reforça um ciclo de impunidade que dificulta a remediação ambiental e prolonga os riscos para a saúde pública e o ambiente.

Essa disparidade na aplicação das sanções ambientais, compromete a credibilidade da fiscalização e enfraquece o papel das penalidades como instrumento de coerção e incentivo à remediação ambiental. Enquanto o proprietário do imóvel foi progressivamente penalizado, culminando na aplicação de multas, o poluidor original permaneceu isento de sanções financeiras significativas, apesar de reiteradas infrações e do prolongamento da contaminação. Essa postura suscita questionamentos sobre o rigor da atuação da agência ambiental, que, ao permitir a reincidência sem penalidades proporcionais, contribui para um ciclo de ineficiência na gestão dos passivos ambientais.

A realização da primeira avaliação preliminar em 2016 representou um marco decisivo na abordagem do caso, trazendo uma perspectiva mais estruturada e alinhada às melhores práticas internacionais. O novo responsável técnico conduziu uma revisão minuciosa dos dados históricos, identificando lacunas e incertezas que comprometiam a eficácia das ações anteriores. Esse processo permitiu corrigir deficiências metodológicas, como a ausência de parâmetros essenciais para a caracterização do sítio e a subestimação de alguns riscos ambientais, garantindo um novo direcionamento para a investigação.

Além de reavaliar os dados existentes, o responsável técnico adotou abordagens mais rigorosas e alinhadas aos protocolos recomendados, promovendo uma estratégia integrada de investigação e remediação. Esse novo planejamento trouxe avanços significativos, permitindo a delimitação mais precisa das plumas de contaminação e a melhoria da compreensão sobre os mecanismos de transporte e degradação dos contaminantes. Esse realinhamento metodológico foi essencial para aumentar a confiabilidade da avaliação de risco e estabelecer uma base científica mais sólida para a tomada de decisões futuras.

A avaliação preliminar realizada em 2016 permitiu identificar 15 áreas fontes com potencial de contaminação, fornecendo um panorama mais abrangente da situação ambiental do sítio. O modelo conceptual delineado a partir desta análise indicou que o sítio estudado apresenta doze poços de captação de água subterrânea dentro de um raio de 500 metros, o que pode representar um risco potencial de exposição. Além disso, a profundidade média do nível freático foi estimada em aproximadamente 2 metros, destacando um cenário hidrogeológico vulnerável, especialmente em função da ocupação mista da região, que combina sítios industriais e residenciais.

No entanto, a avaliação também revelou lacunas críticas nos estudos anteriores, evidenciando que cinco das quinze áreas fontes identificadas ainda não haviam sido investigadas até aquele momento. Adicionalmente, em duas das áreas previamente analisadas, constatou-se que as informações obtidas não eram suficientemente detalhadas para permitir uma caracterização precisa da contaminação e dos riscos envolvidos. Esses achados reforçaram a necessidade de complementação dos estudos, garantindo uma delimitação mais rigorosa das plumas de contaminação e uma avaliação mais confiável dos riscos ambientais e à saúde humana.

A decisão do Ministério Público do Estado de São Paulo (MPSP) de ajuizar uma ação civil pública em agosto de 2016 representou um marco na tentativa de garantir responsabilização efetiva dos envolvidos na contaminação do sítio. A constatação de que os estudos

ambientais realizados estavam aquém do esperado e das exigências legais reforçou a necessidade de intervenção judicial. Os pareceres técnicos da agência ambiental, que reiteradamente apontaram insuficiências nas investigações, serviram como base para a ação na qual foram constituídos arguidos a empresa poluidora, o atual proprietário do terreno e a própria agência ambiental. Além da responsabilização pela contaminação, a ação demandou a indenização pelos danos ambientais, incluindo a compensação pelo tempo de indisponibilidade dos recursos hídricos, impactando diretamente a comunidade local e os ecossistemas afetados.

Nesse contexto, o papel do Estado e do Ministério Público torna-se essencial para garantir que os danos ambientais sejam adequadamente reparados e que os responsáveis sejam devidamente punidos. A aparente litigância de má-fé por parte dos envolvidos e a negligência da agência ambiental no cumprimento de seu papel regulador reforçaram a necessidade de uma intervenção mais rigorosa. Quando os mecanismos administrativos de fiscalização falham ou são ineficazes, o Ministério Público deve atuar como defensor da coletividade, exigindo ações concretas de remediação e medidas compensatórias que realmente protejam a saúde pública e restaurem o equilíbrio ambiental da região. A inação ou a adoção de medidas ineficazes prolongam a exposição dos recetores ao risco e comprometem a credibilidade da gestão, tornando imprescindível uma abordagem mais estratégica e assertiva na solução do problema.

A análise da conjuntura evidencia uma questão fundamental: a agência ambiental não deveria figurar como parte arguida ao lado do poluidor e do atual proprietário. Quando a agência se vê na posição de defesa, há uma inversão de seu papel institucional, pois, em vez de atuar com isenção e rigor técnico, passa a justificar ou minimizar as falhas dos verdadeiros responsáveis pela contaminação. Isso compromete sua autoridade regulatória, enfraquece a fiscalização e contribui para o prolongamento da situação de risco ambiental. O seu papel deveria ser o de fiscalizar, exigir conformidade com as normas ambientais e garantir que as medidas corretivas fossem implementadas de forma eficaz e tempestiva.

Se a agência ambiental fosse formalmente responsabilizada por improbidade administrativa, seu foco de defesa naturalmente se voltaria para a cobrança efetiva das ações corretivas, pressionando os poluidores e os proprietários do terreno a cumprirem com suas obrigações. Isso a forçaria a adotar uma postura mais rigorosa e proativa, evitando negligência e omissão e garantindo que as exigências técnicas e legais fossem cumpridas de forma efetiva. Dessa maneira, a fiscalização se tornaria mais eficiente, assegurando que os danos ambientais fossem devidamente mitigados e que a proteção da saúde pública não fosse negligenciada em função de interesses secundários.

A identificação de DNAPL de PCE e TCE na campanha de monitorização de 2018 evidencia um cenário crítico de contaminação persistente, que se mantém apesar das medidas adotadas ao longo dos anos. A Tabela 8.2.8 demonstra que as concentrações desses compostos superaram 10% da sua solubilidade em água, um forte indicativo da presença de fase livre de contaminantes. Esse dado é preocupante, pois a presença de DNAPL em concentrações tão elevadas sugere uma situação de contaminação persistente e em expansão, o que torna a remediação mais complexa e urgente.

Compostos	Concentrações	Valor de referência*
Tetracloroetano	90.969,30 ug/L	40 ug/L
Tricloroetano	20.019,50 ug/L	20 ug/L
cis-1,2-dicloroetano	240.534,40 ug/L	50 ug/L
Cloreto de vinilo	72.974,20 ug/L	2 ug/L

Tabela 8.2.8 Resultados obtidos na investigação de 2018

*VR: Cetesb (2014)

A permanência de DNAPL na área indica que os contaminantes não foram devidamente caracterizados e tratados, permitindo que a pluma continue a se expandir. Esse cenário não apenas prolonga a exposição dos recetores ao risco, mas também encarece e dificulta a recuperação ambiental do sítio. Diante disso, torna-se fundamental reavaliar as estratégias de remediação adotadas, incorporando técnicas mais eficazes e adaptadas à complexidade hidrogeológica e geoquímica do local.

A comparação entre os resultados das campanhas de monitorização de 2015 e 2018 revela um aumento expressivo das concentrações de PCE e TCE, conforme demonstrado na Tabela 8.2.9. Esse incremento contraria a expectativa de redução da contaminação ao longo do tempo, indicando que as medidas de remediação adotadas foram ineficazes na contenção da pluma e na mitigação dos riscos ambientais. A permanência e até o agravamento das concentrações sugerem que as fontes de contaminação não foram devidamente identificadas e controladas e que processos secundários, como a difusão reversa ou a migração da pluma, podem estar contribuindo para o aumento das concentrações observadas.

Compostos	Concentrações 2015	Concentrações 2018
Tetracloroetano	2.313,40 ug/L	90.969,30 ug/L
Tricloroetano	1.975,50 ug/L	20.019,50 ug/L
cis-1,2-dicloroetano	6.274,60 ug/L	240.534,40 ug/L
Cloreto de vinilo	751,80 ug/L	72.974,20 ug/L

Tabela 8.2.9 Resultados comparativos das campanhas de monitorização de 2015 e 2018

A elevação significativa da concentração de tetracloroetileno (PCE) de 2.313,40 µg/L em 2004 para 90.969,30 µg/L em 2018 evidencia uma dinâmica complexa e preocupante da contaminação, na qual múltiplos fatores podem ter contribuído para o agravamento do cenário. A migração das plumas de contaminação, aliada à presença de DNAPL acumulado em zonas de baixa permeabilidade, sugere que os processos naturais e as ações de remediação ineficazes não foram capazes de conter a propagação do contaminante. Além disso, o PCE pode ter sido mobilizado novamente, seja por variações no fluxo subterrâneo, alterações no uso do solo ou até mesmo por intervenções que alteraram o equilíbrio geoquímico do meio.

Um fator crítico nesse fenômeno é a remobilização da contaminação, conhecida como *back-diffusion*. Esse processo ocorre quando contaminantes armazenados em zonas de baixa permeabilidade, como argilas e siltes, começam a ser libertados gradualmente para áreas mais permeáveis, como camadas arenosas ou cascalhos. Durante o período de contaminação ativa, os contaminantes se difundem das zonas de alta permeabilidade para as camadas menos permeáveis, onde ficam retidos na matriz do solo. No entanto, quando a remediação reduz as concentrações na água subterrânea das zonas mais permeáveis, cria-se um gradiente de concentração inverso, que impulsiona a libertação dos contaminantes acumulados. Esse mecanismo, governado principalmente pelo transporte difusivo, pode retardar a recuperação do sítio e prolongar a necessidade de monitorização e ações corretivas, exigindo estratégias de remediação específicas para lidar com fontes secundárias de contaminação.

O fenômeno de *back-diffusion* ocorre em meios contaminados heterogêneos, nos quais há interação entre zonas de baixa e alta permeabilidade, resultando na libertação gradual de contaminantes armazenados em camadas menos permeáveis, como argilas e siltes. Esse processo inicia-se quando a concentração de contaminantes na matriz de baixa permeabilidade torna-se maior do que na água subterrânea das zonas adjacentes, criando um gradiente de concentração que impulsiona a difusão reversa para áreas de maior fluxo. Durante a fase ativa da contaminação, os DNAPLs podem infiltrar-se nas camadas argilosas ou siltosas, onde permanecem armazenados devido à baixa taxa de fluxo e à reduzida difusividade dessas formações.

A intensificação do fenômeno de *back-diffusion* é frequentemente observada após intervenções de remediação que reduzem rapidamente as concentrações de contaminantes em zonas de alta permeabilidade, criando um gradiente de concentração inverso que favorece a migração dos contaminantes armazenados em zonas de armazenamento (baixa permeabilidade) para zonas de maior fluxo (alta permeabilidade). Esse efeito compromete a eficácia das

medidas corretivas, pois os contaminantes armazenados são gradualmente libertados, prolongando a contaminação.

Além disso, DNAPLs possuem baixa reatividade e alta estabilidade química, o que permite sua libertação contínua e lenta na água subterrânea ao longo dos anos. Fatores externos, como flutuações sazonais no nível do lençol freático ou mudanças antrópicas no uso do solo, podem remobilizar contaminantes retidos em camadas profundas, ampliando os desafios para a remediação. Quando mal implementadas, algumas estratégias de remediação podem inadvertidamente intensificar esse processo, acelerando a libertação de contaminantes e tornando a gestão do sítio contaminado ainda mais complexa e dispendiosa.

A dinâmica da *back-diffusion* torna-se ainda mais desafiadora em ambientes com alta heterogeneidade litológica, onde camadas intercaladas de argila e areia criam zonas de armazenamento e libertação contínua de contaminantes. Esse fenômeno pode se prolongar por décadas após o término da fonte primária, mantendo concentrações elevadas de contaminantes na água subterrânea e dificultando a estabilização da contaminação. A taxa e a intensidade desse processo variam de acordo com as propriedades do contaminante, como seu coeficiente de difusão, e com as características do meio, incluindo condutividade hidráulica, porosidade e teor de matéria orgânica.

A presença de zonas de baixa permeabilidade como argilas e siltes representa um desafio significativo para a remediação, pois esses materiais atuam como reservatórios de contaminantes, libertando-os lentamente ao longo do tempo. Isso faz com que as plumas de contaminação persistam, mesmo após intervenções, e cria um risco contínuo para a qualidade da água subterrânea e para a saúde humana. Para superar esse desafio, estratégias de remediação devem considerar métodos adaptativos e de longo prazo, que não apenas removam contaminantes das zonas de alta permeabilidade, mas também abordem a libertação gradual de contaminantes das zonas de armazenamento, garantindo uma gestão mais eficaz e sustentável do sítio contaminado.

A variação de parâmetros ambientais como pH, na temperatura, na concentração de oxigênio dissolvido e a presença de outros contaminantes pode influenciar diretamente mobilidade e a solubilidade do PCE na água subterrânea. Em condições ácidas, por exemplo, o PCE adsorvido às partículas do solo pode ser mobilizado para a fase líquida, aumentando suas concentrações na água subterrânea. Além disso, alterações naturais ou antrópicas na hidrodinâmica do aquífero, como variações sazonais no nível do lençol freático ou mudanças na

química da água subterrânea, podem reativar processos de difusão e desorção, levando ao aumento das concentrações de PCE ao longo do tempo.

A compreensão desses fatores é essencial para a formulação de estratégias de remediação mais eficazes e duradouras. Intervenções que tratam apenas as zonas de alta permeabilidade podem ser ineficazes a longo prazo, pois ignoram a libertação contínua de contaminantes armazenados em zonas de baixa permeabilidade. Assim, uma abordagem integrada, que combine técnicas de remediação ativas e passivas, é necessária para evitar a recontaminação e garantir a estabilização das plumas contaminantes no ambiente subterrâneo.

Com base nos resultados obtidos nos estudos de 2018, as próximas ações recomendadas foram direcionadas para um entendimento mais preciso da contaminação e de suas dinâmicas de migração e armazenamento no meio subterrâneo. As medidas propostas incluem:

- i. Refinamento do modelo hidrogeológico local – A atualização do modelo hidrogeológico permitirá uma melhor compreensão das direções de fluxo da água subterrânea, das interações entre diferentes camadas geológicas e da influência dessas características na mobilidade dos contaminantes. Esse refinamento visa reduzir incertezas e aprimorar a previsibilidade dos impactos ambientais;
- ii. Avaliação e delimitação da presença de fase livre DNAPL – A confirmação da presença de DNAPL em concentrações significativas evidencia a necessidade de uma investigação mais detalhada para delimitar a extensão tridimensional das plumas de fase livre. Esse mapeamento é essencial para evitar migração contínua dos contaminantes e fundamentar a escolha da melhor estratégia de remediação; e
- iii. Detalhamento das concentrações de etenos clorados adsorvidos no solo e dissolvidos na água subterrânea – A avaliação das concentrações retidas nas matrizes de solo e água subterrânea fornecerá informações essenciais sobre as fontes secundárias de contaminação, como *back-diffusion*, ajudando a estimar o tempo de persistência da contaminação no meio. Esse estudo foi fundamental para planejar soluções mitigadoras mais eficazes e adaptadas às características do sítio.

A decisão do Tribunal de Justiça de São Paulo (TJSP) de acatar a solicitação do Ministério Público do Estado de São Paulo (MPSP) para a produção de prova pericial representou um marco importante no âmbito da ação civil pública. A perícia judicial foi determinada para esclarecer dúvidas críticas sobre a ineficácia das medidas adotadas pelos arguidos na recuperação do local e a necessidade de estabelecer uma indenização pelos danos ambientais.

Os principais pontos a serem analisados pelo perito nomeado pelo tribunal incluíram:

- Avaliação da eficácia e suficiência das ações de investigação e remediação – O perito deveria examinar se as ações realizadas ao longo dos anos foram suficientes e eficazes, identificando lacunas técnicas, omissões e falhas metodológicas que possam ter comprometido a recuperação do local;
- Delimitação da extensão da contaminação – O estudo deveria indicar com precisão a distribuição tridimensional da contaminação, incluindo possíveis áreas ainda não investigadas que poderiam representar riscos ambientais e para a saúde pública;
- Verificação da adequação das técnicas de remediação empregadas – A perícia deveria avaliar se as técnicas de remediação utilizadas estavam alinhadas com as melhores práticas internacionais, se eram compatíveis com as características do local e se atendiam à legislação ambiental vigente;
- Eficiência dos estudos – A análise deveria avaliar se os estudos foram representativos da real situação do sítio contaminado e se os métodos empregados foram adequados para detectar e avaliar os contaminantes presentes.
- Determinação do impacto económico da contaminação – A perícia também deveria calcular os danos financeiros associados ao tempo em que os recursos água subterrânea esteve indisponível para uso.

Essa produção de prova pericial foi uma etapa determinante para fornecer evidências técnicas e científicas que fundamentassem a decisão judicial e garantisse que os responsáveis fossem adequadamente penalizados e obrigados a reparar os danos ambientais.

Os resultados da perícia ambiental realizada em 2020 foram decisivos para a compreensão técnica e legal do caso, fornecendo uma visão clara sobre as divergências entre as partes envolvidas no processo judicial. Essa avaliação detalhada foi essencial para reduzir as incertezas acerca da real condição ambiental do local e identificar falhas nos processos investigativos e nas ações de remediação adotadas ao longo dos anos.

A análise técnica aprofundada apontou que as medidas implementadas não foram suficientes para mitigar os riscos ambientais e para a saúde pública. Além disso, a perícia quantificou os impactos ambientais remanescentes, avaliou os riscos potenciais e estabeleceu responsabilidades associadas à contaminação. Essas constatações reforçaram a necessidade de uma

abordagem mais rigorosa e eficaz, garantindo que os responsáveis adotassem medidas corretivas mais assertivas e alinhadas com as exigências ambientais e jurídicas.

A investigação detalhada realizada em 2021 representou um avanço significativo na caracterização da contaminação e na redução das incertezas que persistiam nos estudos anteriores. O plano de investigação foi elaborado com uma abordagem abrangente e integrada, contemplando todas as fontes potenciais de contaminação que ainda não haviam sido devidamente investigadas e preenchendo as lacunas técnicas identificadas nas avaliações anteriores.

Os principais objetivos dessa investigação foram refinar o modelo geológico-hidrogeológico, delimitar fontes primárias e secundárias, definir com precisão as plumas dissolvidas nas águas subterrâneas e avaliar a presença de vapores no solo e no ar ambiente. Além disso, a construção de um modelo conceptual detalhado, destacando os possíveis cenários de exposição dos recetores humanos, foi essencial para embasar a nova avaliação quantitativa de risco e a aplicação de um modelo matemático de fluxo e transporte.

A Etapa 1 da investigação detalhada foi estruturada para fornecer uma caracterização de alta resolução do solo e da água subterrânea, permitindo um entendimento preciso da distribuição dos contaminantes e das condições geológicas do local. Essa abordagem foi essencial para suprir as lacunas identificadas nos estudos anteriores e garantir uma base técnica mais robusta para a definição de estratégias de remediação.

As principais atividades desenvolvidas nesta fase incluíram:

- 40 perfurações abrangendo diferentes camadas do solo, integrando diferentes camadas geológicas e possibilitando uma análise detalhada da heterogeneidade geológica;
- Recolha de 120 amostras de solo (três por sondagem), para análise de compostos orgânicos voláteis halogenados (COVH) e hidrocarbonetos de petróleo (TPH) fracionado;
- Execução de 40 sondagens utilizando equipamento Geoprobe®, com profundidades entre 3 e 6 metros, permitindo a recolha de 120 amostras de água subterrânea, distribuídas ao longo do perfil vertical da zona saturada (03 amostras por ponto), para análise química de COVH e TPH fracionado.

A adoção de técnicas de alta resolução, aliada ao uso de sondagens direcionadas e análises químicas detalhadas, permitiu a identificação mais precisa das zonas impactadas e das

plumas de contaminação, fornecendo dados críticos para o refinamento do modelo conceitual e a elaboração de uma estratégia de remediação mais eficiente e adaptada à realidade do local.

A Figura 8.2.2. apresenta o perfil até o solo de alteração.

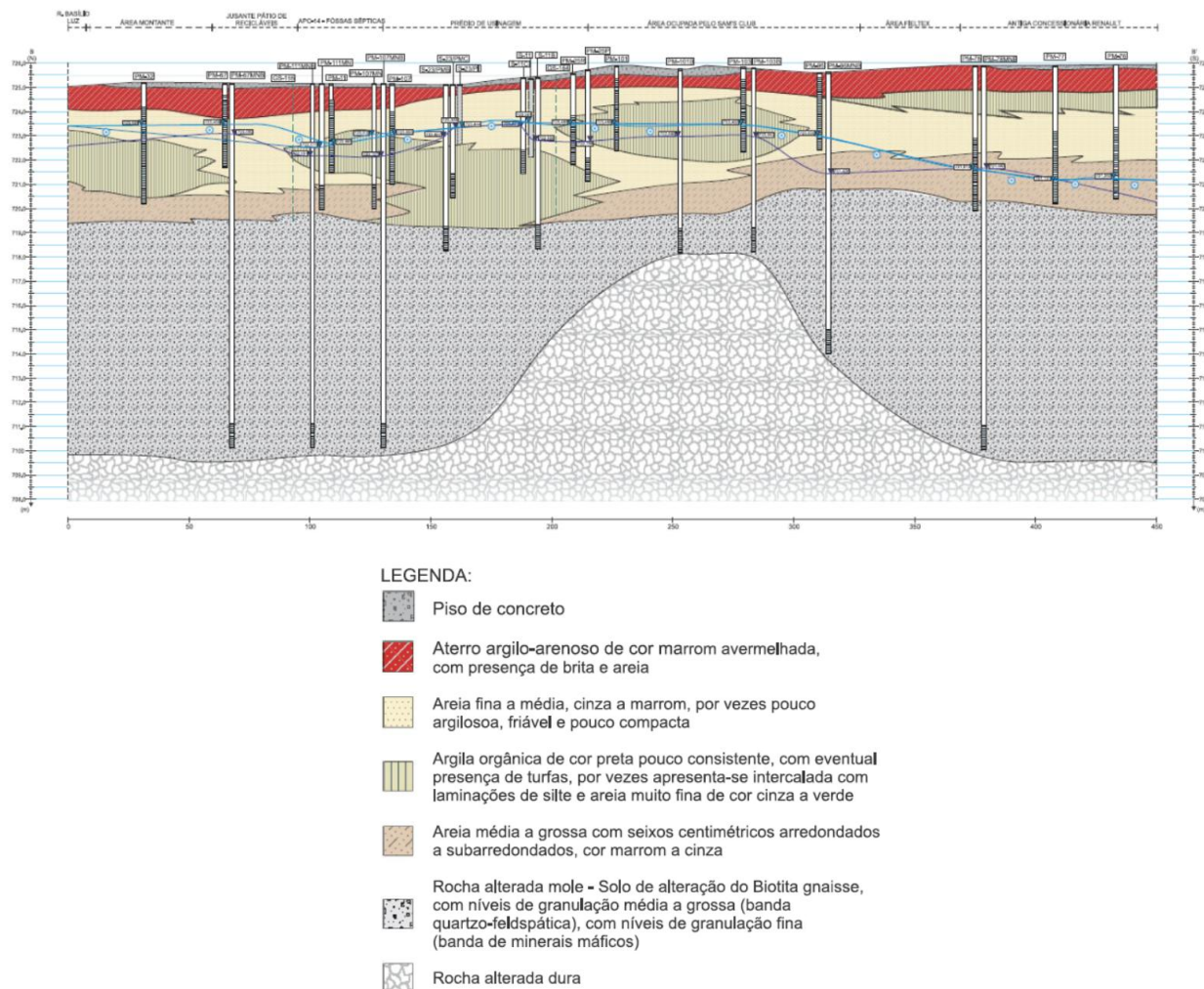


Figura 8.2.2. Perfil até a rocha-mãe.

Fonte: ACP (2016)

A Etapa 2 da investigação detalhada foi focada na delimitação tridimensional da contaminação na fase dissolvida, tanto nos planos horizontal quanto vertical. Para isso, foram instalados 28 novos piezômetros, garantindo uma rede de monitorização mais abrangente e representativa das condições hidrogeológicas do local. Esse refinamento foi essencial para compreender a extensão da contaminação, identificar as vias preferenciais de fluxo dos contaminantes e subsidiar a avaliação de risco.

As principais atividades realizadas nesta etapa incluíram:

- Instalação de 5 piezômetros superficiais (até 4 metros de profundidade), para investigação da qualidade da água subterrânea nas camadas mais rasas do aquífero superficial;
- Instalação de 5 piezômetros no Nível A (até 6 metros de profundidade), para avaliação da contaminação em camadas intermediárias compostas por cascalhos e argilas;
- Instalação de 18 piezômetros no Nível B (até 10 metros de profundidade), direcionados à investigação do aquífero intermediário, localizado na zona de alteração da rocha;
- Recolha de 36 amostras de solo (duas por sondagem no Nível B), enviadas para análises químicas de COVH, visando determinar a adsorção de contaminantes na matriz do solo.

A Etapa 3 da investigação detalhada foi dedicada à monitorização ambiental, garantindo uma avaliação abrangente e contínua da contaminação. Para isso, foram analisados 158 piezômetros previamente instalados, abrangendo diferentes profundidades e setores do sítio de estudo. Além disso, foram recolhidas e analisadas quatro amostras de fase livre, possibilitando uma caracterização mais precisa da presença e comportamento dos DNAPLs no meio subterrâneo. Essa abordagem sistemática forneceu dados críticos para entender a evolução da pluma de contaminação, seus impactos e possíveis caminhos de migração.

A Etapa 4 teve como foco o refinamento do modelo hidrogeológico, essencial para compreender com precisão a distribuição das camadas litológicas, os parâmetros hidrogeológicos e a distinção entre zonas de transporte e armazenamento de contaminantes. Para atingir esse nível de detalhamento, foram conduzidas as seguintes atividades:

- 30 ensaios de condutividade hidráulica (*slug test*) na rede de piezômetros, permitindo a obtenção de valores quantitativos de permeabilidade e fluxo de água subterrânea;
- Recolha de 9 amostras de solo para ensaios geotécnicos, incluindo análises de porosidade total e efetiva, densidade dos grãos, densidade aparente, teor de humidade e granulometria, fundamentais para compreender a capacidade de retenção e migração dos contaminantes no solo;
- Levantamento topográfico e georreferenciação das sondagens e piezômetros, garantindo um mapeamento detalhado e preciso do sítio investigado.

A Etapa 5 teve como foco a avaliação da intrusão de vapores e a amostragem do ar ambiente, um aspeto essencial para compreender os riscos associados à volatilização de

contaminantes e sua possível exposição a recetores humanos. Esse estudo foi realizado por meio da recolha sistemática de amostras de vapores do contrapiso e do ar ambiente, garantindo uma análise detalhada da qualidade do ar em diferentes cenários.

Para avaliar a intrusão de vapores, foram instalados 10 poços sub-slab, estrategicamente distribuídos em áreas prioritárias da investigação. As amostras foram recolhidas semestralmente, totalizando quatro campanhas de monitorização. Esse procedimento permitiu acompanhar a variação temporal das concentrações de contaminantes voláteis, fornecendo subsídios para a validação do modelo conceptual e a identificação de zonas críticas.

Paralelamente, foi conduzido o monitoramento da qualidade do ar ambiente, com a recolha mensal de amostras em cinco pontos distintos, totalizando 12 campanhas ao longo do período de estudo. Essa abordagem possibilitou avaliar possíveis emissões de contaminantes voláteis para o ar interno e externo, identificando potenciais riscos para trabalhadores e demais ocupantes do sítio.

Os dados obtidos nesta etapa foram essenciais para a caracterização dos riscos de exposição a vapores, auxiliando na definição de medidas de mitigação e controlo, como a implementação de barreiras físicas, sistemas de ventilação ou outras estratégias de remediação adequadas ao cenário identificado.

Essas etapas foram essenciais para a integração de dados físicos e químicos ao modelo conceptual, permitindo um entendimento mais robusto sobre as dinâmicas da contaminação e as interações entre o solo, a água subterrânea e os contaminantes. Esse refinamento possibilitou a formulação de estratégias de remediação mais eficazes, direcionadas e sustentáveis, minimizando riscos ambientais e para a saúde humana.

8.2.1 Resultados das investigações realizadas em 2021

A análise detalhada das amostras geológicas permitiu um avanço significativo no refinamento do modelo geológico-hidrogeológico da área, fornecendo dados essenciais para a compreensão da dinâmica dos contaminantes no subsolo. Para isso, foram recolhidas cinco amostras deformadas e indeformadas, representativas das diferentes unidades litológicas presentes no local. Essas amostras foram submetidas a uma avaliação geotécnica detalhada, possibilitando a identificação das propriedades físicas e mecânicas dos materiais geológicos e sua influência no transporte e retenção de contaminantes.

Os ensaios de granulometria realizados nas amostras provenientes da camada de aterro confirmaram as observações de campo, destacando a heterogeneidade do material e a presença de frações argilosas e arenosas misturadas. Esse dado é fundamental para a modelagem do fluxo de contaminantes, uma vez que diferentes granulometrias afetam diretamente a permeabilidade e a mobilidade dos contaminantes.

Os resultados das análises das amostras indeformadas revelaram que a camada de aterro argiloso apresenta uma porosidade total elevada (65,10%), mas uma porosidade efetiva significativamente baixa (4,30%). Esse comportamento reflete a baixa conectividade entre os poros, resultado do alto teor de argila e dos processos de compactação do aterro, que reduzem a capacidade de infiltração e dificultam o transporte dos contaminantes. A baixa porosidade efetiva confirma que essa camada funciona como uma barreira natural à migração da contaminação, restringindo a mobilidade dos contaminantes dissolvidos e potencialmente influenciando os processos de *back-diffusion* ao longo do tempo.

A caracterização detalhada da geologia desempenha um papel estratégico na definição da distribuição da massa de contaminante, assegurando que os dados obtidos sejam representativos e precisos. Compreender a estrutura geológica do local é essencial para o correto posicionamento dos filtros dos piezômetros, garantindo que a amostragem seja realizada nas zonas mais apropriadas para cada objetivo da investigação. Essa abordagem permite identificar corretamente os diferentes compartimentos hidroestratigráficos, garantindo a qualidade dos dados e reduzindo as incertezas associadas à caracterização da contaminação.

Quando o objetivo da investigação é caracterizar a fase dissolvida, os filtros devem ser instalados nas zonas de fluxo, onde a circulação da água subterrânea é mais intensa e a mobilidade dos contaminantes é maior. No entanto, quando o objetivo é avaliar a fase retida ou adsorvida, os filtros precisam ser posicionados nas zonas de armazenamento, compostas por materiais de baixa permeabilidade, como siltes e argilas, que funcionam como reservatórios secundários de contaminação. A correta diferenciação entre essas zonas evita interpretações equivocadas e permite o desenvolvimento de estratégias de remediação mais eficazes, garantindo uma abordagem mais assertiva e eficiente na mitigação dos riscos ambientais.

A propriedades hidrogeológicas obtidas são apresentadas na Tabela 8.2.1.1.1.

Aquíferos	Profundidade máxima	Porosidade total (%)	Porosidade efetiva (%)	Condutividade hidráulica (raso)	Condutividade hidráulica (nível A)	Velocidade fluxo água subterrânea (raso) (m/ano)	Velocidade fluxo água subterrânea (nível A) (m/ano)	Velocidade fluxo água subterrânea (nível B) (m/ano)
Superficial	6,0m	71 - 7,25	48,90 - 11	1,0E-04	1,0E-03	22,96	77,36	-
Intermediário	31,5	47,3	18,5	1,0E-04	1,0E-06	-	-	2,49

Tabela 8.2.1.1.1. Propriedades hidrogeológicas

A profundidade rasa do nível de água subterrânea na área, variando entre 0,80 m e 2,5 m, exerce uma influência direta na mobilidade dos contaminantes e a vulnerabilidade do aquífero à infiltração de contaminantes superficiais. Essa condição favorece o transporte rápido dos contaminantes dissolvidos, aumentando o risco de dispersão da pluma e de impacto em corpos hídricos superficiais. Além disso, a proximidade do lençol freático pode comprometer a eficácia de determinadas estratégias de remediação, exigindo técnicas adaptadas às condições hidrogeológicas locais.

A análise da direção do fluxo da água subterrânea revelou um padrão dominante de nordeste para sudoeste (NE-SW), acompanhado de um componente secundário no sentido leste-oeste (E-W). Ambas as direções de fluxo convergem em direção ao Rio Pinheiros, evidenciando a influência desse corpo hídrico na dinâmica hidrogeológica local. Esse padrão de fluxo reforça a necessidade de medidas de contenção e remediação, a fim de evitar a migração de contaminantes em direção ao rio, prevenindo potenciais impactos ambientais mais amplos. As Figuras 8.2.1.1 a 8.2.1.3 ilustram a potenciométrica do aquífero superficial, diferenciando os níveis raso, A e intermediário, permitindo uma visualização mais clara da distribuição e do gradiente hidráulico no sítio investigado.

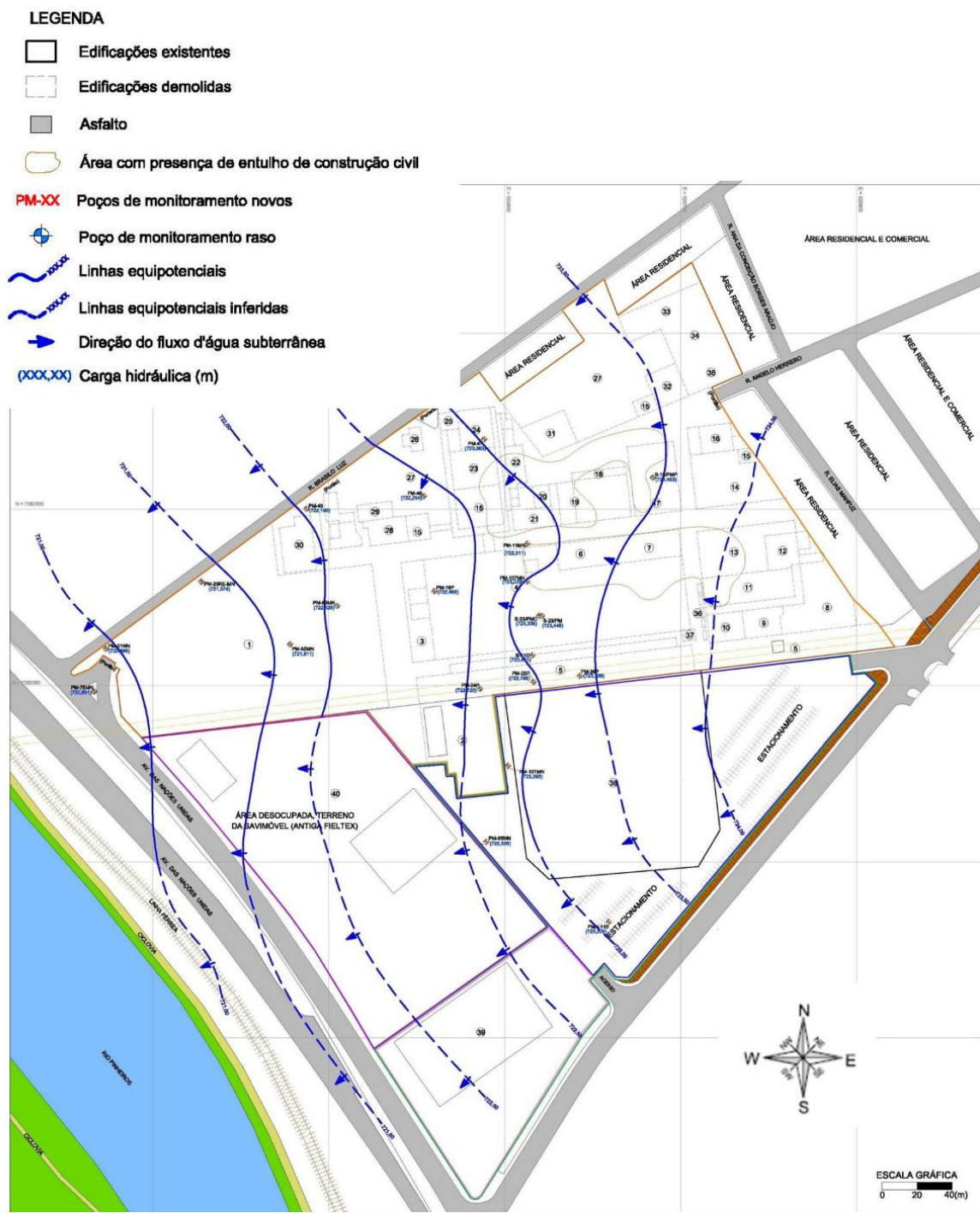


Figura 8.2.1.2: Potenciometria – nível A
 Fonte: ACP (2016)

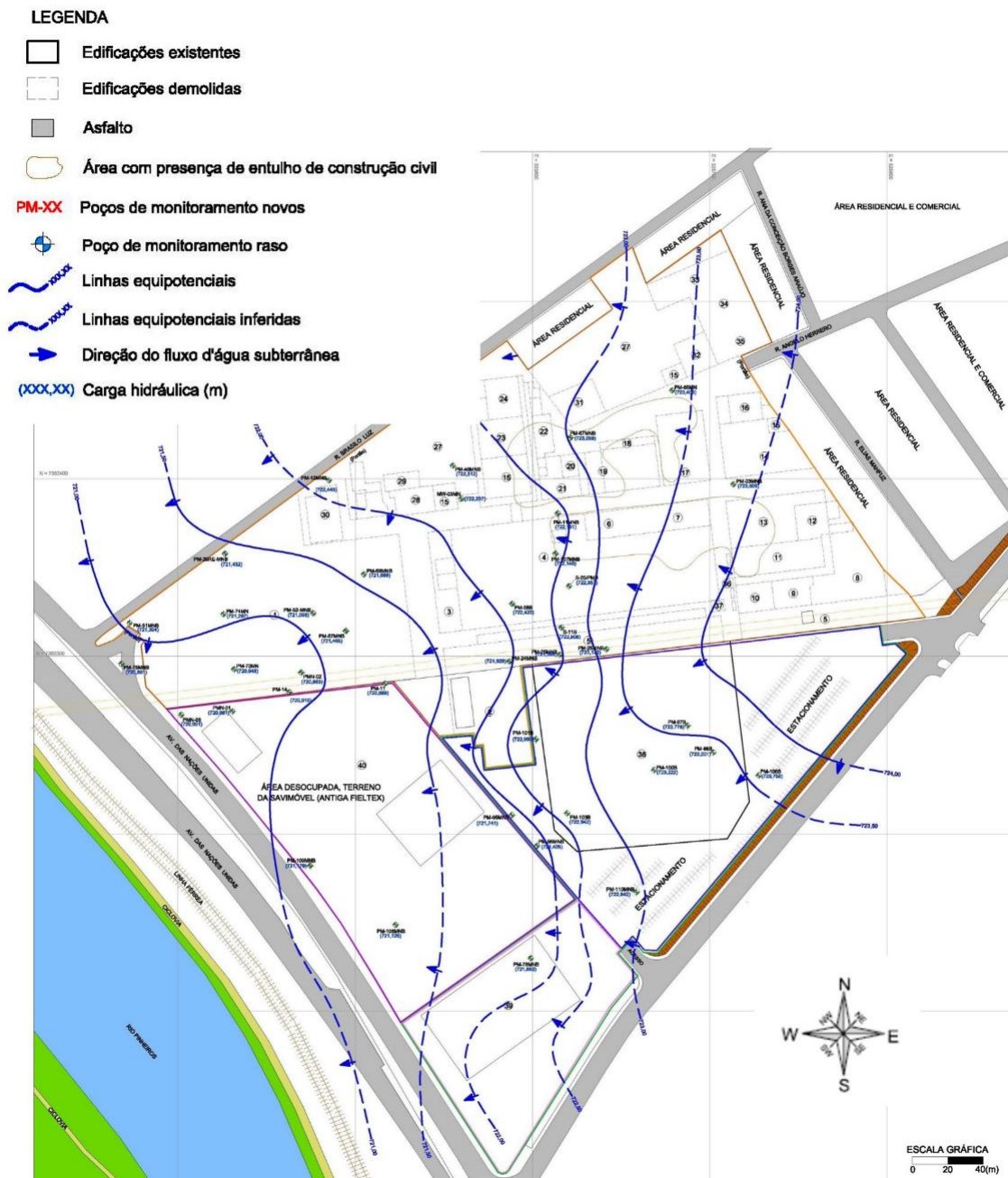


Figura 8.2.1.3: Potenciometria – nível intermediário
 Fonte: ACP (2016)

A determinação da velocidade do fluxo da água subterrânea é um parâmetro essencial para prever a migração dos contaminantes e estimar o tempo necessário para que os recetores sejam impactados. Esse cálculo baseia-se em fatores como o gradiente hidráulico, a condutividade hidráulica do meio e a porosidade efetiva dos materiais geológicos. Quanto maior a velocidade do fluxo, mais rapidamente os contaminantes podem se deslocar pelo aquífero, aumentando o risco de atingir áreas sensíveis e recetores vulneráveis.

Compreender essa dinâmica é essencial para modelar cenários de dispersão e avaliar a eficácia das medidas de contenção e remediação. Além disso, essa informação permite priorizar ações preventivas e garantir que intervenções sejam realizadas antes que a contaminação atinja pontos críticos de exposição. Dessa forma, a análise da velocidade do fluxo subterrâneo não apenas otimiza estratégias de mitigação, mas também fortalece a tomada de decisão, reduzindo incertezas e garantindo maior proteção ambiental e para a saúde humana.

8.2.1.1 Resultados da investigação

Os parâmetros *in-situ* avaliados durante a recolha das amostras de água subterrânea forneceram informações essenciais sobre as condições geoquímicas do aquífero e seu potencial para a atenuação natural dos contaminantes. Os resultados indicaram um meio levemente ácido, com pH abaixo da neutralidade, além de um ambiente predominantemente oxidante, intercalado com regiões parcialmente anaeróbias. Esses fatores influenciam diretamente a mobilidade e o destino dos contaminantes, sendo determinantes para o comportamento dos hidrocarbonetos clorados no meio subterrâneo.

A temperatura registada mostrou-se propícia ao desenvolvimento de bactérias envolvidas no processo de degradação natural do PCE via desalogenação reductiva, um mecanismo biológico fundamental para a transformação e remoção de contaminantes. A Tabela 8.2.1.1.1. apresenta a média dos resultados obtidos, permitindo uma análise mais detalhada das condições hidrogeoquímicas da área investigada.

Aquíferos	pH	Eh	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	OD (mg/L)	T ($^{\circ}\text{C}$)
Superficial	5 - 6,9	oxidante	76,0	2,0	24,0
Intermédio	6- 6,9		1556,0		

Tabela 8.2.1.1.1. Parâmetros *in-situ*

A investigação de alta resolução realizada nas áreas prioritárias foi essencial para a identificação das principais áreas-fonte de contaminação. A aplicação de técnicas avançadas permitiu um mapeamento detalhado da distribuição dos contaminantes, proporcionando uma visão mais clara e dinâmica da contaminação no subsolo.

Os dados obtidos indicaram que as fontes estão concentradas nos centros de massa das plumas de etenos clorados no aquífero superficial, evidenciando a persistência de fontes secundárias. Essas fontes atuam como reservatórios de contaminação, libertando contaminantes de forma gradual e sustentando a presença da contaminação ao longo do tempo. Essa constatação reforça a necessidade de estratégias de remediação direcionadas, que considerem tanto

a remoção das fontes primárias quanto a redução da libertação de contaminantes das zonas de armazenamento.

8.2.1.2 Refinamento do modelo conceptual

A investigação realizada permitiu um refinamento significativo do modelo conceptual, aprimorando a compreensão da distribuição espacial e da mobilidade dos contaminantes. Além disso, os resultados obtidos reforçam a necessidade de estratégias de remediação direcionadas, que considerem tanto a remoção das fontes primárias quanto a mitigação do efeito da *back-diffusion* em matrizes de baixa permeabilidade. O entendimento mais aprofundado da dinâmica da contaminação possibilita uma abordagem mais eficaz, evitando intervenções que possam mobilizar ainda mais os contaminantes e comprometendo a eficácia da remediação.

As Figuras 8.2.1.2.1 e 8.2.1.2.2 ilustram o modelo conceptual da área, destacando as principais áreas-fonte, as plumas de isoconcentração (soma das concentrações de etenos clorados), as plumas de fase livre, os solos impactados e as vias de exposição relacionadas com os potenciais recetores. Essas informações são essenciais para direcionar as próximas etapas do processo, garantindo que as ações implementadas sejam fundamentadas em uma análise precisa e representativa da realidade do sítio contaminado.

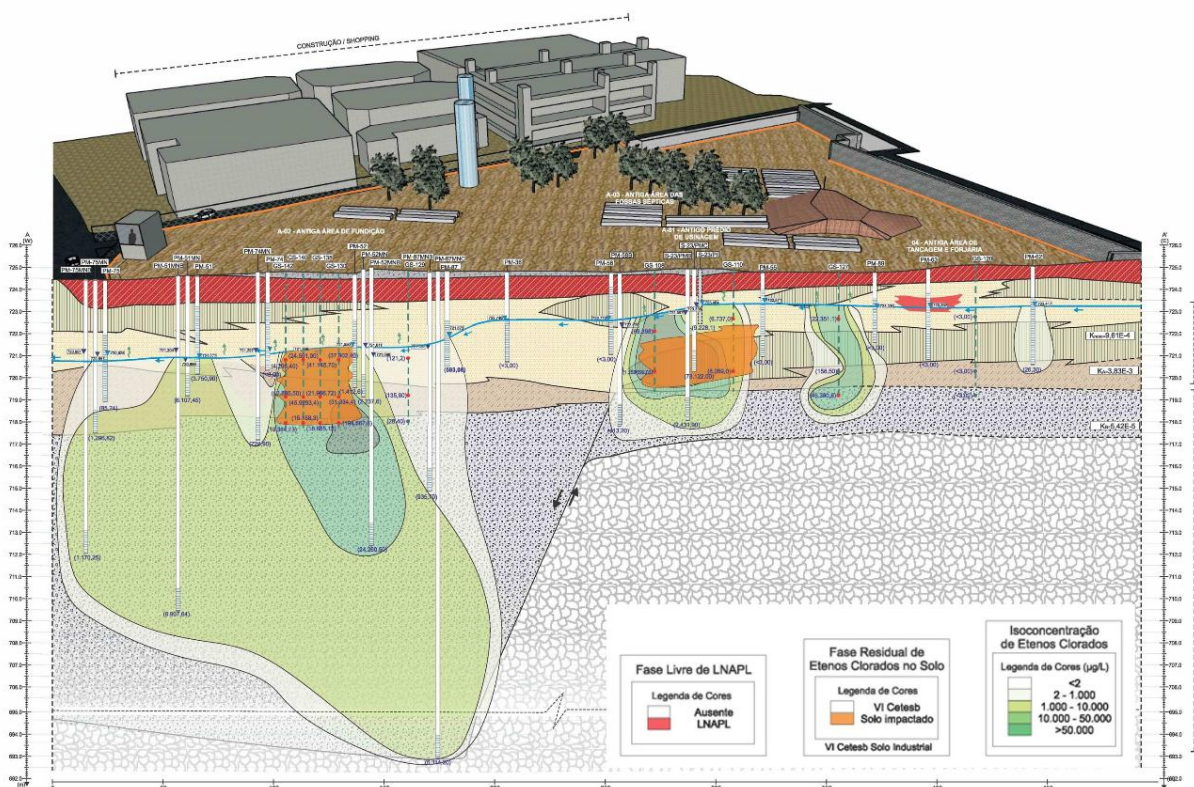
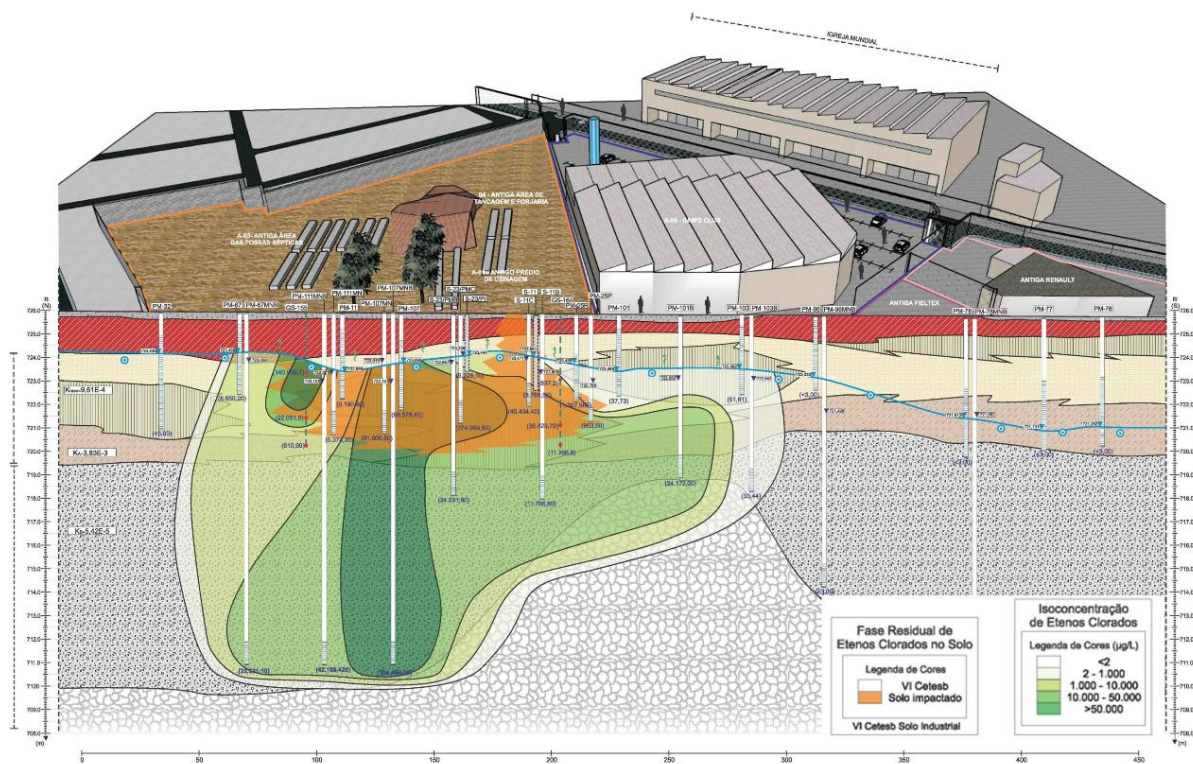


Figura 8.2.1.2.1: Modelo conceptual no perfil A-A'

Fonte: ACP (2016)



A evolução dos estudos permitiu um refinamento das áreas com potencial de contaminação, possibilitando a associação direta da contaminação do local a quatro fontes principais, classificadas como áreas prioritárias. Essas fontes foram identificadas como os principais pontos de aporte de contaminantes em fase dissolvida para o sistema hidrogeológico, evidenciando a continuidade do processo de contaminação ao longo do tempo.

Atualmente, não há mais fontes primárias ativas na área, o que indica que as principais origens da contaminação estavam ligadas às operações industriais passadas, que já foram desativadas. No entanto, o impacto residual dessas atividades ainda persiste, influenciando a qualidade ambiental do local. O foco da remediação agora está na mitigação dos efeitos das plumas contaminadas, considerando a presença de fontes secundárias que ainda podem contribuir para a manutenção da contaminação.

8.2.1.3 Pluma de contaminação e estimativa de massa de contaminante

Os compostos orgânicos voláteis (COVs), como o PCE (tetracloeteno), TCE (tricloroetileno), 1,2-DCE (1,2-dicloroeteno) e CV (cloreto de vinilo), representam as principais substâncias químicas existentes no sítio investigado. Ao somar as massas desses compostos adsorvidos nas quatro áreas prioritárias, obteve-se ao total de 3.542 kg de hidrocarbonetos alifáticos

clorados retidos no solo. Esse resultado evidencia a magnitude da contaminação e a complexidade do cenário, ressaltando a necessidade de estratégias específicas para a remoção ou estabilização desses compostos. (Tabela 8.2.1.3.1)

Composto	Massa (Kg)
PCE	3.399
TCE	86
DCE	51
CV	6,8

Tabela 8.2.1.3.1. Massa de contaminante

O histórico das monitorizações das águas subterrâneas revelou uma estabilidade nas concentrações e na distribuição espacial dos contaminantes ao longo do tempo. No entanto, com o refinamento da investigação nas áreas prioritárias, foram identificados novos centros de massa de PCE, com concentrações significativamente superiores às observadas anteriormente. Essa elevação nas concentrações, ultrapassando 10% do coeficiente de solubilidade dos compostos primários, reforça a suspeita da presença de DNAPL nessas áreas. Esse achado implica a necessidade de investigações adicionais e da aplicação de estratégias de remediação específicas, visando a remoção ou contenção dessa fase líquida imobilizada no subsolo, que pode atuar como fonte contínua de contaminação, dificultando a recuperação ambiental da área.

As plumas de isoconcentração dos hidrocarbonetos alifáticos clorados (PCE, TCE, 1,2-DCE e CV) foram mapeadas com precisão, permitindo a delimitação clara dos seus centros de massa. Os resultados analíticos das amostras de solo confirmaram a presença dessas substâncias em concentrações significativas, sendo os valores mais elevados:

- PCE: 6.184,00 mg/kg (3,0 m)
- TCE: 9,97 µg/L (2,2 m)
- 1,2-DCE: 11,70 µg/L (1,2 m)
- CV: 4,74 mg/kg (2,2 m)

Os dados das análises da água subterrânea também revelaram altas concentrações dessas substâncias, reforçando a persistência da contaminação em fase dissolvida.

- PCE: 193.660,00 µg/L (5,8 m)
- TCE: 10.615,90 µg/L (2,5 m)
- 1,2-DCE: 71.986,30 µg/L (2,5 m)
- CV: 125.648,50 µg/L (4,0m)

Figura 8.2.1.3.1: Pluma de PCE em planta
Fonte: ACP (2016)

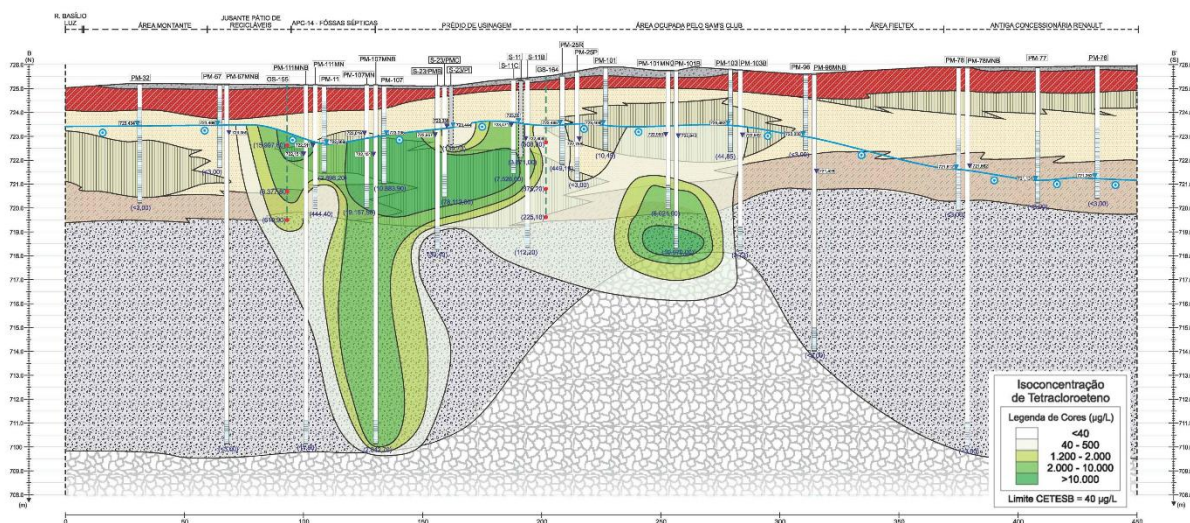


Figura 8.2.1.3.2: Pluma de PCE no perfil B-B'
Fonte: ACP (2016)

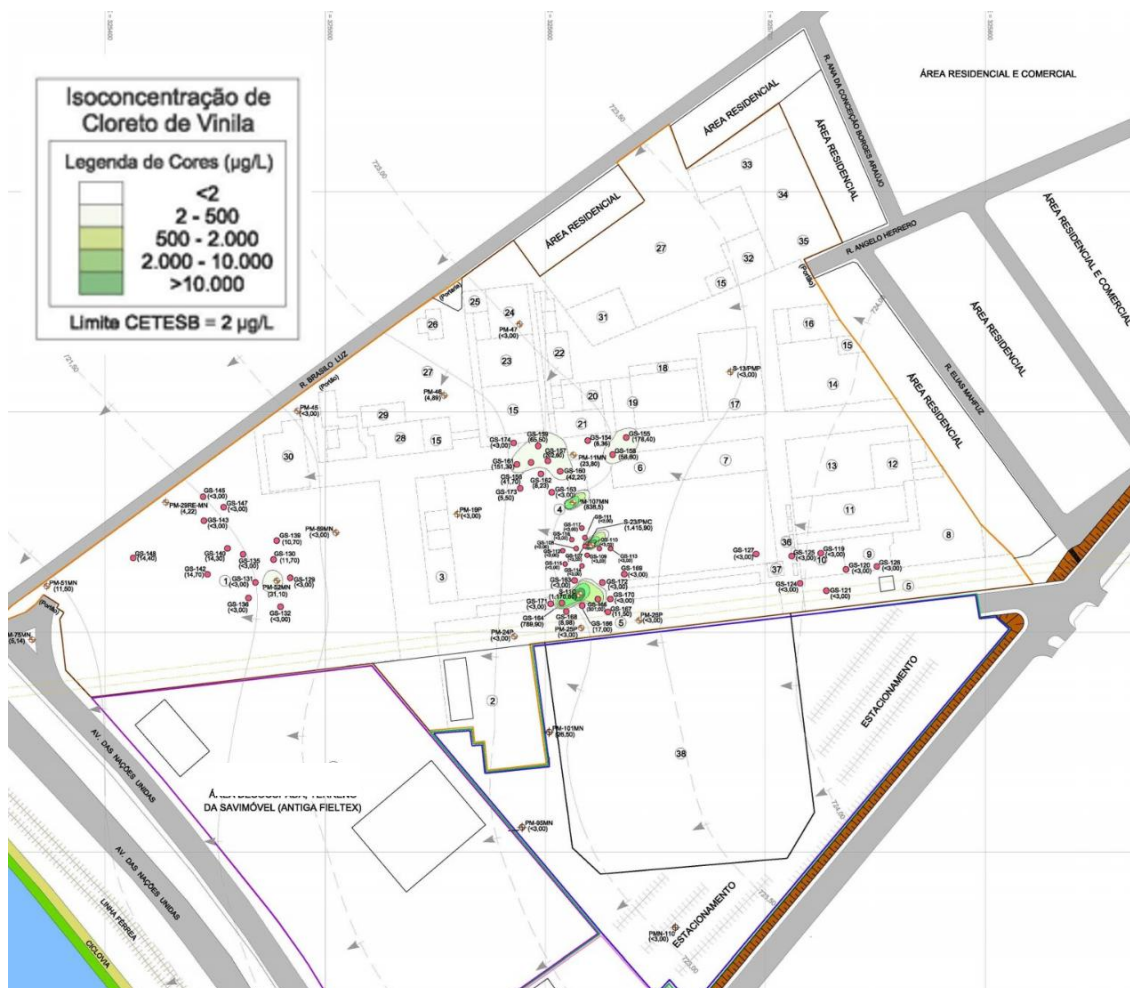


Figura 8.2.1.3.3. Pluma de CV em planta
Fonte: ACP (2016)

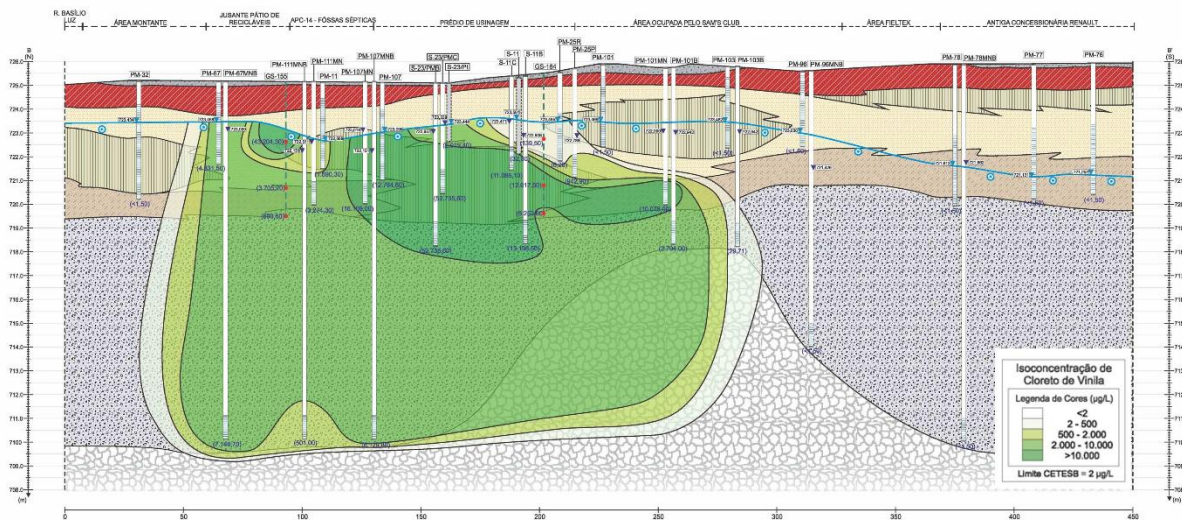


Figura 8.2.1.3.4: Pluma de CV no perfil B-B'
Fonte: ACP (2016)

Os dados geológico-hidrogeológicos do sítio investigado evidenciam uma heterogeneidade significativa nos solos, com reflexos diretos na mobilidade dos contaminantes e na eficiência das estratégias de remediação. Até 6 metros de profundidade, a sequência sedimentar caracteriza-se por um ambiente de deposição fluvial, composto por camadas alternadas de argila, silte, areia e cascalho. Essa variação influencia diretamente a permeabilidade do solo, criando zonas que podem tanto armazenar quanto transportar contaminantes. Abaixo dessa sequência sedimentar, encontra-se rocha alterada branca, proveniente do embasamento cristalino, cuja natureza anisotrópica dificulta a movimentação da água subterrânea e favorece a retenção de contaminantes em determinadas áreas.

A análise detalhada da hidroestratigrafia foram identificadas as principais zonas de armazenamento e de transporte, conforme apresentado na Tabela 8.2.1.3.2.

Tabela 8.2.1.3.2. Hidroestratigrafia dos aquíferos

Aquífero	Zona	Material predominante	Profundidade	Condutividade hidráulica
Superficial	armazenamento (baixa advecção)	argila orgânica preta, intercalada com laminações de silte e areia muito fina.	entre 2,0 e 4,5 metros	na ordem de 10^{-4} cm/s.
	transporte	areia fina a média e areia média a grossa com seixos.	entre 3,0 e 6,0 metros.	variando entre 10^{-4} e 10^{-7} cm/s.

Intermediário	-	Camada de rocha alterada branda apresentou um comportamento intermediário entre zonas de armazenamento e transporte.	de 6,0 metros (topo) até 31,5 metros (base).	<ul style="list-style-type: none"> - 10^{-4} cm/s (entre 6,0 e 7,0 metros). - 10^{-5} cm/s (entre 12 e 15 metros). - 10^{-6} cm/s (31,5 metros).
----------------------	---	--	--	--

Essa heterogeneidade litológica e hidrogeológica representa um desafio significativo para a caracterização e remediação da contaminação, tornando fundamental a aplicação de técnicas avançadas de modelagem hidrogeológica e a definição de estratégias específicas para cada zona.

A distribuição dos contaminantes nos diferentes níveis hidroestratigráficos evidenciou um padrão complexo de retenção e transporte, refletindo a interação entre as características litológicas e hidrogeológicas do sítio. Essa configuração reforça a necessidade de estratégias diferenciadas de remediação, considerando as particularidades de cada zona.

Os principais achados da caracterização foram:

- próximo e abaixo das áreas fontes: a massa de contaminantes está predominantemente concentrada na zona de armazenamento, onde os compostos PCE e TCE permanecem retidos em camadas de baixa permeabilidade, dificultando a mobilização e a remoção dos contaminantes;
- porção jusante da pluma: os contaminantes estão predominantemente na zona de transporte, com produtos de degradação como DCE e CV sendo mais dispersos e móveis, acompanhando o fluxo da água subterrânea. Esses compostos, apresentam maior mobilidade, aumentando o potencial de propagação da contaminação para áreas adjacentes.

Os resultados obtidos em 2021 confirmaram a persistência de DNAPLs em áreas prioritárias, o que reforça a necessidade de investigações complementares para determinar a extensão e o comportamento da pluma contaminante. Além disso, a heterogeneidade das camadas geológicas e a interação entre zonas de armazenamento e transporte complexificam a modelagem da dispersão dos contaminantes, tornando indispensável um planejamento detalhado para aprimorar as estratégias de remediação.

8.3 Investigação pré-remediação

Os dados obtidos na campanha de monitorização de 2023 forneceram informações fundamentais para o refinamento do modelo conceptual da contaminação e permitiram uma avaliação mais precisa da dinâmica dos contaminantes no meio subterrâneo. A análise detalhada das plumas de contaminação destacou três regiões prioritárias, que exigem abordagens específicas de remediação para garantir a efetiva mitigação dos riscos ambientais e à saúde humana. As principais áreas investigadas e os resultados obtidos foram:

- pluma central: a área de maior concentração de contaminantes, que requer monitorização contínua e detalhada para avaliar a eficácia das ações de remediação;
- pluma oeste: presença histórica de PCE no nível B, com disseminação recente para o aquífero superficial (nível raso e Nível A). Detecção de oleosidade na zona saturada, indicando a possível presença de LNAPL, o que demanda estratégias diferenciadas de intervenção.;
- pluma leste: identificação de hidrocarbonetos alifáticos clorados, reforçando potencial de migração para as águas subterrâneas. Necessidade de ações para minimizar os impactos ambientais e riscos para recetores humanos.

Os resultados analíticos da monitorização de 195 piezómetros foram fundamentais para reduzir significativamente as incertezas associadas ao modelo conceptual. O avanço na caracterização da contaminação permitiu a delimitação mais precisa das plumas, orientando as estratégias de remediação e a definição de medidas mais eficazes para o controlo da contaminação. As Figuras 8.3.1 a 8.3.4 ilustram a situação da contaminação em 2023, evidenciando a necessidade de intervenções personalizadas para cada setor afetado.

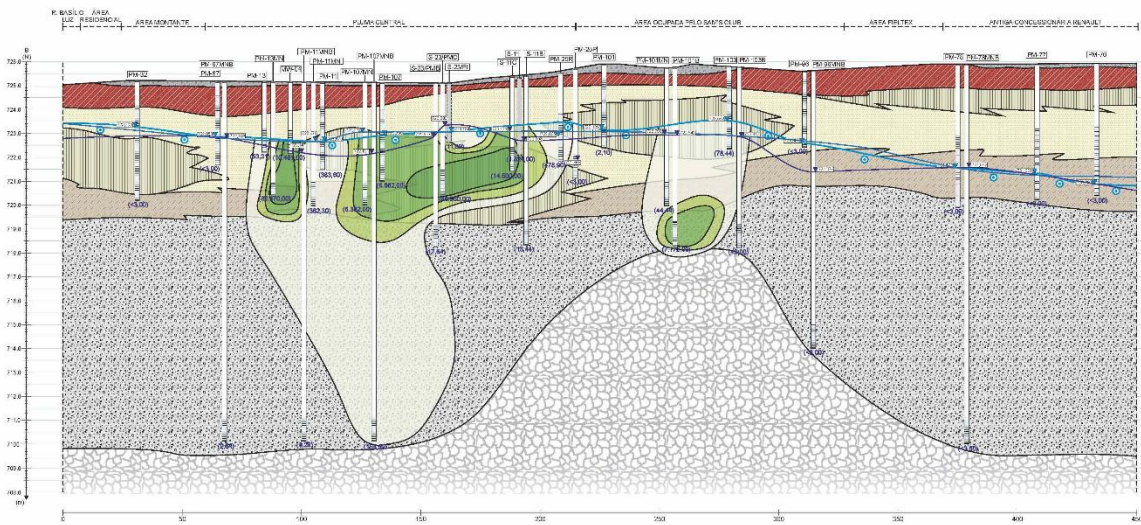


Figura 8.3.1.: Pluma de PCE no perfil B-B'
 Fonte: ACP (2016)

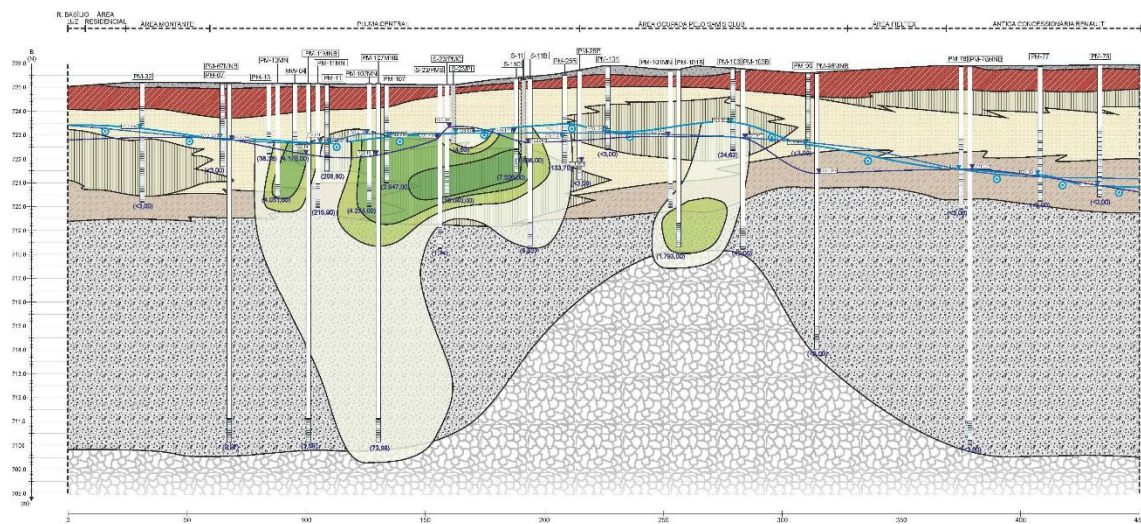


Figura 8.3.2.: Pluma de TCE no perfil B-B'
 Fonte: ACP (2016)

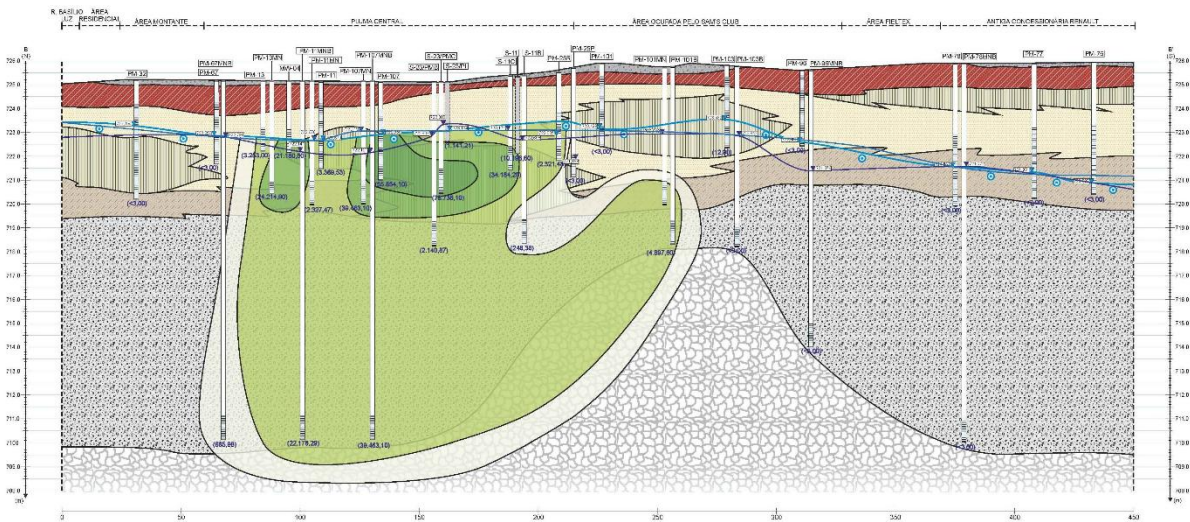


Figura 8.3.3: Pluma de DCE no perfil B-B'
Fonte: ACP (2016)

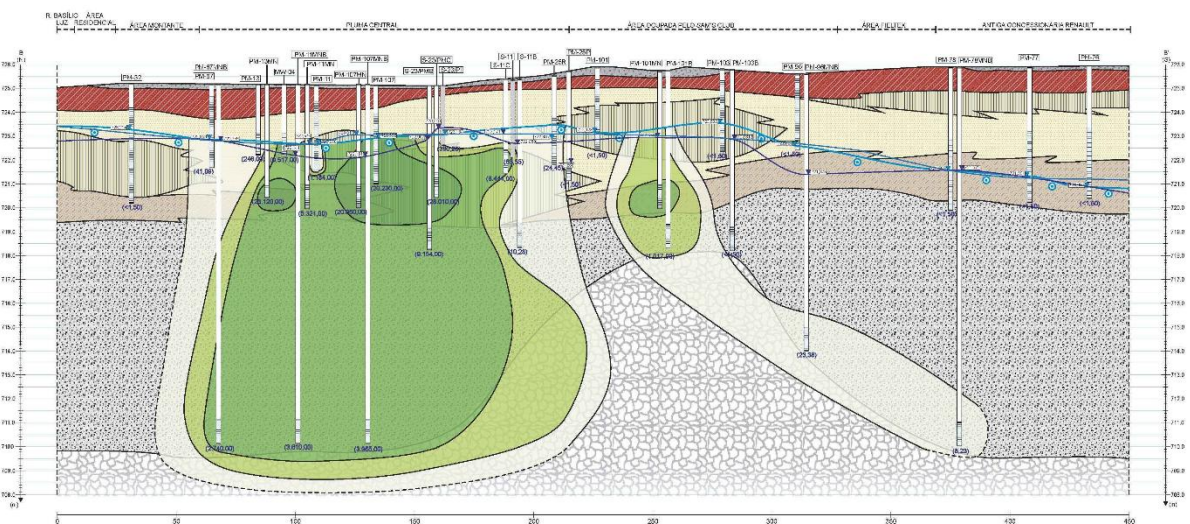


Figura 8.3.4: Pluma de CV no perfil B-B'
Fonte: ACP (2016)

A comparação entre as investigações de 2021 e 2023, evidencia as mudanças na distribuição e nas concentrações de PCE e CV em diferentes profundidades. Essas análises em perfil são fundamentais para compreender a evolução da contaminação, avaliar a eficácia das medidas implementadas e redefinir as estratégias de remediação com base nas áreas de maior persistência dos contaminantes.

As principais observações possíveis de serem extraídas ao compararmos as investigações de 2021 e 2023 são:

- Redistribuição dos contaminantes:

- O PCE não está mais concentrado nos níveis mais profundos.
- O CV apresenta as maiores concentrações nos níveis mais profundos.
- Variações nas concentrações:
 - Em alguns setores, observou-se uma redução das concentrações, indicando que as condições ambientais podem estar favorecendo a atenuação natural.
 - Em outros pontos, houve um aumento das concentrações, possivelmente devido à remobilização da contaminação por processos de difusão reversa (*back-diffusion*) ou variações nas condições hidrogeológicas.
- Impactes para o planeamento da remediação:
 - A análise detalhada dos perfis permite refinar o modelo conceptual, garantindo uma estratégia de remediação mais eficiente e direcionada.
 - A presença contínua de altas concentrações em profundidade reforça a necessidade de abordagens que alcancem zonas de armazenamento, reduzindo o potencial de recontaminação da fase dissolvida ao longo do tempo.

A importância da investigação pré-remediação reside no planeamento estratégico da intervenção, otimizando recursos e evitando custos excessivos. Embora muitos responsáveis pela contaminação subestimem essa fase, argumentando que já existem dados suficientes de estudos anteriores, a experiência demonstrou que uma caracterização detalhada pode reduzir em até 14 vezes o custo total da remediação. Essa abordagem permite evitar desperdícios, definir metas realistas e garantir que as estratégias adotadas sejam efetivas e ajustadas às reais condições do local.

No caso da pluma de PCE, ilustrada na Figura 8.3.5, a investigação pré-remediação demonstrou que as maiores concentrações estavam em uma profundidade menor do que se previa inicialmente. Se a remediação tivesse sido implementada com base nos dados de 2021, os custos teriam sido significativamente maiores, devido à necessidade de intervenções mais profundas e complexas. Com o refinamento dos dados, foi possível reduzir consideravelmente os volumes de reagentes e os equipamentos necessários, resultando em:

- i. a remediação precisaria entrar no substrato rochoso de base, o que aumenta sobremaneira a complexidade e os custos envolvidos,
- ii. as maiores concentrações não estavam em profundidade e o volume de contaminação não era tão elevado como previsto, o que reduz:
 - a quantidade de reagente para oxidação química,
 - a profundidade das lanças de aquecimento,
 - o volume de gás tratado no SVE,
 - o tempo global de remediação, e

- os custos totais.

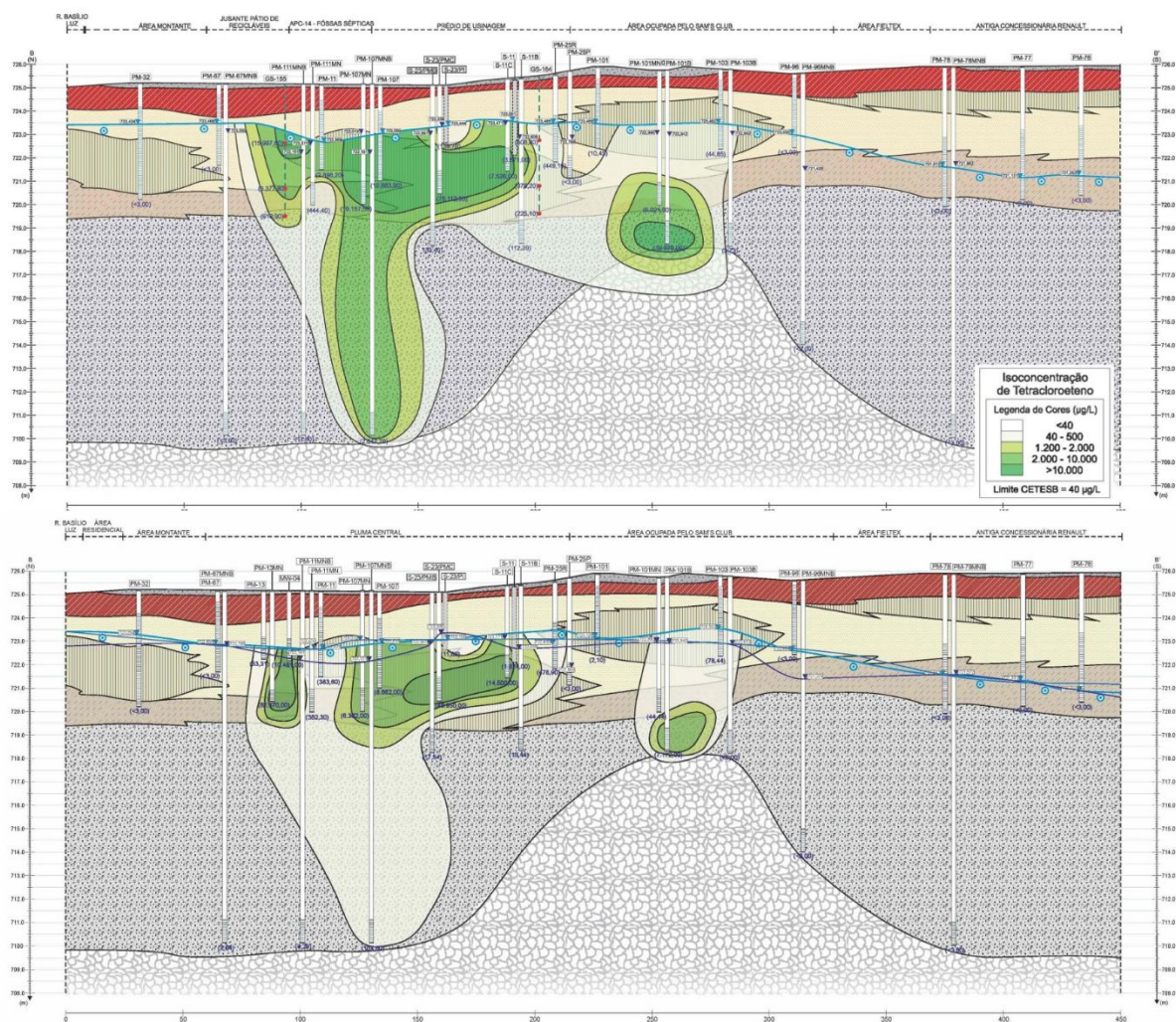


Figura 8.3.5: Plumas de PCE no perfil B-B' (2021 e 2023)
Fonte: ACP (2016)

No caso do cloreto de vinilo (CV), a investigação pré-remediação revelou um cenário distinto do esperado, evidenciando a importância do refinamento dos dados antes da implementação das técnicas de remediação (Figura 8.3.6). Se a remediação tivesse sido projetada com base nos dados de 2021, o processo teria sido subdimensionado, resultando em um problema recorrente em projetos desse tipo: o não cumprimento dos prazos devido a uma subestimação da massa de contaminantes presentes no local. Isso ocorre porque, sem um levantamento detalhado, alguns parâmetros essenciais para a definição da estratégia de remediação podem não ser considerados, comprometendo a precisão do modelo conceitual.

Nesse caso, com o refinamento dos dados, percebeu-se que:

- i. as concentrações de CV eram significativamente mais elevadas em profundidade do que se previa inicialmente;
- ii. o volume de contaminação era maior do que o estimado, com isso, aumenta
 - a quantidade de reagente para oxidação química,
 - a profundidade das lanças de aquecimento,
 - o volume de gás tratado no SVE,
 - ampliação do tempo global de remediação, e
 - elevação dos custos totais.

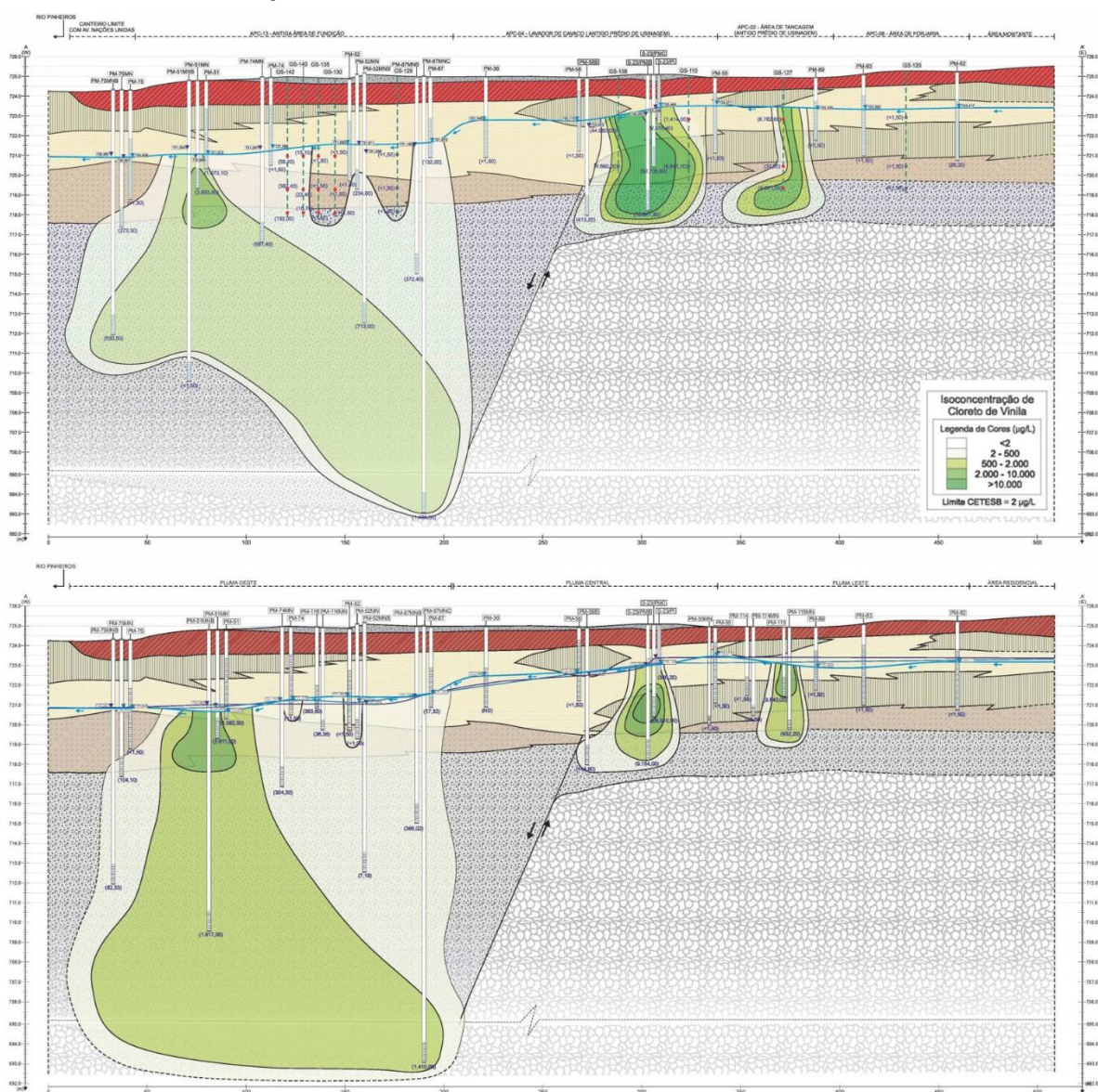


Figura 8.3.6: Plumas de CV no perfil B-B' (2021 e 2023)
Fonte: ACP (2016)

Esse exemplo demonstra que um refinamento detalhado da caracterização do local não apenas otimiza os investimentos na remediação, mas também evita atrasos e custos extras

associados a falhas no planejamento. Sem esse estudo aprofundado, os responsáveis poderiam enfrentar desafios operacionais imprevistos, prolongando o tempo de remediação e aumentando significativamente os custos do projeto.

A caracterização detalhada de sítios contaminados é a base para a implementação de estratégias de remediação eficazes, económicas e sustentáveis. Embora abordagens simplificadas sejam frequentemente utilizadas devido a restrições de tempo e orçamento, elas podem falhar em capturar a complexidade dos processos ambientais. A heterogeneidade geológica, as diferentes interações entre contaminantes e a variação das condições hidrogeológicas exigem investigações de alta resolução para garantir que a remediação seja direcionada e eficiente. Tecnologias modernas e metodologias científicas avançadas são ferramentas essenciais para compreender a dinâmica do local, reduzir incertezas e otimizar recursos. Dessa forma, uma caracterização robusta não apenas melhora a escolha das técnicas de remediação, mas também assegura uma recuperação ambiental que atende aos critérios de segurança e sustentabilidade a longo prazo.

A gestão de riscos ambientais em sítios contaminados exige uma abordagem proativa e baseada em dados concretos. Os estudos realizados até o momento demonstram que a implementação de medidas de remediação é imprescindível para minimizar os impactos da contaminação no solo, nas águas subterrâneas e no ar.

8.4 Conclusão dos estudos

Os estudos ambientais realizados entre 1996 e 2016 desempenharam um papel fundamental na identificação da contaminação e na avaliação de seus impactos no meio ambiente e na saúde humana. No entanto, como evidenciado ao longo desta análise, muitos desses estudos adotaram metodologias desatualizadas ou inadequadas, sem atender plenamente às normas técnicas exigidas. Entre as principais falhas, destacam-se a instalação dos piezômetros com filtros de mesmo comprimento, sem ter em conta as zonas de fluxo ou de armazenamento, o que comprometeu a representatividade das amostras; falhas na recolha de amostras de água subterrânea, sem considerar a análise de amostras de solo, fundamental para uma caracterização mais completa; a ausência de medições físico-químicas *in-situ* que comprometeu a qualidade das investigações; e a profundidade das sondagens realizadas foi inadequada para capturar as características do contaminante, afetando a precisão e a eficácia da investigação.

Os dados apresentados demonstram que a caracterização imprecisa da contaminação levou a ações de remediação fragmentadas e pouco eficazes, prolongando o problema ao longo das décadas. Em contraste, as investigações realizadas a partir de 2016, adotaram metodologias mais avançadas e alinhadas às melhores práticas internacionais, permitindo um refinamento do modelo conceptual e uma delimitação mais precisa das áreas prioritárias de intervenção. Esses avanços ressaltam a importância de seguir protocolos técnicos rigorosos e de realizar investigações detalhadas antes da implementação de qualquer medida de remediação, garantindo que as decisões sejam baseadas em dados representativos e confiáveis.

A superficialidade e incompletude das investigações realizadas anteriormente é particularmente preocupante, especialmente no caso dos DNAPLs, que, devido à sua densidade, tendem a se acumular em maiores profundidades. A ausência de informações sobre essas camadas mais profundas compromete a seleção da técnica de remediação mais adequada. Além disso, a falta de parâmetros *in situ* impossibilita uma avaliação abrangente da geoquímica local, aspecto essencial para compreender as interações entre os contaminantes e os materiais geológicos, influenciando diretamente a definição das estratégias de remediação mais eficazes.

A remediação realizada em 2006 foi implementada sem um dimensionamento completo da contaminação, o que resultou na necessidade de instalar 23 piezômetros adicionais, evidenciando o subdimensionamento do sistema de remediação. Um dos principais problemas dessa abordagem foi a escolha da técnica utilizada. Embora a oxidação química seja amplamente reconhecida como uma alternativa viável para a remediação de DNAPL, a opção pelo reagente de Fenton revelou-se inadequada para as condições do local. De acordo com a USEPA (2006), a eficácia desse reagente está diretamente condicionada a um pH ácido, idealmente entre 3,0 e 4,0. Em ambientes com pH superior a 5,0, ocorre a precipitação de Fe^+ na forma de hidróxidos insolúveis, reduzindo sua interação com o peróxido de hidrogênio e, conseqüentemente, comprometendo a eficiência do processo. No presente caso, o meio apresentava um pH alcalino, em torno de 10,0, o que inviabilizou a reação de oxidação química esperada.

Além disso, a presença significativa de matéria orgânica no solo, que não foi devidamente quantificada nos estudos anteriores, afetou negativamente a eficiência do tratamento. A matéria orgânica atua como um agente competidor na reação de oxidação, consumindo radicais hidroxila e reduzindo a disponibilidade desses compostos para a degradação dos contaminantes-alvo. Esse fator retardou a velocidade da reação e comprometeu ainda mais os resultados da remediação. Dessa forma, a falta de uma caracterização geoquímica adequada antes da implementação da técnica resultou em uma intervenção ineficaz, que não atingiu os objetivos propostos e exigiu novas ações corretivas para mitigar os impactos ambientais

remanescentes. Se os testes de bancada e o ensaio piloto tivessem sido realizados, essa questão teria sido identificada desde o início, evitando custos desnecessários e resultando em uma significativa economia de recursos.

Como resultado, as metas de remediação não foram alcançadas, e o que deveria ter sido um processo de monitorização para encerramento em 2011 acabou não cumprindo as expectativas. A falha no dimensionamento adequado da contaminação, aliada à escolha inadequada da técnica de remediação e à ausência de quantificação de parâmetros fundamentais, comprometeu a eficácia do tratamento e prolongou o processo de reabilitação. Esse cenário não apenas atrasou a recuperação ambiental da área, como também aumentou os custos operacionais e a exposição contínua a riscos ambientais, dificultando o encerramento definitivo do caso, que até hoje, 2024, não está recuperado e encerrado.

A partir de 2018, as investigações no caso de estudo adotaram uma abordagem multidisciplinar, integrando metodologias científicas e jurídicas para dimensionar com precisão os riscos associados à contaminação por hidrocarbonetos alifáticos clorados. Alguns pontos-chave foram determinantes para essa caracterização aprimorada:

- as amostras de solo e água subterrânea foram recolhidas de forma sistemática e representativa, permitindo mapear a extensão da contaminação e compreender a dinâmica dos contaminantes no meio poroso;
- a utilização de técnicas avançadas para caracterização das plumas e a quantificação precisa das concentrações de contaminantes, foram essenciais para a obtenção de dados representativos;
- a aplicação de métodos geoquímicos possibilitou a investigação detalhada do comportamento e da degradação dos contaminantes, contribuindo para o entendimento dos processos de transporte e transformação em subsuperfície.
- as modelagens permitiram simular a dinâmica dos contaminantes, fornecendo uma base técnica robusta para a definição das estratégias de remediação mais eficazes;
- A inclusão de uma análise jurídica proporcionou uma visão clara sobre as obrigações de reparação e a responsabilidade civil dos envolvidos, reforçando a necessidade de políticas públicas mais rigorosas e a importância da perícia ambiental no contexto judicial.

Essa abordagem integrada não apenas corrigiu deficiências das investigações anteriores, mas também serviu de referência para a formulação de estratégias mais eficientes na gestão de sítios contaminados.

A conformidade com os requisitos legais foi uma preocupação constante da agência ambiental desde 2006, refletida nos pareceres técnicos e autos de infração emitidos ao longo dos anos. Esses documentos destacaram falhas técnicas nos estudos conduzidos, evidenciando a necessidade de complementações para garantir uma caracterização mais precisa da contaminação e a adequação das estratégias de remediação. No entanto, apesar das notificações e das diretrizes fornecidas, as deficiências persistiram, comprometendo a eficácia das ações corretivas e prolongando o não atendimento das exigências normativas.

Diante desse cenário, e com o objetivo de avaliar a atuação tanto do proprietário quanto da própria agência ambiental, o Ministério Público do Estado de São Paulo instaurou um inquérito civil para apurar as circunstâncias associadas à contaminação e às falhas na gestão ambiental do caso. Com base nas evidências obtidas, foi proposta uma ação civil pública visando a reparação dos danos ambientais, incluindo a realização de uma perícia técnica. O objetivo da perícia foi esclarecer as inconsistências nos estudos e determinar as responsabilidades de todas as partes envolvidas, assegurando a adoção de medidas corretivas eficazes e garantindo o cumprimento das obrigações legais ambientais.

Como se tornou evidente ao longo desta análise, a realização de estudos inadequados resulta na implementação de medidas corretivas ineficazes, o que, por sua vez, exige revisões constantes e a complementação das investigações e estratégias de remediação. Esse ciclo de falhas não apenas prolonga a exposição ao risco ambiental, mas também impõe um ônus financeiro significativo ao proprietário e ao poluidor, que se vê responsável por um passivo ambiental complexo e mal administrado. A ausência de uma abordagem técnica rigorosa desde o início compromete a eficiência dos esforços de mitigação, resultando em desperdício de recursos e na postergação da solução do problema.

Diante desse cenário, a reformulação dos estudos com base em metodologias mais avançadas e alinhadas às melhores práticas internacionais garantiria maior precisão na caracterização da contaminação e na definição das estratégias de remediação. A adoção de abordagens adequadas não apenas aumentaria a eficácia das ações corretivas, mas também promoveria maior segurança jurídica e ambiental para todas as partes envolvidas. Além disso, um planejamento mais criterioso contribuiria para a redução de custos e prazos, assegurando que a recuperação da área ocorresse de maneira eficiente e sustentável.

8.5 Perícia ambiental

No âmbito do processo civil, as provas desempenham um papel essencial na resolução das controvérsias, pois são os elementos que fundamentam a tomada de decisão pelos órgãos competentes. Segundo Dinamarco *et al.* (2014), as provas fornecem o suporte necessário para a cognição judicial, permitindo ao magistrado formar uma convicção embasada sobre os fatos em disputa. Essa visão é compartilhada por Saraiva (2009), que destaca que a atividade cognitiva do julgador é uma parte indispensável do exercício jurisdicional. Dessa forma, o objetivo primordial das provas é reconstruir, com o máximo de precisão possível, a realidade dos fatos apresentados, garantindo que a aplicação do direito ocorra de maneira justa e equitativa.

Marinoni (2006) reforça essa perspectiva ao afirmar que, no processo judicial, a produção de provas tem como finalidade convencer o magistrado da veracidade dos fatos alegados pelas partes. Embora a busca pela verdade absoluta seja um ideal muitas vezes inatingível, é imprescindível que o julgador alcance uma convicção sólida, fundamentada nas evidências disponíveis. Assim, a atividade probatória não se resume apenas à apresentação de elementos formais, mas à construção de uma narrativa plausível, estruturada e devidamente respaldada, que permita uma decisão justa e tecnicamente embasada.

Dessa forma, percebe-se que a produção de provas, tanto no processo civil quanto no administrativo, vai além da busca pela verdade dos fatos, desempenhando um papel chave na garantia da aplicação justa do direito e na resolução efetiva de controvérsias. Em especial, determinados instrumentos processuais ganham relevância quando estão em jogo interesses coletivos e difusos. Um dos mais expressivos é a Ação Civil Pública (ACP), que se configura como um mecanismo jurídico essencial para a proteção desses interesses, possibilitando o acesso à justiça em questões de grande impacto social e ambiental.

A Ação Civil Pública na área ambiental é frequentemente caracterizada pela necessidade de produção de prova pericial, uma vez que envolve temas técnicos complexos, como a contaminação ambiental e seus riscos para a saúde pública. O processo tem início com a apresentação da petição inicial, na qual o autor detalha o problema, fundamenta juridicamente a ação e expõe os pedidos formulados. Após a citação dos réus, inicia-se a fase de instrução, na qual as partes podem contestar a ação e requerer a produção de provas, incluindo a perícia técnica. Caso o juiz entenda ser necessária a realização da prova pericial, nomeia um perito, que assume a responsabilidade pela recolha e análise dos dados técnicos. Os resultados dessa análise são apresentados em um laudo pericial, que serve de base para a audiência de instrução e

juízo. Nessa etapa, testemunhas podem ser ouvidas, o laudo pericial debatido e as alegações finais das partes apresentadas. Com base nesses elementos, o juiz profere a sentença, podendo determinar medidas corretivas, compensações ou outras providências cabíveis. Caso alguma das partes discorde da decisão, é garantido o direito de interposição de recursos, permitindo a revisão do caso por instâncias superiores.

A prova pericial desempenhou um papel central na fundamentação técnica da ação civil pública movida pelo Ministério Público do Estado de São Paulo (MPSP). Diante das falhas constatadas na gestão da contaminação, a perícia permitiu uma avaliação objetiva das deficiências das medidas adotadas e dos impactos ambientais ainda existentes. A análise pericial confirmou que a contaminação persistia em níveis elevados, contrariando os padrões ambientais exigidos, e que as técnicas de remediação empregadas não foram eficazes na redução dos riscos para a saúde humana e ao ambiente. Além disso, a investigação reforçou a necessidade de um novo plano de intervenção, embasado em metodologias mais avançadas e alinhadas às melhores práticas internacionais.

Com base nas conclusões da perícia, o MPSP reforçou sua argumentação jurídica, demonstrando que as ações remediativas falharam em atender aos requisitos da Lei 13.577/2009 (São Paulo, 2009) e demais normas ambientais aplicáveis. A prova técnica sustentou a necessidade de medidas corretivas mais rigorosas, garantindo que a responsabilidade pela remediação fosse devidamente atribuída aos responsáveis legais. Dessa forma, o laudo pericial tornou-se uma peça-chave no processo, não apenas comprovando o descumprimento das obrigações ambientais, mas também orientando a definição de um plano de ação mais eficiente e adequado à realidade local.

A constatação de que as ações de remediação implementadas entre 2003 e 2016 foram insuficientes e ineficazes reforça a necessidade de uma abordagem mais rigorosa e baseada em dados técnicos sólidos para a recuperação ambiental do sítio contaminado. O histórico de autos de infração e os pareceres técnicos da agência ambiental demonstram que, ao longo dos anos, as medidas adotadas não foram suficientes para conter ou reduzir significativamente a contaminação a níveis aceitáveis. A ausência de uma caracterização detalhada da área e a aplicação de metodologias inadequadas comprometeram a eficácia das intervenções, resultando na perpetuação dos riscos ambientais e à saúde humana.

Além disso, a estimativa de valoração do dano ambiental, no montante de € 9.100.000,00, evidencia a gravidade do passivo ambiental e os elevados custos associados à sua remediação. Esse valor reforça a importância da gestão eficiente e proativa dos sítios contaminados,

priorizando investigações robustas e estratégicas de remediação que sejam tecnicamente adequadas e economicamente viáveis. A incerteza sobre a possibilidade de recuperação integral da qualidade das águas subterrâneas e do solo ressalta a complexidade do caso e a necessidade de maior rigor na condução de futuros projetos de remediação, garantindo que as melhores práticas sejam aplicadas para evitar novos atrasos e desperdícios de recursos.

A conclusão de que as ações implementadas não são capazes de promover a reparação integral do dano ambiental, apenas eliminar o risco para a saúde humana, evidencia uma lacuna significativa na abordagem adotada. A reparação ambiental não deveria ser tratada apenas como uma exigência regulatória, mas sim como um compromisso ético e sustentável com as gerações futuras. A insistência em limitar a remediação à eliminação de riscos imediatos, sem considerar a restauração plena do meio ambiente, pode comprometer a integridade dos ecossistemas e perpetuar passivos ambientais que poderiam ser mitigados com abordagens mais abrangentes.

A divergência entre a visão do Ministério Público de São Paulo (MPSP) e a interpretação da legislação vigente reflete um desafio persistente na governança ambiental do Brasil. Enquanto o MPSP defende a reparação integral do dano, garantindo que o meio ambiente seja restaurado ao seu estado original na medida do possível, a legislação do Estado de São Paulo estabelece um limite na remediação, priorizando a eliminação de riscos para a saúde humana. Essas considerações conduzem à seguinte reflexão: ao adotar uma abordagem que favorece a mitigação dos riscos ao invés da reparação integral do dano, não estaríamos ignorando os princípios basilares do Direito Ambiental? O verdadeiro equilíbrio entre desenvolvimento e sustentabilidade exige que as decisões de hoje considerem os impactos a longo prazo, assegurando que as futuras gerações não herdem um passivo ambiental decorrente de escolhas simplificadas e financeiramente motivadas.

Essa abordagem de remediação baseada no risco (*risk-based remediation*), embora amplamente adotada, levanta questões fundamentais sobre equidade e justiça ambiental. Ao priorizar a mitigação dos riscos para a saúde humana, sem garantir a restauração integral dos recursos naturais, estaríamos correndo o risco de institucionalizar uma lógica de compensação financeira em detrimento da reparação ambiental efetiva? Essa prática, embora possa ser considerada viável sob a ótica econômica e regulatória, não poderia também perpetuar desigualdades socioambientais e desconsiderar o direito das futuras gerações ao acesso a recursos naturais em sua plenitude?

A compensação monetária pela indisponibilidade de um recurso ambiental essencial, como a água subterrânea, precisa ser analisada com cautela. Embora possa representar uma forma de responsabilização, ela não resolve a perda irreversível desse bem natural. Além disso, é necessário garantir que os valores compensatórios reflitam não apenas o tempo de indisponibilidade do recurso, mas também os impactos ambientais e sociais de longo prazo. A reparação ambiental não deve ser reduzida a um cálculo econômico, mas sim orientada por princípios que garantam a sustentabilidade e a justiça intergeracional, assegurando que as decisões tomadas hoje não comprometam as necessidades das gerações futuras.

A metodologia de valoração proposta por Bertolo *et al.* (2019) representa um avanço significativo na quantificação dos danos remanescentes em águas subterrâneas, permitindo estimar de forma objetiva e científica o valor da compensação financeira ao término da remediação baseada no risco. Esse cálculo considera variáveis como a extensão da contaminação remanescente, o tempo de indisponibilidade do recurso e os impactos socioeconômicos associados, assegurando que a compensação seja proporcional à contaminação que permanece no aquífero.

No caso de estudo, usando essa metodologia o perito chegou a € 510.000,00 de compensação financeira. Esse pagamento desse valor não elimina a obrigação dos responsáveis em continuar com as etapas da gestão do sítio contaminado, mas representa um instrumento complementar para mitigar os prejuízos causados à sociedade enquanto a contaminação persiste. Além disso, a destinação desses recursos ao Fundo Estadual para Prevenção e Remediação de Áreas Contaminadas (FEPRAC) reforça a importância de políticas públicas robustas, garantindo que os valores arrecadados sejam reinvestidos em ações ambientais estratégicas, beneficiando diretamente a coletividade e promovendo justiça ambiental.

Em maio de 2024, foi proferida a sentença, trazendo considerações importantes para o desfecho do caso. Destaca-se o seguinte trecho, que sintetiza a fundamentação do juízo:

“Em que pese a complexidade do tema, é certo que a área invocada está desde 1996 sob análise da agência ambiental e se encontra, mesmo depois de mais de vinte anos, sem o estudo de investigação detalhada e o plano de intervenção - facto este confessado pelo órgão. E é mais do que sabido que, em matéria de direito ambiental, a urgência é essencial e quanto mais se demora, a probabilidade de reversibilidade diminui, razão pela qual o pedido do Ministério Público procede em parte. Diante do exposto, JULGO PROCEDENTE EM PARTE os pedidos formulados, extinguindo o processo com resolução do mérito, e condenando os corréus, solidariamente, nas obrigações: (i) de fazer consistente na apresentação do plano de

Investigação Detalhada finalizado, no prazo de 180 dias; (ii) de fazer consistente na apresentação do plano de Intervenção finalizado visando como meta à eliminação dos contaminantes detetados da área (subsolo e águas subterrâneas), sem limitação de distância ou profundidade, também em 120 dias, após o término do prazo do item (i); (iii) de fazer consistente em executar o plano de intervenção depois de aprovado pela agência ambiental.”

O embargo de declaração apresentado pelos arguidos em maio de 2024 reflete a divergência persistente sobre os limites da reparação ambiental. Enquanto os responsáveis pela contaminação sustentam que a remediação deve se limitar à eliminação do risco para a saúde humana, o Ministério Público do Estado de São Paulo (MPSP) defende a necessidade de reparação integral, garantindo que os danos ambientais sejam completamente revertidos, sempre que tecnicamente viável.

O embargo de declaração é um recurso jurídico previsto na legislação processual brasileira, destinado a esclarecer, corrigir ou completar uma decisão judicial que apresente obscuridade, contradição ou omissão. Trata-se de um instrumento processual que tem como objetivo modificar o conteúdo da decisão original. Nesse caso, o juiz que proferiu a decisão embargada é o responsável por decidir sobre o embargo de declaração, podendo, se for o caso, corrigir os pontos indicados sem alterar o mérito da decisão proferida.

A agência ambiental, também arguida na ação, requer sua exclusão das condenações relacionadas às obrigações de fazer, alegando que sua atuação esteve limitada ao papel de fiscalização. Em resposta, o MPSP contestou o embargo, afirmando que os argumentos apresentados não se enquadram na finalidade legal dos embargos de declaração, pois não demonstram omissão, contradição ou obscuridade na sentença. O Ministério Público reforçou ainda que a gestão de sítios contaminados conduzido pela Cetesb apresenta falhas técnicas e medidas insuficientes, o que compromete a efetividade da recuperação ambiental e reforça a necessidade de uma decisão judicial que imponha obrigações concretas e eficazes para a mitigação dos danos ambientais.

A decisão proferida pelo Tribunal de Justiça do Estado de São Paulo (TJSP) em julho de 2024 representa um avanço significativo na resolução do caso, ao reconhecer a responsabilidade solidária dos arguidos na gestão e remediação do sítio contaminado. O julgamento, com resolução de mérito, confirma a necessidade de reparação dos danos ambientais, destacando que as medidas adotadas até então foram insuficientes para garantir a recuperação do local.

Na sentença, o TJSP determinou que a agência ambiental fiscalize rigorosamente o cumprimento das obrigações impostas às partes envolvidas, garantindo a execução adequada das ações corretivas. Esse ponto reforça a importância de uma fiscalização rigorosa, evitando que novas falhas na gestão da contaminação resultem em impactos ambientais prolongados. Além disso, o reconhecimento da possibilidade de compensação ambiental, caso os riscos remanescentes não sejam mitigados integralmente, reforça a aplicação do princípio do poluidor-pagador, assegurando que os danos ao meio ambiente e à saúde pública sejam devidamente sanados.

A apelação interposta pelas arguidas contra a sentença do Tribunal de Justiça do Estado de São Paulo (TJSP) adiciona uma nova camada de incerteza ao desfecho do caso, estendendo a discussão sobre a responsabilidade na remediação ambiental. Agora sob análise da Câmara Reservada ao Meio Ambiente, composta por três desembargadores, a decisão desse órgão poderá influenciar não apenas as partes envolvidas, mas também a abordagem regulatória e jurídica aplicada em casos similares no Brasil.

A relevância desse caso ultrapassa os limites do litígio específico, pois evidencia a necessidade de metodologias robustas e embasadas na ciência para a gestão de sítios contaminados. A fiscalização eficiente das ações corretivas e a compensação justa pelos danos ambientais são pilares essenciais para assegurar um equilíbrio entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental. Nesse contexto, a atuação do Ministério Público e do Poder Judiciário é fundamental, garantindo que as decisões sejam tecnicamente embasadas, socialmente justas e alinhadas às melhores práticas internacionais, promovendo uma gestão ambiental eficaz e sustentável.

O caso de estudo em questão buscou estimular uma reflexão aprofundada sobre a necessidade de adotar metodologias específicas e bem fundamentadas na gestão de sítios contaminados, evitando ações mal estruturadas que possam comprometer a eficácia das medidas adotadas. Essa abordagem destaca a importância de critérios técnicos e científicos para a avaliação e compensação de danos ambientais, assegurando que decisões sejam tomadas com base em dados concretos e alinhadas às melhores práticas. Nesse contexto, a atuação do Ministério Público e do Judiciário se torna indispensável, pois esses órgãos têm a responsabilidade de garantir o cumprimento das leis ambientais e a proteção dos interesses coletivos, promovendo justiça ambiental e social.

A cooperação entre o Ministério Público, o Judiciário e as agências ambientais é essencial para fortalecer a aplicação das leis ambientais e garantir que poluidores e proprietários sejam

devidamente responsabilizados pelos danos causados. Essa articulação cria precedentes jurídicos relevantes, incentivando a adoção de práticas mais sustentáveis e promovendo uma cultura de prevenção e gestão ambiental responsável.

Além de assegurar a remediação e compensação adequadas, essa atuação conjunta contribui para a construção de uma sociedade comprometida com a conservação ambiental e o bem-estar das futuras gerações. Ao integrar fiscalização, regulação e responsabilização, esses órgãos não apenas garantem a proteção dos recursos naturais, mas também reforçam o compromisso coletivo com a sustentabilidade e a equidade na gestão ambiental.

8.6 Quebra de paradigma: ressignificar as abordagens tradicionais

Embora o caso tenha ocorrido no Brasil, ele oferece uma base de comparação valiosa com a realidade portuguesa, especialmente porque o desenvolvimento industrial em Portugal é historicamente mais antigo, o que resulta em uma maior incidência de passivos ambientais acumulados. A experiência brasileira neste caso específico ressalta a importância de uma abordagem sistemática e técnica na investigação e remediação de sítios contaminados, algo igualmente fundamental para Portugal, onde os desafios ambientais relacionados à contaminação de solos e águas subterrâneas são igualmente significativos. O estudo destaca como a adoção de critérios científicos, alinhados a uma metodologia rigorosa, pode ser decisiva para enfrentar com situações complexas e sensíveis, evitando soluções mal estruturadas que comprometem a eficácia das intervenções.

Além disso, o caso ilustra a aplicação prática de metodologias robustas para quantificar danos ambientais e orientar a remediação, com ênfase na avaliação de impactos remanescentes em águas subterrâneas. Este aspecto é particularmente inovador, especialmente no contexto português, onde a valoração de danos ambientais em recursos hídricos subterrâneos ainda é um tema emergente. O estudo também evidencia a relevância de técnicas avançadas e a integração de ferramentas científicas para o cálculo de compensações financeiras, um modelo que poderia ser explorado e adaptado para o fortalecimento da gestão ambiental em Portugal. Assim, o caso se apresenta não apenas como um exemplo prático, mas como uma oportunidade de aprendizado e inspiração para aprimorar as estratégias de proteção ambiental em diferentes contextos geográficos e institucionais.

Essa comparação entre os modelos de governança ambiental do Brasil e de Portugal evidencia pontos fortes e desafios em cada sistema, bem como oportunidades para o aprimoramento das políticas de gestão de sítios contaminados. O envolvimento ativo do Ministério Público no Brasil fortalece a fiscalização, a exigência do cumprimento da legislação ambiental e a busca por compensações justas, garantindo que as ações de remediação sejam conduzidas de forma técnica e transparente. A possibilidade de ajuizar ações civis públicas e solicitar perícias ambientais confere ao Ministério Público um papel central na defesa dos interesses difusos, assegurando que poluidores e proprietários sejam responsabilizados de maneira adequada.

Por outro lado, em Portugal, a governança ambiental é conduzida principalmente por órgãos reguladores, como a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), que desempenha funções de monitorização e prevenção da contaminação ambiental. No entanto, a pouca atuação do Ministério Público português nessa temática, dificulta a imposição de medidas corretivas em situações complexas, especialmente quando há litígios envolvendo grandes sítios contaminados ou passivos ambientais históricos. Esse cenário reforça a necessidade de maior integração entre as autoridades ambientais e o sistema judicial, permitindo que ações de remediação e compensação sejam conduzidas de forma mais eficaz, equilibrada e alinhada aos princípios de sustentabilidade e justiça ambiental.

O caso de estudo apresentado demonstra, de forma prática, a relevância da aplicação de metodologias técnicas e científicas rigorosas na gestão de sítios contaminados, validando a abordagem defendida nesta tese. Ele evidencia que a adoção de critérios estruturados permite que as intervenções sejam mais eficazes, otimizando recursos e garantindo melhores resultados na reabilitação ambiental. Além disso, destaca a importância de uma governança robusta e de um sistema judiciário atuante, capaz de assegurar a aplicação da legislação ambiental e a responsabilização adequada dos agentes envolvidos, promovendo justiça ambiental e proteção ao meio ambiente.

Embora o caso tenha ocorrido no Brasil, os desafios e as soluções encontradas são relevantes em um contexto global, especialmente para Portugal. A experiência apresentada oferece *insights* valiosos para aprimorar a gestão de passivos ambientais em regiões onde a governança e a legislação ainda enfrentam desafios na implementação efetiva. Dessa forma, o estudo reforça a necessidade de uma abordagem integrada entre ciência, política e direito, demonstrando que a proteção ambiental e a sustentabilidade dependem de políticas públicas bem estruturadas, de fiscalização eficaz e do compromisso contínuo das instituições na defesa dos recursos naturais e da saúde coletiva.

Com o encerramento deste capítulo, consolida-se a materialidade da tese, evidenciando, de forma clara e fundamentada, a relação direta entre teoria e prática na gestão de sítios contaminados e na reparação ambiental. A análise do caso de estudo, aliada à aplicação da metodologia proposta, reforça a importância de abordagens técnicas estruturadas, baseadas em dados representativos, e da atuação indispensável de instituições como o Ministério Público e o Judiciário. Esse capítulo não apenas valida os fundamentos teóricos apresentados ao longo da tese, mas também demonstra sua aplicabilidade prática, contribuindo para o desenvolvimento de modelos de governança ambiental mais eficazes e sustentáveis.

Dessa forma, encerra-se a tese com a convicção de que as propostas apresentadas têm potencial para impulsionar avanços tanto no meio acadêmico quanto na gestão ambiental de problemas complexos. A experiência analisada reafirma que a integração entre ciência, governança e justiça é imperativo para enfrentar desafios ambientais contemporâneos, e que soluções eficazes dependem de um compromisso contínuo com metodologias rigorosas, fiscalização eficiente e responsabilidade compartilhada.

DISCUSSÃO

Este capítulo tem como objetivo avaliar criticamente os principais resultados obtidos ao longo da pesquisa, considerando tanto sua relevância científica quanto sua aplicabilidade prática. A análise examina a adequação das técnicas empregadas na investigação e remediação do caso de estudo apresentado, destacando os aspectos que contribuíram para o avanço do conhecimento, bem como as limitações identificadas. Além disso, buscou-se fornecer uma visão integrada sobre o impacto das decisões tomadas, abrangendo suas implicações para a gestão ambiental e para a formulação de políticas públicas. Por fim, este capítulo discute os desafios enfrentados ao longo do processo e apresenta sugestões para melhorias futuras, contribuindo para o aprimoramento das práticas de gestão de sítios contaminados em Portugal.

A pesquisa ressaltou a importância do cumprimento integral de todas as etapas de investigação em um sítio contaminado, garantindo uma caracterização e quantificação precisas do dano ambiental. Como restou demonstrado, a omissão de qualquer uma dessas etapas compromete a validade das conclusões, impossibilitando a comprovação efetiva da mitigação do risco e a adequada responsabilização civil, administrativa e criminal por danos ambientais. Nesse sentido, o estudo reforça a necessidade de uma abordagem sistemática e rigorosa, fundamental para embasar decisões técnicas e jurídicas e assegurar a justiça ambiental de maneira eficiente e confiável.

Buscou-se, ainda, evidenciar a relevância da atividade pericial no esclarecimento de controvérsias ambientais, com três principais finalidades: (i) produzir conhecimento técnico-jurídico sistematizado sobre a caracterização e o dimensionamento de danos ambientais, especialmente relacionados à contaminação do solo e da água subterrânea; (ii) estabelecer procedimentos metodológicos faseados para a investigação científica, visando à elaboração de laudos periciais ambientais detalhados e adequados a casos de contaminação; e (iii) descrever e conceituar a importância das perícias ambientais como instrumento probatório em disputas processuais.

Para responder à questão central que norteou esta pesquisa, realizou-se uma ampla revisão de referências internacionais, cujo conhecimento está consolidado há pelo menos três

décadas. A análise dessas fontes revelou a urgência da implementação de medidas mais efetivas que responsabilizem o poluidor pela caracterização detalhada e pela reparação dos danos ambientais decorrentes de suas atividades, assegurando a identificação completa dos riscos e sua pronta mitigação.

Inicialmente, procurou-se, apresentar conceitos e reflexões sobre a relevância da perícia ambiental como elemento essencial de prova em disputas processuais. Destacou-se, ainda, a mais valia que o tribunal pode obter ao dispor de estudos embasados em metodologias robustas e bem fundamentadas. Essas análises fornecem uma base sólida para a tomada de decisões judiciais, garantindo que o juízo de valor seja sustentado por dados técnico-científicos representativos da realidade, em vez de informações mal estruturadas ou meras suposições.

Para atender ao segundo objetivo desta pesquisa, evidenciou-se o valor agregado da produção sistemática de conhecimento técnico-jurídico voltado para a caracterização e o dimensionamento de danos ambientais. Ressaltou-se, ainda, a importância da formulação de um modelo conceptual que, além de ser robusto e tecnicamente defensável, seja acessível e compreensível por não especialistas, especialmente aqueles vinculados ao Poder Judiciário.

Para atender ao terceiro objetivo desta pesquisa, foi realizada uma análise abrangente da metodologia internacional aplicada na caracterização e no dimensionamento da contaminação de solo e águas subterrâneas, com ênfase na identificação de riscos para a saúde humana. A tese foca, em especial, os hidrocarbonetos alifáticos clorados, substâncias amplamente utilizadas em atividades industriais e reconhecidas como fonte significativa de contaminação ambiental. Entre esses compostos, destacam-se o tetracloroetano (PCE) e o tricloroetano (TCE), conhecidos por sua alta toxicidade, persistência no ambiente e baixa solubilidade em água. Essas características dificultam sua degradação natural e favorecem sua migração no solo e em aquíferos, ampliando os desafios associados à sua remediação.

A tese analisa detalhadamente o comportamento dos hidrocarbonetos alifáticos clorados no ambiente, destacando a dinâmica desses contaminantes no solo e a formação de plumas de contaminação, que podem se espalhar por extensas áreas ao longo do tempo. A mobilidade desses compostos, aliada à sua persistência, intensifica os desafios associados à contenção e remediação.

A pesquisa também enfatiza os principais caminhos de exposição humana, incluindo a ingestão de água contaminada, a inalação de vapores tóxicos provenientes do solo e o contato

direto com sítios contaminados. Esses riscos são particularmente preocupantes em regiões densamente povoadas ou próximas a indústrias que utilizam essas substâncias, onde a contaminação pode representar uma ameaça direta à saúde pública. A situação torna-se ainda mais crítica quando as plumas atingem fontes de água potável, expondo populações inteiras a compostos altamente tóxicos.

Com os objetivos da pesquisa alcançados, foi apresentado um caso de estudo que evidenciou a convergência entre a teoria desenvolvida e sua aplicação prática. Essa integração é fundamental para demonstrar que os conceitos e metodologias propostos não são apenas teóricos, e sim aplicáveis e eficazes em contextos reais. O caso de estudo reforça a validade da abordagem adotada, evidenciando sua adaptabilidade e potencial de uso em diferentes situações, garantindo resultados consistentes e relevantes tanto no campo técnico quanto no jurídico.

Os estudos ambientais realizados entre 1996 e 2016 desempenharam papel fundamental na investigação da área do caso em estudo, buscando identificar a extensão da contaminação, bem como os impactos ao ambiente e na saúde humana. No entanto, tornou-se evidente que muitos desses estudos apresentaram limitações significativas, decorrentes do uso de metodologias desatualizadas ou inadequadas, que não estavam em conformidade com as normas técnicas. Essas deficiências abrangem desde a aplicação de técnicas insuficientes para a investigação e falhas na recolha de amostras até imprecisões nas avaliações de risco e lacunas nos procedimentos de remediação, comprometendo a qualidade e a confiabilidade das conclusões obtidas.

Quanto ao cumprimento dos requisitos legais aplicáveis, a agência ambiental manifestou-se de forma recorrente desde 2006, por meio de pareceres técnicos e autos de infração, destacando deficiências nos estudos realizados e exigindo sua complementação. Essas manifestações reiteraram o não atendimento às disposições legais vigentes e a necessidade de adequações para assegurar que as investigações e medidas adotadas fossem eficazes e estivessem em conformidade com os padrões técnicos e normativos exigidos.

O caso de estudo evidenciou que a contaminação exige um entendimento profundo das dinâmicas dos contaminantes no solo e nas águas subterrâneas, ressaltando a importância das propriedades geoquímicas na seleção adequada das técnicas de remediação. A ausência ou insuficiência de informações geoquímicas pode levar à escolha de métodos inadequados ou menos eficazes, comprometendo a eficiência do processo de reabilitação do sítio contaminado. Essa limitação não apenas prolonga o tempo necessário para a recuperação ambiental, mas

também eleva significativamente os custos associados à remediação, tornando o processo mais oneroso e menos sustentável.

Em resumo, as descobertas do caso de estudo ressaltam a gravidade dos riscos associados à contaminação por hidrocarbonetos alifáticos clorados e a complexidade envolvida na reabilitação de áreas impactadas por esses compostos. O caso evidenciou a persistência e toxicidade desses contaminantes, bem como as dificuldades técnicas relacionadas à sua remoção e mitigação. Esses fatores reforçam a necessidade de uma gestão estratégica fundamentada em abordagens científicas robustas, permitindo a mitigação eficaz dos riscos e a reabilitação sustentável de sítios contaminados, garantindo maior proteção ao meio ambiente e à saúde pública.

A tese também enfatiza a importância de políticas públicas eficazes, voltadas tanto para a prevenção de novos casos de contaminação quanto para a agilizar a remediação em áreas já impactadas. A adoção de normas rigorosas de fiscalização, aliada à responsabilização efetiva das empresas poluidoras, é essencial para assegurar a proteção da saúde pública e a preservação ambiental a longo prazo. Além disso, a pesquisa destaca a urgência de ações preventivas, como o fortalecimento da fiscalização ambiental e a aplicação de sanções proporcionais aos responsáveis pela contaminação. A combinação de medidas preventivas e corretivas é indispensável para promover um modelo de gestão ambiental mais eficiente, equitativo e comprometido com o desenvolvimento sustentável.

A legislação portuguesa desempenha um papel central na gestão de sítios contaminados, ao estabelecer diretrizes para a prevenção, mitigação e responsabilização em casos de contaminação ambiental. A tese fundamenta-se em marcos legais como a Diretiva 2004/35/CE, que institui a responsabilidade ambiental com base no princípio do poluidor-pagador, e no Decreto-Lei n.º 147/2008, que transpõe essa diretiva para o ordenamento jurídico português. Essas normas foram fundamentais para orientar a análise da responsabilidade dos poluidores, reforçando a obrigatoriedade de reparação dos danos ambientais e dos impactos para a saúde pública.

A geoquímica aplicada desempenhou um papel central na análise crítica do caso de estudo, sendo um dos pilares fundamentais para a caracterização dos contaminantes e a definição das estratégias de remediação. Como demonstrado, a geoquímica fornece informações essenciais sobre a natureza dos contaminantes, sua dinâmica no ambiente e os processos de transporte e degradação envolvidos. No entanto, no caso de estudo, os dados geoquímicos

obtidos até 2016 revelaram-se insuficientes, comprometendo a compreensão completa da extensão da contaminação. Essa limitação dificultou a identificação de todas as fontes secundárias e a análise detalhada dos mecanismos de transporte e degradação dos contaminantes, aspectos essenciais para a seleção de estratégias de remediação eficazes.

No que se refere aos desafios técnicos relacionados ao dimensionamento e à implementação de estratégias de remediação, o caso de estudo evidenciou a influência determinante da heterogeneidade geológica e das variações em suas propriedades físico-químicas, como porosidade, permeabilidade e composição mineralógica. A insuficiência na recolha de dados foi um dos principais fatores que comprometeram a eficácia dos resultados obtidos. Além disso, a ausência de registos históricos detalhados sobre as atividades industriais realizadas na área dificultou significativamente o mapeamento preciso das fontes de contaminação, prejudicando tanto a caracterização completa do problema quanto a definição de soluções mais eficazes para a remediação.

A baixa qualidade das informações geológicas e a compreensão limitada das interações químicas dos contaminantes comprometeram significativamente a precisão dos modelos de fluxo e transporte dos contaminantes. Essa limitação dificultou a identificação exata das áreas mais afetadas, levantando à subestimação dos riscos associados à contaminação. Além disso, a escassez de dados detalhados impediu a construção de um modelo conceptual preciso do sítio contaminado, elemento essencial para a seleção adequada das técnicas de remediação. Essa lacuna de informações impactou negativamente a eficácia das estratégias de intervenção, prolongando o tempo necessário para a recuperação do ambiente e elevando os custos envolvidos no processo.

Para mitigar essas limitações, recomenda-se a adoção de um protocolo faseado para a caracterização de sítios contaminados, estruturado em etapas bem definidas de investigação e análise. Esse protocolo deve ser complementado com tecnologias avançadas e adequadas para a realização de pesquisas de campo extensivas, viabilizando a aquisição de dados mais precisos e representativos.

O estudo também evidenciou que as inovações tecnológicas desempenham um papel fundamental na melhoria dos processos de caracterização e remediação de sítios contaminados. A adoção de técnicas de investigação avançadas, como métodos aprimorados de perfuração e recolha de amostras, além de investigações de alta resolução com medição em tempo real, tem o potencial de aumentar significativamente a precisão na deteção e delimitação da contaminação. Essas tecnologias não apenas proporcionam um entendimento mais detalhado

da extensão e da dinâmica dos contaminantes, mas também a otimização do processo de reabilitação, resultando em intervenções mais eficazes e sustentáveis.

No contexto da perícia ambiental, esta pesquisa representa uma contribuição significativa, especialmente no que se refere ao entendimento dos danos ambientais e ao papel estratégico da perícia como ferramenta para a responsabilização pelos impactos causados. O estudo demonstra que a aplicação de técnicas científicas rigorosas não apenas aprimora a identificação e a documentação dos danos ambientais, mas também eleva o padrão de qualidade das provas apresentadas nos tribunais. Essa abordagem proporciona uma base sólida para decisões jurídicas fundamentadas, promovendo maior eficiência na aplicação da legislação ambiental e assegurando que os responsáveis sejam devidamente identificados e responsabilizados. Assim, a pesquisa reforça o papel transformador da ciência na resolução de controvérsias ambientais.

O estudo de caso evidencia a importância da perícia ambiental como prova técnica, ressaltando sua relevância na análise e resolução de questões ambientais complexas. Ela detalha as técnicas de investigação e caracterização da contaminação, fornecendo uma base metodológica sólida e tecnicamente embasada para a elaboração de laudos periciais. Essa abordagem não apenas aprimora a precisão e confiabilidade dos documentos técnicos, mas também fortalece o processo decisório em contextos judiciais, assegurando maior clareza e fundamentação na avaliação dos danos ambientais e na responsabilização dos envolvidos.

Sob essa perspectiva, constatou-se que a qualidade da prova pericial desempenha um papel decisivo na determinação da responsabilidade civil e criminal dos envolvidos em danos ambientais. A perícia ambiental, quando conduzida de forma rigorosa e tecnicamente embasada, viabiliza a aplicação efetiva do princípio do poluidor-pagador, assegurando não apenas a reconstituição precisa dos eventos, mas também a identificação de múltiplas fontes de contaminação, mesmo quando a contaminação ocorreu há décadas e permanece imperceptível em análises preliminares. Essa capacidade de revelar contaminações históricas reforça a importância da perícia ambiental como uma ferramenta indispensável para promover a reparação ambiental.

Um dos maiores desafios em casos de danos ambientais é estabelecer onexo causal entre as atividades poluidoras e o dano ao ambiente, especialmente quando a contaminação ocorre de forma lenta e cumulativa ao longo de muitos anos. Nesse contexto, a pesquisa demonstrou que perícia ambiental é uma ferramenta fundamental para superar essa dificuldade,

integrando dados históricos, geológicos e químicos para identificar com precisão as fontes dos contaminantes e documentar sua migração ao longo do tempo.

A dificuldade em estabelecer o nexo causal pode gerar consequências graves, como a falha na responsabilização legal dos poluidores e a transferência dos custos de remediação para a sociedade. Sem provas técnicas robustas, os tomadores de decisão enfrentam desafios para aplicar o princípio do poluidor-pagador de maneira justa e eficaz. Para mitigar esse problema, a realização de perícias ambientais bem fundamentadas surge como uma solução indispensável, fortalecendo a base probatória e promovendo maior equidade na responsabilização pelos danos ambientais.

O estudo também enfatiza o papel estratégico da perícia ambiental no aprimoramento das políticas públicas e da legislação ambiental. A pesquisa identificou lacunas na aplicação prática das leis ambientais, evidenciando como a perícia pode atuar como uma ferramenta essencial para fornecer dados técnicos que fortaleçam a fiscalização e subsidiem o desenvolvimento de normas jurídicas mais robustas. Ao apresentar provas científicas que evidenciam a extensão do dano ambiental e os riscos associados, a perícia não apenas reforça a aplicação das leis existentes, mas também contribui para a formulação de novas regulamentações e o aprimoramento dos mecanismos de controlo e fiscalização.

Esse papel torna-se especialmente relevante em casos de contaminação complexa, nos quais as leis vigentes podem ser insuficientes para abordar todas as nuances do problema ou onde a aplicação das normas apresenta lacunas significativas. Ao fornecer uma base científica sólida, a perícia pode atuar como um catalisador para avanços no arcabouço legal, garantindo maior eficiência e eficácia na proteção ambiental e na responsabilização dos agentes poluidores.

A análise indicou que, embora a legislação nacional estabeleça um arcabouço para o enfrentamento da contaminação ambiental, sua aplicação prática enfrenta desafios significativos. A complexidade e a fragmentação do ordenamento jurídico ambiental em Portugal representam obstáculos significativos, dificultando a implementação uniforme e eficaz das normas. Embora existam dispositivos legais que tratam da responsabilidade ambiental e do princípio do poluidor-pagador, sua efetivação é frequentemente comprometida pela sobreposição de competências entre diferentes entidades governamentais, cujas interpretações divergentes dificultam a aplicação coerente dessas regulamentações.

Nesse contexto, a harmonização das normas ambientais surge como uma estratégia essencial para viabilizar a criação de um marco regulatório único e integrado, capaz de abranger as múltiplas dimensões da contaminação ambiental. Um regulamento unificado poderia eliminar ambiguidades, simplificar procedimentos e garantir maior coerência na aplicação das leis. Além disso, a implementação de programas interinstitucionais constituiria uma medida fundamental para fortalecer a cooperação entre órgãos governamentais, promovendo uma aplicação mais coordenada e eficiente da legislação ambiental.

Outro desafio significativo identificado é a fiscalização insuficiente dos sítios contaminados, decorrente da escassez de recursos financeiros, tecnológicos e humanos nas autoridades reguladoras. Frequentemente, os órgãos responsáveis não dispõem de capacidade técnica e infraestrutura adequada para conduzir uma monitorização contínua e eficaz dos sítios contaminados. Essa limitação resulta em atrasos na identificação dos problemas e na implementação de medidas corretivas, permitindo que a contaminação persista por longos períodos sem ser detetada ou mitigada.

A ausência de fiscalização eficaz não apenas compromete a proteção ambiental, mas também dificulta a responsabilização imediata dos poluidores, permitindo que os danos ambientais se agravem significativamente antes da aplicação de medidas legais. Essa situação evidencia a necessidade urgente de fortalecer as agências reguladoras, por meio da alocação de recursos adequados e a incorporação de tecnologias avançadas para a monitorização ambiental. Uma fiscalização mais robusta é essencial para garantir a detecção precoce dos danos e a responsabilização tempestiva dos poluidores, promovendo maior proteção ao meio ambiente e para a saúde pública.

Para enfrentar esse desafio, as políticas públicas podem ser aprimoradas por meio da criação de incentivos financeiros que estimulem a adoção de tecnologias de remediação mais eficazes e sustentáveis. Paralelamente, é fundamental ampliar os recursos destinados às agências de fiscalização ambiental, assegurando não apenas infraestrutura adequada, mas também investimentos em capacitação técnica dos agentes responsáveis. Essas medidas fortaleceriam a capacidade de monitorização e resposta às contaminações, tornando o processo mais ágil e eficaz.

Além disso, a cooperação internacional representa uma oportunidade valiosa, permitindo que Portugal ascenda fundos europeus para reforçar sua capacidade técnica e operacional no combate à contaminação ambiental. Por fim, a adoção de marcos legais mais rigorosos,

alinhados às diretrizes da União Europeia, configura-se como uma estratégia eficaz para aprimorar a gestão ambiental. Esses marcos não apenas reduzem a ocorrência de novas contaminações, mas também asseguram que os poluidores sejam responsabilizados de maneira eficiente e proporcional, promovendo maior proteção ao meio ambiente e para a saúde pública.

As limitações identificadas na pesquisa e os desafios legais expostos evidenciam a necessidade urgente de aprimorar os métodos de investigação e fortalecer a aplicação da legislação ambiental. Superar a escassez de dados, os obstáculos técnicos e as dificuldades jurídicas requerem uma abordagem integrada que combine avanços científicos, harmonização regulatória e um reforço efetivo na fiscalização. Essa integração deve priorizar a implementação de tecnologias modernas, a capacitação técnica dos agentes envolvidos e a simplificação do arcabouço normativo, promovendo maior eficiência no enfrentamento das contaminações.

De modo geral, os métodos científicos e jurídicos aplicados mostraram-se adequados para compreender a extensão da contaminação. No entanto, a complexidade do ambiente geológico, caracterizado por heterogeneidade em suas propriedades físicas e químicas, aliada à ausência de registos históricos detalhados sobre a origem da contaminação, dificultou a obtenção de resultados precisos. Essas limitações contribuíram para a persistência de incertezas, especialmente na estimativa da disseminação e no comportamento das plumas de contaminação, tornando desafiador prever com exatidão os impactos futuros e as áreas afetadas.

Nesse sentido, o caso de estudo evidencia a importância de modelos conceituais robustos para a compreensão do comportamento dos contaminantes em ambientes complexos. Esses modelos são essenciais para prever a migração das plumas de contaminação, identificar áreas críticas que demandam intervenção prioritária e orientar a tomada de decisões. Ao integrar dados químicos, históricos e geológicos, a pesquisa estabelece um modelo de referência que pode ser adaptado e aplicado a outros sítios contaminados em diferentes contextos ao redor do mundo. Essa abordagem contribui significativamente para a definição de estratégias de remediação mais eficazes, promovendo soluções baseadas em ciência e ajustadas às especificidades de cada cenário.

As constatações desta pesquisa representam uma contribuição significativa para a gestão de sítios contaminados, especialmente no tratamento de contaminantes complexos, como os hidrocarbonetos alifáticos clorados. A análise detalhada dos processos de contaminação, aliada ao estudo da dinâmica desses compostos no solo e nas águas subterrâneas, fornece informações valiosas que podem ser diretamente aplicadas na prática da remediação ambiental. Essas contribuições são particularmente relevantes para Portugal, onde a gestão de sítios

contaminados ainda enfrenta desafios significativos, ressaltando a necessidade de adotar abordagens científicas robustas e metodologias eficazes para enfrentar questões ambientais complexas.

Outro aspeto que merece destaque é a proposta de criação de um fundo público específico para a remediação de sítios contaminados, financiado por impostos incidentes sobre atividades potencialmente poluidoras. Esse fundo poderia atuar como uma garantia para viabilizar a restauração ambiental de sítios contaminados, especialmente em situações em que os poluidores não possam ser identificados, localizados ou responsabilizados diretamente.

As sugestões de melhorias apresentadas têm como objetivo enfrentar os desafios identificados e promover uma gestão de sítios contaminados mais eficiente, transparente e proativa em Portugal. A implementação dessas medidas visa assegurar uma proteção mais robusta ao meio ambiente e à saúde pública, além de fortalecer a governança ambiental e alinhar o país às melhores práticas internacionais de sustentabilidade e responsabilidade ambiental.

CONCLUSÃO

A partir da questão norteadora desta tese, foi seguido um caminho estruturado que abrange desde a contextualização jurídica da temática até os aspectos conceituais e técnicos gestão da contaminação. Esse percurso culminou na análise do estado da arte da perícia ambiental aplicada à quantificação de danos decorrentes da contaminação do solo e da água subterrânea, evidenciando a importância de abordagens científicas rigorosas para garantir a precisão das investigações e fundamentar decisões jurídicas e administrativas.

A tese está alinhada com a literatura científica global, que reconhece a complexidade inerente à caracterização do meio subterrâneo devido às suas múltiplas variáveis hidrogeológicas e geoquímicas. No entanto, também demonstra que, apesar dos desafios, é possível atingir o objetivo central da investigação ambiental: mitigar os riscos para a saúde humana das gerações atuais e implementar estratégias que assegurem a preservação do planeta para as gerações futuras. A integração de metodologias avançadas, aliada à governança ambiental eficaz e ao fortalecimento das políticas públicas, é essencial para transformar o conhecimento técnico em ações concretas que promovam a sustentabilidade e a justiça ambiental.

As diretrizes para a investigação de sítios contaminados evoluíram significativamente nas últimas décadas, refletindo a necessidade de abordagens mais abrangentes, estruturadas e tecnicamente robustas. A investigação moderna não se limita mais a análises pontuais, mas busca uma compreensão detalhada e integrada da contaminação, considerando não apenas a presença de contaminantes, mas também sua dinâmica no meio subterrâneo e os fatores que influenciam sua mobilidade e persistência.

Essa abordagem estruturada envolve múltiplas etapas, desde a investigação preliminar, que levanta informações históricas e identifica áreas de interesse, até a investigação exploratória e detalhada, que quantifica a extensão da contaminação e sua distribuição nas diferentes fases (dissolvida, adsorvida, residual e vapor). O objetivo principal é compreender a interação complexa entre os contaminantes e o meio, levando em conta a heterogeneidade geológica e os processos geoquímicos envolvidos. Com esse conhecimento aprofundado, torna-se possível selecionar e implementar medidas de reabilitação mais eficazes e sustentáveis, garantindo não

apenas a remediação do sítio, mas também a mitigação de riscos para a saúde humana e a proteção dos recursos naturais a longo prazo.

A abordagem contemporânea para a investigação de sítios contaminados adota um processo estruturado e dinâmico, fundamentado na integração de múltiplas fases que permitem aprimorar continuamente a compreensão do problema à medida que novos dados são obtidos. Esse método progressivo melhora a precisão da caracterização e orienta a tomada de decisões com base em evidências técnicas robustas.

A primeira etapa envolve uma avaliação preliminar, cujo objetivo é identificar fontes potenciais de contaminação por meio de levantamento histórico, inspeção do local e identificação de possíveis vias de migração dos contaminantes. Com essas informações, elabora-se um modelo conceptual inicial, que busca prever a dinâmica dos contaminantes no solo e nas águas subterrâneas. A partir desse modelo, realizam-se investigações exploratórias e detalhadas, utilizando tecnologias de alta resolução e técnicas avançadas de amostragem para mapear com maior precisão a distribuição da contaminação, incluindo suas fases dissolvida, vapor, adsorvida e residual.

Com os dados obtidos, realiza-se a avaliação de risco, que determina os impactes potenciais para a saúde humana e ao meio ambiente e auxiliando na definição da necessidade e urgência de remediação. Por fim, implementam-se as técnicas de remediação, selecionadas com base na caracterização detalhada do sítio e ajustadas ao longo do processo conforme a evolução dos resultados da reabilitação.

Nesse contexto, é essencial promover uma mudança de paradigma na abordagem das investigações ambientais e na gestão de sítios contaminados em Portugal, adotando práticas mais avançadas e integradas. A implementação de estratégias mais eficazes requer a consideração de quatro pontos fundamentais, que possibilitarão maior precisão na caracterização da contaminação e na definição de medidas corretivas.

O primeiro aspeto indispensável é a definição clara e objetiva dos objetivos da investigação, garantindo que cada fase do estudo seja estrategicamente planeada para responder às questões-chave sobre a extensão e os impactes da contaminação. Em seguida, é fundamental aprimorar a utilização de modelos conceptuais, tornando-os ferramentas ativas no planeamento da investigação e na tomada de decisão. Esses modelos devem ser constantemente

refinados à medida que novos dados são obtidos, permitindo uma interpretação mais dinâmica e realista da dispersão dos contaminantes no ambiente.

Outro ponto essencial é a aquisição de dados em alta resolução, utilizando tecnologias modernas que possibilitem um mapeamento detalhado da distribuição dos contaminantes, reduzindo lacunas e incertezas na caracterização. Por fim, torna-se indispensável a aplicação de técnicas apropriadas para avaliar a incerteza dos dados, garantindo que as informações obtidas sejam analisadas de forma crítica e que a tomada de decisão se baseie em um nível adequado de confiabilidade.

Essas mudanças estruturais na abordagem da investigação e gestão de sítios contaminados podem elevar significativamente a qualidade das avaliações ambientais, garantindo maior eficácia na mitigação dos riscos e na recuperação ambiental sustentável.

Todas essas considerações convergem para um conceito central: a necessidade de compreender e gerenciar as incertezas na investigação e gestão de sítios contaminados. A incerteza é uma característica inerente aos estudos ambientais, resultante da complexidade dos processos físicos, químicos e biológicos que governam a dinâmica dos contaminantes. Compreendê-la exige a identificação de lacunas de conhecimento e fatores imprevisíveis que podem afetar a precisão das avaliações e a eficácia das medidas de remediação.

Um dos principais desafios está no comportamento dos contaminantes, que pode variar significativamente conforme as condições geológicas e a química local. A interação dos contaminantes com diferentes tipos de solo e aquíferos influencia sua mobilidade, persistência e degradação, tornando sua previsão um processo complexo. Além disso, a caracterização do solo enfrenta incertezas devido à heterogeneidade dos estratos, que dificulta a determinação exata das rotas de migração e do impacto ambiental a longo prazo. Outro fator crítico são as variações temporais, como mudanças sazonais no nível da água subterrânea, que podem alterar o transporte dos contaminantes ao longo do ano.

Gerenciar essas incertezas requer abordagens mais sofisticadas, incluindo a integração de modelos conceituais dinâmicos, o uso de tecnologias de alta resolução e a aplicação de técnicas estatísticas e geoestatísticas para quantificar e minimizar incertezas nos dados. Somente com uma compreensão detalhada desses aspectos será possível desenvolver estratégias eficazes para mitigar riscos, otimizar a remediação e garantir uma gestão ambiental mais precisa e sustentável.

Esses fatores tornam desafiador obter uma visão completa e precisa do cenário de contaminação, pois a variabilidade geológica, hidrogeológica e geoquímica pode influenciar significativamente o comportamento dos contaminantes ao longo do tempo. Dessa forma, os modelos conceituais devem ser continuamente ajustados e refinados, incorporando novas informações à medida que mais dados são obtidos durante a investigação e monitorização. Esse processo iterativo é essencial para reduzir incertezas e melhorar a tomada de decisão, permitindo que as estratégias de remediação sejam adaptadas de forma mais eficiente às condições reais de cada sítio contaminado.

Nesse sentido, o sucesso de qualquer processo de remediação depende diretamente da capacidade de lidar com as incertezas de forma proativa e estratégica. A minimização de riscos e o aumento da precisão das intervenções requerem o uso de tecnologias avançadas de caracterização, metodologias de análise integradas e uma abordagem flexível, na qual ajustes contínuos sejam realizados com base em dados atualizados. Somente assim é possível garantir que as soluções de remediação sejam eficientes, sustentáveis e adequadas às particularidades do ambiente impactado, assegurando uma gestão ambiental mais eficaz e responsável.

Os fundamentos teóricos apresentados evidenciam que a prática atual na gestão de sítios contaminados em Portugal não tem cumprido em sua totalidade o objetivo principal: proteger os recetores potenciais, sejam eles humanos, ecológicos ou ambientais. As falhas identificadas decorrem, em grande parte, da metodologia adotada, que ainda apresenta limitações para lidar com a complexidade e a extensão dos problemas ambientais associados à contaminação. A ausência de abordagens mais rigorosas e integradas na investigação e remediação compromete a eficácia das medidas implementadas, resultando em lacunas significativas na identificação dos riscos reais e na mitigação dos impactos.

Dentre os principais desafios, destacam-se a insuficiência de dados de alta resolução, a subestimação da fase adsorvida e residual dos contaminantes, a avaliação imprecisa do risco para a saúde humana e a falta de integração entre os modelos conceituais e a tomada de decisão. Sem um diagnóstico mais preciso e completo, as estratégias de remediação adotadas tendem a ser ineficazes ou a exigir mais tempo e recursos do que o necessário. Dessa forma, torna-se fundamental revisar as práticas atuais, adotando técnicas avançadas de caracterização, metodologias mais robustas e um planeamento mais estratégico e dinâmico.

Outra limitação identificada é a fragmentação institucional, da insuficiência na recolha de dados e a priorização de soluções de curto prazo, fatores que comprometem a mitigação efetiva dos riscos para a saúde humana. A abordagem fragmentada reflete a ausência de um sistema unificado de gestão e remediação, no qual a divisão de competências entre diferentes órgãos reguladores resulta na falta de coordenação na aplicação de medidas preventivas e corretivas. Essa desarticulação reduz a efetividade das ações e pode levar em decisões inconsistentes ou sobrepostas, tornando o processo mais lento e menos eficiente.

A insuficiência na obtenção dos dados é um dos principais entraves à caracterização adequada da contaminação. O uso de técnicas de monitorização desatualizadas e a ausência de monitorização contínua e de alta resolução resultam na subavaliação dos impactes e na incapacidade de prever corretamente os riscos aos recetores. Outro aspeto crítico é o foco inadequado no curto prazo, no qual as metodologias adotadas priorizam soluções paliativas e imediatas, sem um planeamento estratégico para a resolução definitiva da contaminação. Esse cenário não apenas retarda uma remediação eficaz, mas também prolonga a exposição dos recetores ao risco, perpetuando os impactes ambientais e sociais da contaminação.

Para reverter esse cenário, é fundamental uma revisão estrutural das políticas e práticas adotadas, com a implementação de metodologias mais modernas, a centralização e harmonização das ações regulatórias e a adoção de monitorização contínua baseada em dados de alta precisão.

Atualmente, a remediação de sítios contaminados em Portugal tem se concentrado predominantemente na remoção de solo contaminado, uma abordagem que, embora seja tecnicamente viável em alguns casos, apresenta sérias limitações em termos de sustentabilidade e eficiência a longo prazo. Essa prática, muitas vezes conhecida como “*dig and dump*”, consiste na escavação e remoção do solo impactado, seguido de seu transporte para aterros licenciados ou unidades de tratamento *ex situ*. No entanto, essa estratégia não elimina a contaminação, apenas transfere o problema para outro local, gerando elevados custos financeiros e ambientais. O transporte de grandes volumes de solo contaminado aumenta a pegada de carbono, devido ao consumo de combustíveis fósseis para movimentação e destinação, além de pressionar a capacidade dos aterros, que já são limitados.

A dependência excessiva dessa técnica desconsidera a ampla gama de tecnologias de remediação sustentáveis disponíveis atualmente, muitas das quais permitem tratar a contaminação no próprio local (*in situ*) de forma eficaz e com menor impacte. Técnicas como biorremediação, oxidação química *in situ* (ISCO), redução química *in situ* (ISCR), atenuação natural

monitorada, barreiras reativas permeáveis (PRBs) e extração multifásica (MPE) são amplamente utilizadas em outros países para tratar contaminantes no solo e na água subterrânea sem a necessidade de escavação em larga escala. Além disso, tecnologias térmicas e eletrocinéticas podem ser aplicadas em cenários mais complexos, promovendo a destruição ou imobilização dos contaminantes sem remoção física do solo, tornando a remediação mais sustentável.

A falta de diversificação nas técnicas de remediação adotadas em Portugal não apenas limita a eficácia das intervenções, como também compromete a viabilidade económica da gestão desses sítios. O alto custo da remoção de solo pode tornar a reabilitação inviável, resultando na permanência de sítios contaminados abandonados ou subutilizados por décadas. Além disso, essa abordagem não soluciona a contaminação da água subterrânea, que frequentemente acompanha os impactes no solo e requer técnicas específicas para tratamento.

Portanto, é fundamental que haja uma mudança de paradigma, promovendo a adoção de técnicas inovadoras e sustentáveis, alinhadas com as melhores práticas internacionais. Isso permitirá que a remediação seja mais eficiente, reduzindo custos, minimizando impactes ambientais e garantindo a recuperação efetiva dos sítios contaminados de maneira sustentável.

A remediação de aquíferos é um desafio técnico global que requer a aplicação de tecnologias avançadas para tratar a contaminação de forma eficaz e sustentável. No entanto, em Portugal, a proibição da injeção de substâncias remediadoras no aquífero pela Autoridade Portuguesa do Ambiente (APA) constitui uma barreira significativa ao avanço das técnicas de remediação *in situ*, limitando as opções disponíveis para a recuperação de águas subterrâneas contaminadas. Enquanto muitos países já incorporaram abordagens inovadoras e bem regulamentadas, como oxidação química *in situ* (ISCO), redução química *in situ* (ISCR) e biorremediação estimulada, Portugal ainda mantém uma regulamentação restritiva que impede a adoção dessas práticas, dificultando a implementação de soluções mais eficazes para a descontaminação de aquíferos.

Essa limitação não apenas dificulta a reabilitação eficiente de sítios contaminados, mas também encarece os processos de remediação, e mantém o risco à saúde humana. Além disso, ao restringir o uso de tecnologias *in situ*, a regulamentação atual frequentemente resulta na remediação apenas do solo, deixando a contaminação da água subterrânea sem tratamento adequado. Esse problema agrava os riscos ambientais e de saúde pública, uma vez que os contaminantes podem continuar a se espalhar no aquífero, comprometendo sua qualidade a

longo prazo. A adoção de abordagens inovadoras é essencial para tratar a contaminação diretamente no meio impactado, evitando a necessidade de remoção massiva de solo e minimizando os impactos ambientais e financeiros da remediação. Ou seja, permitir técnicas específicas para a recuperação da água subterrânea garantiria uma reabilitação mais completa e eficaz dos sítios contaminados e garantiria a proteção dos recetores expostos.

Diante desse cenário, torna-se fundamental discutir a necessidade urgente de modernização da legislação ambiental portuguesa, alinhando-a às melhores práticas internacionais para viabilizar soluções mais eficazes e inovadoras no tratamento de aquíferos contaminados. A restrição imposta pela APA mantém Portugal em descompasso com países que já comprovaram a segurança e a eficácia dessas tecnologias quando aplicadas corretamente, seguindo protocolos rigorosos de monitorização.

A ausência de autorização para injeções de produtos remediadores no aquífero, inviabiliza completamente a recuperação de aquíferos contaminados. Dessa forma, urge uma revisão e modernização das regulamentações ambientais em Portugal, permitindo a adoção de práticas inovadoras e seguras, amplamente aceitas e regulamentadas em países como Estados Unidos, Canadá, Alemanha, Holanda, Reino Unido e Brasil.

Reafirma-se a relevância desta tese no contexto das investigações ambientais, especialmente no que se refere à gestão de sítios contaminados e ao fortalecimento da governança ambiental em Portugal. Os resultados obtidos evidenciam a importância de abordagens mais integradas e sustentáveis, que permitam uma caracterização mais precisa da contaminação e a implementação de estratégias de remediação mais eficazes. Além disso, os achados ressaltam a urgência da modernização das práticas e regulamentações ambientais, garantindo seu alinhamento com os avanços tecnológicos e as melhores práticas internacionais.

As descobertas desta pesquisa abriram caminho para investigações complementares, que podem explorar a contaminação por diferentes classes de contaminantes, a implementação de novas tecnologias de remediação e a evolução do marco legal associado à recuperação de sítios contaminados. O aprofundamento dessas questões contribuirá para aprimorar a gestão de sítios contaminados, assegurando que os esforços futuros sejam mais eficazes na proteção do meio ambiente e da saúde das populações afetadas. Dessa forma, a continuidade da pesquisa e do debate sobre essa temática é essencial para impulsionar a transição para uma governança ambiental mais eficiente, científica e sustentável.

Nesse contexto, esta tese oferece uma contribuição significativa tanto para o campo da perícia ambiental quanto para a modernização tecnológica da investigação e remediação de sítios contaminados, reforçando o papel da ciência na responsabilização civil e criminal por danos ambientais e na reparação efetiva desses sítios. A pesquisa demonstra como a perícia ambiental, fundamentada em dados científicos rigorosos, é primordial na identificação das fontes de contaminação, o estabelecimento donexo causal e a atribuição de responsabilidade aos agentes envolvidos. Além disso, evidencia a necessidade de adotar metodologias mais precisas e inovadoras, alinhadas às melhores práticas internacionais, para garantir que as decisões ambientais sejam técnica e juridicamente fundamentadas.

A adoção de tecnologias avançadas, regulamentações mais eficazes e práticas sustentáveis é indispensável para garantir que a proteção ambiental e a justiça socioambiental sejam tratadas com a seriedade e eficiência necessárias. Assim, esta tese não apenas contribui para o debate acadêmico e técnico, mas também serve como um chamado à ação, impulsionando a evolução das políticas públicas e regulamentações, de modo a assegurar um futuro mais seguro e sustentável para as próximas gerações.

Esta tese apresenta diretrizes práticas para o aprimoramento das políticas públicas na gestão de sítios contaminados, ressaltando a importância de fomentar o uso de tecnologias inovadoras e de estabelecer mecanismos financeiros sustentáveis para a remediação ambiental. Entre as propostas, destaca-se a criação de um fundo público específico, financiado por impostos ambientais ou contribuições das indústrias poluidoras, assegurando recursos para a recuperação de sítios impactados, especialmente nos casos em que os responsáveis diretos não possam ser identificados ou obrigados a arcar com os custos da remediação. Dessa forma, a pesquisa contribui para um avanço significativo na governança ambiental, fornecendo bases técnicas e estratégicas para que Portugal se alinhe às melhores práticas internacionais na gestão de sítios contaminados.

Apesar dos avanços promovidos, Portugal ainda enfrenta desafios significativos para implementar estratégias eficazes que resultem em ações concretas voltadas para o desenvolvimento sustentável dos solos. Embora o país tenha adotado diretrizes europeias para a proteção ambiental e a gestão de recursos, a aplicação dessas políticas na prática continua limitada por barreiras institucionais, lacunas regulatórias e dificuldades na alocação de recursos. A falta de integração entre os diferentes órgãos reguladores, a dependência de metodologias ultrapassadas e a resistência à adoção de práticas inovadoras impedem que a gestão de sítios

contaminados atinja o nível de eficiência necessário para promover uma transformação real e sustentável.

Sob esta perspectiva, esta tese representa um convite à reflexão e à ação para todos aqueles comprometidos com a proteção ambiental. Direcionada à comunidade científica, ao poder público e à sociedade como um todo, a pesquisa propõe um repensar profundo sobre o conceito de sustentabilidade, desafiando a manutenção de práticas ultrapassadas e incentivando a adoção de estratégias mais eficazes e inovadoras.

Diante dos métodos atualmente adotados, torna-se imperativo desenvolver novos modelos de reparação ambiental, que conciliem avanços científicos, inovação tecnológica e políticas públicas robustas. A transição para abordagens mais sustentáveis exige não apenas vontade política e investimentos estratégicos, mas também uma mudança de mentalidade, na qual a remediação de sítios contaminados deixe de ser um problema negligenciado e passe a ser tratada como uma prioridade na agenda ambiental e socioeconômica. Assim, esta tese busca contribuir para esse debate, incentivando a construção de soluções que promovam justiça ambiental, proteção dos recursos naturais e um legado positivo para as futuras gerações.

Como contribuição para futuras pesquisas, sugere-se a aplicação dessa mesma abordagem a outros compostos orgânicos voláteis (COVs), como benzeno e tolueno, que representam à mesma desafios complexos na investigação e remediação. Esses compostos possuem características distintas de mobilidade, persistência e toxicidade, exigindo estratégias personalizadas tanto para sua detecção quanto para o tratamento eficaz no solo e na água subterrânea. A ampliação do escopo de estudo para diferentes classes de contaminantes contribuiria para o aprimoramento das metodologias de caracterização e permitiria uma comparação entre diferentes técnicas de remediação, auxiliando na seleção das abordagens mais eficazes para cada tipo de contaminação.

Além disso, propõe-se a aplicação do modelo conceptual desenvolvido em diferentes tipos de sítios contaminados, como áreas agrícolas, regiões de mineração e zonas costeiras, que apresentam condições hidrogeológicas e fontes de contaminação distintas. A adaptação do modelo a esses contextos ampliaria sua aplicabilidade e robustez, permitindo a criação de um ferramental técnico mais abrangente e versátil para a caracterização e remediação de sítios contaminados. Essa expansão possibilitaria não apenas o refinamento das estratégias de gestão ambiental, mas também fortaleceria a base científica para a formulação de políticas públicas mais eficientes na recuperação de ecossistemas impactados.

Com base nas conclusões desta pesquisa, torna-se evidente a necessidade de aprimoramento no arcabouço legal que regulamenta a gestão de sítios contaminados em Portugal, assegurando maior eficácia nas ações de fiscalização e remediação. Atualmente, a legislação apresenta lacunas que dificultam a implementação de medidas mais rigorosas e a sua plena harmonização com as melhores práticas internacionais no setor.

Para fortalecer a governança ambiental e tornar os processos mais eficientes, propõem-se três ações estratégicas fundamentais:

- i. Criação de uma norma específica que regule a gestão de sítios contaminados, incorporando diretrizes claras sobre cada fase da investigação, os critérios de remediação e responsabilidades dos poluidores. Essa norma deve refletir o estado da arte nas tecnologias de remediação, exigindo que os responsáveis pela contaminação adotem as melhores técnicas disponíveis (*BAT - Best Available Technologies*), em vez de soluções minimamente aceitáveis. Essa mudança garantiria que os processos de reabilitação sejam mais eficazes e sustentáveis;
- ii. Criação de fundos públicos para a remediação de sítios contaminados, financiado por impostos sobre atividades industriais potencialmente poluidoras. Esse fundo asseguraria que sítios contaminados fossem reabilitados de forma rápida e eficaz, mesmo nos casos em que os poluidores não possam ser identificados ou responsabilizados diretamente. Modelos semelhantes já são adotados em outros países, como o *Superfund* nos Estados Unidos e o FEPRAC no Brasil, demonstrando-se eficazes na recuperação de locais impactados;
- iii. Incorporar na legislação incentivos fiscais e programas de subsídios para empresas que invistam em tecnologias mais limpas e eficientes para a remediação de sítios contaminados. A promoção da inovação tecnológica na gestão de sítios contaminados não apenas aceleraria os processos de recuperação ambiental, mas também estimularia o desenvolvimento de soluções sustentáveis e economicamente viáveis, garantindo um ambiente mais seguro e saudável para as gerações futuras.

A implementação dessas medidas representaria um avanço significativo na gestão ambiental de Portugal, modernizando suas práticas regulatórias e fortalecendo a capacidade de resposta às contaminações. Além disso, contribuiria para o alinhamento do país às diretrizes ambientais europeias e às melhores práticas globais.

As sugestões para investigações futuras não apenas expandem o conhecimento científico sobre investigação e remediação de sítios contaminados, mas também desempenham um papel fundamental no fortalecimento da governança ambiental e na efetivação da legislação. A adoção de novas metodologias e tecnologias avançadas permitirá uma caracterização mais precisa da contaminação, aumentando a eficiência dos processos de remediação e reduzindo as incertezas na tomada de decisão.

Além disso, a ampliação das pesquisas nessa área contribuirá para o desenvolvimento de políticas ambientais mais robustas, assegurando que a proteção do meio ambiente e da saúde pública seja conduzida de forma mais eficaz e sustentável. A integração de abordagens inovadoras com regulamentações atualizadas poderá impulsionar a adoção de práticas mais eficientes e economicamente viáveis, tornando a remediação de sítios contaminados um processo mais acessível e alinhado às melhores práticas internacionais.

Diante dos desafios e oportunidades apresentados ao longo desta tese, reafirma-se a necessidade urgente de modernizar a investigação e a remediação de sítios contaminados, fortalecendo a governança ambiental, aprimorando a regulamentação existente e promovendo a adoção de tecnologias inovadoras e sustentáveis. A proteção do meio ambiente e da saúde pública exige uma abordagem multidisciplinar, científica e estratégica, que integre pesquisa, tecnologia e políticas públicas eficazes.

Além disso, é fundamental que a gestão dos sítios contaminados seja encarada não apenas como uma obrigação legal, mas como um compromisso ético e social com as futuras gerações. A transição para um modelo mais eficiente e sustentável dependerá do comprometimento contínuo da comunidade científica, do setor regulador e da sociedade, para que a remediação ambiental deixe de ser uma utopia e se torne uma realidade consolidada.

Assim, esta pesquisa se encerra com a expectativa de que suas contribuições sirvam como um ponto de partida para novas investigações, aprimoramentos legislativos e avanços técnicos, garantindo um futuro no qual a recuperação ambiental seja conduzida de forma efetiva, responsável e sustentável.

O futuro que deixamos para as próximas gerações dependerá das escolhas que fazemos hoje. Que não lhes entreguemos solo e água contaminada, mas um legado de responsabilidade, respeito e compromisso com a vida e com o planeta – onde a remediação não seja uma necessidade constante, mas um princípio intrínseco de preservação e cuidado com o Planeta.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2013). ABNT NBR 15.515-3:2013 - Passivo ambiental em solo e água subterrânea - Parte 3: Investigação detalhada.
- ABNT (2015). ABNT-NBR 16434/2015 - Amostragem de resíduos sólidos, solo e sedimentos - Análise de compostos orgânicos voláteis - Procedimento.
- ABNT (2021). ABNT NBR 15.515-1:2021 - Passivo ambiental em solo e água subterrânea - Parte 1: Avaliação preliminar.
- ABNT (2022). ABNT NBR 16210:2022 - Modelo conceptual no gerenciamento de áreas contaminadas – Procedimento.
- ABNT (2023). ABNT NBR 15.515-2:2023 - Passivo ambiental em solo e água subterrânea - Parte 2: Investigação confirmatória.
- ACP (2016). Ação civil pública proposta pelo Ministério Público do Estado de São Paulo.
- Agaoglu, B.; Nadim K. C.; Traugott, S.; Reinhard, H. (2015). *Interphase mass transfer between fluids in subsurface formations: A review. Advances in Water Resources*, v. 79. pp.162–194.
- Almeida, J. R.; Oliveira, S. G.; Panno, M. (2000). Perícia Ambiental. 3ª, Thex. Rio de Janeiro.
- Amaral, L. G; Cunha, R. C. A; Neves, A. A; Riyis, M. T. (2020). Preservação física e química de amostras de solo para análise de compostos orgânicos voláteis. *Interfac EHS - Revista de Saúde, Meio ambiente e Sustentabilidade*, São Paulo, v15 n° 1.
- APA (2019). Guia Técnico – Plano de Amostragem e Plano de Monitorização do Solo. Agência Portuguesa do Ambiente.
- Araújo, L. A. (2008). Perícia Ambiental. In: A Questão Ambiental: diferentes abordagens. Cunha, S.B.; Guerra, A. J. T. (Orgs.). 4ª edição, Bertrand Brasil. Rio de Janeiro.
- ASTM (2016). ASTM E2893-16. *Standard Guide for Greener Cleanups*.
- ASTM (2018). ASTM D7663-2018. *Standard Practice for Active Soil Gas Sampling in the Vadose Zone for Vapor Intrusion Evaluations*.
- ASTM (2019). ASTM E1903-19. *Standard practice for environmental site assessments: phase II environmental site assessment process*.
- ASTM (2020). ASTM E1689-20. *Standard guide for developing conceptual site models for contaminated sites*.
- ASTM (2021). ASTM E1527-21. *Standard practice for environmental site assessments: phase I environmental site assessment process*.

Bardos, P.; Knight, M.; Humphrey, S. (2011). *Sustainable remediation. Environmental Scientist*. Londres. v. 21, n. 3, pp. 34-37.

Barnes D.; Bliss P.J (1983) *Biological control of nitrogen in wastewater treatment*. 1ª edição, SPON Product, Great Britain.

Barros A.R.B. (2001) Remoção de íons metálicos em água utilizando diversos adsorventes. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 107 p.

Barroso, S. (2021). O crime de poluição. Enquadramento jurídico, prática e gestão processual. 1ª edição, Centro de estudos judiciais. Lisboa.

Beck, U. (2011). Sociedade de risco. Rumo a uma outra modernidade. 2ª edição, Editora 34. São Paulo.

Bradley, P.M., (2000). *Microbial degradation of chloroethenes in groundwater systems*. Hydrogeology Journal, v. 8, pp. 104–111.

Bersch, J. I. (2022). Proposta de gerenciamento de risco para áreas contaminadas com solventes clorados cuja decloração gera substâncias mais tóxicas que os compostos originais. Monografia, Universidade de São Paulo, 89 p.

Bertolo, R. A. (2017). Bases técnicas para a gestão de áreas contaminadas por solventes organoclorados em aquíferos fraturados. Tese de livre docência, Universidade de São Paulo. 190 p.

Bertolo, R; Hirata, R.; Aly JR, O. (2019). Método de Valoração da Água Subterrânea Impactada por Atividades Contaminantes no Estado de São Paulo. *Águas Subterrâneas*, 33(3), 303–313.

Brasil (2009). Superior Tribunal de Justiça. Recurso Especial Nº 1.071.741 - SP. Rel. Ministro Herman Benjamin. Segunda Turma. Data de Julgamento: 24/03/2009. URL: <https://www.jusbrasil.com.br/jurisprudencia/stj/1379009414/inteiro-teor-1379009415> .

Brasil (2020). Supremo Tribunal Federal. Recurso Extraordinário nº 654.833, Relator: Min. Alexandre de Moraes, julgado em 20 de abril de 2020. Diário da Justiça Eletrônico, Brasília, DF, 24 jun. 2020. URL: <https://portal.stf.jus.br/jurisprudenciaRepercussao/verAndamentoProcesso.asp?classeProcesso=RE&incidente=4130104&numeroProcesso=654833&numeroTema=999>.

Brasil (2021). Superior Tribunal de Justiça. Súmula nº 652, de 2 de dezembro de 2021. Diário da Justiça Eletrônico, Brasília, DF, 7 dez. 2021. URL: <https://www.stj.jus.br/publicacao-institucional/index.php/sumstj/article/viewFile/12730/12823>.

Burbarelli, R.C. (2004). Avaliação da qualidade da água subterrânea e microbiologia do solo em área irrigada com efluente de lagoa anaeróbia. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 102 p.

Cardeña, U. M. J. (2009). Tratamento de efluentes aquosos contendo clorofenóis por meio de processo oxidativo avançado fotofenton. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo.

Cetesb. (2004). Manual para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas. Projeto CETESB/GTZ.

Cetesb. (2014). Decisão de Diretoria 045/2014/E/C/I, de 20-02-2014. Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2014, em substituição aos Valores Orientadores de 2005.

Cetesb. (2023). Manual para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas.

Cleary, R. W. (1989). Águas subterrâneas. 1ª edição, UFRJ. Rio de Janeiro.

Cuevas, A. R.; Brancher, R. D.; Topin, F.; Le Calvé, S.; Graur, I. (2021). *Numerical simulation of the sorption phenomena during the transport of VOCs inside a capillary GC column*. Chemical Engineering Science. v. 234.

Cunha, S. B. (2005). Avaliação e perícia ambiental. 4ª edição, Bertrand Brasil. São Paulo.

Cunha, A. S. (2010). Aplicação de técnicas químicas de remediação em áreas contaminadas por compostos organoclorados. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 101 p.

Damasio, G. V. (2018). Modelo hidrogeológico de uma área industrial na região de Juruatuba, São Paulo. Monografia, Universidade de São Paulo, 86 p.

Dinamarco, C. R; Grinover, A. P.; Cintra, A. C. A. (2014). Teoria geral do processo. 30ª edição, Malheiros Editores. São Paulo.

Domenico, P.A.; Schwartz, F.W. (1997) *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley & Sons: New York.

ECSA (2003). *Related Risk Assessment for the Marine Environment. Tetrachloroethylene*. European Chlorinated Solvent Association.

EEA. (2021). *Progress in management of contaminated sites* — European Environment Agency.

Fastner, J.; Barrett, M; Chilton, J.; Appleyard, S.; Dieter, H.; Wauchope, D.; Schmoll, O.; Howard, G.; Rivett, M.; Drewes, J. (2006). *Chemicals: Health relevance, transport and attenuation. In: Protecting groundwater for health: managing the quality of drinking-water sources*. pp. 81-137.

Fernandes, M. A. (2011). Condutividade hidráulica não saturada de um solo arenoso. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 161 p.

Ferreira, W. S. (2015). A prova pericial no novo código de processo civil. O Novo Código de Processo Civil, Revista do Advogado, São Paulo: AASP. v35: n126, pp. 204–209.

Ferreira, S. A. M. (2018) Processos microbiológicos associados à degradação de solventes organoclorados na água subterrânea – Jurubatuba – São Paulo – SP. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 133 p.

Freeze, R.A.; Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. 1ª edição, Prentice-Hall. New Jersey.

Fregona, L. G.G. (2023). Avaliação temporal da atenuação de compostos etenoclorados na água subterrânea de uma área industrial no bairro de Jurubatuba, São Paulo, Brasil. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 133 p.

Fetter, C. W. (2018). *Applied hydrogeology*. 4ª edição, Waveland Press. Illinois.

Fitts, C.R. (2015). *Água Subterrânea*. 2ª edição, Elsevier. Rio de Janeiro.

Garcia, M. G. D. (2010). Aspectos éticos da responsabilidade ambiental. In: GOMES, C. A., ANTUNES, T. (Orgs.) *Actas do Colóquio – A responsabilidade civil por dano ambiental*. Lisboa: Instituto de Ciências Jurídico-Políticas, 310 p.

Groster, A.; Edwards, E.A. (2005). *Growth of Dehalobacter and Dehalococcoides spp. during Degradation of Chlorinated Ethanes*. *Applied and environmental microbiology: American Society for Microbiology*, v. 72, n. 1, pp. 428-436.

Haest, P. J.; Lookman, R.; Keer, I. V.; Patyn, J.; Bronders, J.; Joris, M.; Bellon, J.; Smedt, F. (2010). *Containment of groundwater pollution (methyl tertiary butyl ether and benzene) to protect a drinking-water production site in Belgium*. *Hydrogeology Journal* 18: 1917-1925.

Hadley, P. W. and Newell, C. J. (2012). *Groundwater Remediation: The Next 30 Years*. *Ground Water*, 50: pp.669–678.

IPT. (2014). Guia de elaboração de planos de intervenção para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas - GAC - 1ª edição, 2014.

ISO (2017). ISO/IEC 17025:2017. Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração.

ITRC (2011) *Green and Sustainable Remediation: A practical framework*.

ITRC (2015). *Integrated DNAPL Site Characterization and Tools Selection*. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, DNAPL Site Characterization Team.

ITRC (2017). *Remediation Management of Complex Sites*. RMCS-1. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Remediation Management of Complex Sites Team.

Jonas, H. (2006). *O Princípio responsabilidade: ensaio de uma ética para a civilização tecnológica*. 1ª edição. Contraponto. Rio de Janeiro.

Kresic, N.; Mikszewski, A. (2012). *Hydrogeological Conceptual Site Models: Data Analysis and Visualization*. 1ª edição, CRC Press. Boca Raton.

Kueper, B. H.; Stroo, H. F.; Vogel, C. M.; Ward, C. H. (2014). *Chlorinated Solvent Source Zone Remediation*. ESTCP, Springer Science, New York, New York, United States of America.

Leite, J. R. M. & Ayala, P. A. (2004). *Direito Ambiental na Sociedade de Risco*. 2ª edição, Forense Universitária. Rio de Janeiro.

Leite, E. C. (2020). *Otimização da Remediação por Processos Térmicos através da Formação de Minerai s Reativos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Paulo, 162 p.

Lyman, W. J.; Reehl, W. F.; Rosenblatt, D. H. (1990). *Handbook of chemical property estimation methods: environmental behaviour of organic compounds*. 1ª edição, American Chemical Society. Washington.

Machado, P. A. L. (2017). *Direito Ambiental Brasileiro*. 23ª edição, Malheiros Editores. São Paulo.

Mariano, A. P. (2006) *Avaliação do potencial de biorremediação de solos e de águas subterrâneas contaminados com óleo diesel*. Tese de doutoramento, Universidade Estadual Paulista, 162 p.

Marinoni, L. G.; Arenhart, S.C.; Mitidiero, D. (2006). *Curso de Direito Processual Civil. Teoria Geral do Processo*. 1ª edição Revista dos Tribunais. São Paulo.

Marquardt, G. P.; Seyedabbasi, M. A.; Vanderkooy, M.; McMaster, M.; Wealthall, G.; Sale, T. C.; Newell, C. J. (2014). *14-Compartment Model Toolkit*. Strategic Environmental Research and Development (SERDP) Program.

Mazzuco LM. (2004) *Atenuação natural de hidrocarbonetos aromáticos em aquíferos contaminados com óleo diesel*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 86 p.

Meadows, D. H.; Meadows, D. L.; Randers, J. & Behrens III, W. W. (1972). *The limits to growth*. 1ª edição, Universe Books. New York.

Meire, R. O.; Azeredo, A.; Torres, J. P. M. (2007). *Aspectos ecotoxicológicos de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos*. *Oecologia Australis*. Bras., v.11, pp. 188-201.

Mercer, J. W.; Cohen, R. M. (1990). *A review of immiscible fluids in the subsurface: properties, models, characterization, and remediation*. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 6, pp.107-163.

Mesquita A.C. (2004) *Uso de técnicas de oxidação química e biodegradação na remoção de alguns compostos recalcitrantes*. Tese de doutoramento, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 158 p.

Metcalf L.; Eddy H. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment Disposal Reuse*. 4ª edition, McGraw - Hill Book. New York.

Minnich, M. (1993). *Behavior and Determination of Volatile Organic Compounds in Soil: A Literature Review*. EPA 600/R-93/140, National Exposure Research Laboratory, Las Vegas, NV.

Mirra, A. L. V. (2004). Ação civil pública e a reparação do dano ao meio ambiente. 2ª edição, Juarez de Oliveira. São Paulo.

Morrison, R. D. & Murphy, B. L. (2006). *Environmental Forensics. Contaminant Specific Guide*. 1ª edition, Elsevier. London.

Morrison, R. D. & Murphy, B. L. (2013). *Chlorinated solvents. A Forensics Evaluation*. 1ª edition, RSCPublishing. London.

Nouri, M.; Homae, M.; Bybordi, M. (2014). *Quantitative assessment of LNAPL retention in soil porous media. Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, v. 23, n. 8, pp. 801-819.

NRC. (2013). *Alternatives for Managing the Nation's Complex Contaminated Groundwater Sites*. Washington, D.C.: The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.

Pankow, J.F.; Cherry, J.A. (1996). *Dense Chlorinated Solvents and Other DNAPLs in Groundwater: History, Behavior, and Remediation*. 1ª edition, Waterloo Press, Ontario.

Parker, B. L.; Cherry, J. A.; Chapman, S. W. (2004). *Field study of TCE diffusion profiles below DNAPL to assess Aquitard integrity*. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 74, n. 1-4, pp. 197-230.

Pereira, R. D. B. (2022). Análise quantitativa do risco para a saúde humana de um terreno com solos contaminados em meio urbano: avaliação da exposição para uso como espaços verdes. Caparica – Lisboa. Dissertação de mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 228 p.

Petrisor, I. G. (2014). *Environmental Forensics Fundamentals. A Practical Guide*. 1ª edition, CRC Press. Florida.

Pitkin, S. (2008). *High Resolution Site Characterization at TRIAD Approach. In: Triad Investigation: New Approaches and Innovative Strategies*.

Pitkin, S.; Edwards, T.; Turley, L.; Rawnsley, C. (2014). *Reduction of Thermal Treatment Volume Through the Application of HRSC at Superfund Site*. Apresentado na Ninth International Conference on Remediation of Recalcitrant Compounds – Battelle. Monterey, CA. Book of Abstractes. Paper E-106.

Portugal. (1987). Decreto-Lei nº 78/1987. Código do Processo Penal. URL: <https://diariodarepublica.pt/dr/legislacao-consolidada/decreto-lei/1987-34570075> .

Portugal. (1987). Lei nº 11/1987. Lei de Bases do Ambiente. URL: https://pgdliisboa.pt/leis/lei_mostra_articulado.php?nid=752&tabela=leis.

Portugal. (2002). Lei nº 15/2002. Código de Processo nos Tribunais Administrativos – CPTA. URL: <https://diariodarepublica.pt/dr/legislacao-consolidada/lei/2002-34464475> .

Portugal. (2005). Constituição da República Portuguesa. URL: <https://www.parlamento.pt/Legislacao/Documents/constpt2005.pdf>.

Portugal. (2008). Decreto-Lei n.º 147/2008. Regime Jurídico da Responsabilidade por Danos Ambientais. URL:<https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/147-2008-454822>.

Portugal. (2008). Decreto-Lei n.º 208/2008. Regime de proteção das águas subterrâneas contra a poluição e deterioração. URL:<https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/208-2008-438700>.

Portugal. (2013). Decreto-Lei n.º 127/2013. Regime de emissões industriais aplicável à prevenção e ao controlo integrados da poluição, bem como as regras destinadas a evitar e ou reduzir as emissões para o ar, a água e o solo e a produção de resíduos. URL:<https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/127-2013-499546>.

Portugal. (2013). Decreto-Lei n.º 151-B/2013. Regime jurídico da avaliação de impacto ambiental (AIA) dos projetos públicos e privados suscetíveis de produzirem efeitos significativos no ambiente. URL:<https://diariodarepublica.pt/dr/analise-juridica/decreto-lei/151-b-2013-513863>.

Portugal. (2013). Lei n.º 41/2013. Código de Processo Civil. URL: <https://diariodarepublica.pt/dr/legislacao-consolidada/lei/2013-34580575>.

Portugal. (2014). Lei n.º 19/2014. As Bases da Política de Ambiente. URL:https://pgdlisboa.pt/leis/lei_mostra_articulado.php?nid=2091&tabela=leis&ficha=1.

Portugal. (2015). Decreto-Lei n.º 4/2015. Código do Procedimento Administrativo. URL: <https://diariodarepublica.pt/dr/legislacao-consolidada/decreto-lei/2015-105602322>

Portugal. (2020). Lei n.º 102-D/2020. Regime geral da gestão de resíduos, o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e altera o regime da gestão de fluxos específicos de resíduos. URL:<https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/102-d-2020-150908012>.

Portugal. (2023). Decreto-Lei n.º 11/2023. Reforma e simplificação dos licenciamentos ambientais. URL: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/11-2023-207272800>.

Portugal. (2023). Diretiva n.º 1/2023. Diretivas e instruções genéricas para execução da Lei de Política Criminal para o biénio de 2023-2025. URL:<https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/diretiva/1-2023-230097563>.

Portugal. (2024). Decreto-Lei n.º 10/2024 - Código Civil Português. URL:https://www.pgdlisboa.pt/leis/lei_mostra_articulado.php?nid=775&tabela=leis.

Queiroz, S, Maximiano, A, Siqueira, A. F., Cruz, Z. M. A. e Ramos, A.C. (2007). Parâmetros físico-químicos e microbiológicos do processo de atenuação natural monitorada em área contaminada por solventes clorados. *Natureza on line* 5(1): pp.10-18.

Rabus R & Heider J. 1998. *Initial reactions of anaerobic metabolism of alkylbenzenes in denitrifying and sulfate-reducing bacteria*. *Archives of Microbiology*, 170: pp.377-384.

Riyis, M. T. (2012). Investigação geoambiental com tomada de decisão em campo utilizando o piezocone de resistividade como ferramenta de alta resolução. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, 175 p.

Riyis, M. T.; Derrite, R. M.; Riyis, M. T. (2015). Estimativa de massa retida de contaminantes utilizando ferramentas de alta resolução (HRSC). Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA). v 5, n 2, 2015. pp. 38-49.

Riyis, M. T.; Derrite, R. M.; Hirai, E. Y.; Lima, E. M. B.; Ceolin, J. A.; Jesus, L. S. (2017). Avaliação das falhas no modelo conceitual de uma área contaminada utilizando investigação com métodos convencionais. Revista InterfacEHS, v12, n1.

Riyis, M. T. (2019). Contribuição para investigação de áreas contaminadas com abordagem de alta resolução. Tese de doutoramento, Universidade Estadual Paulista, 162 p.

Sale, T. C.; Newell, C. (2011). Decision Guide: *A Guide for Selecting Remedies for Sub-surface Releases of Chlorinated Solvent Sites*. ESTCP Project ER-05 30. Environmental Security Technology Certification Program, Washington DC.

Sale, T.; Parker, B.; Newell, C; Devlin J.F.; Adamson D., Chapman S., Saller, K. (2013). *Management of Contaminants Stored in Low Permeability Zones, A State of the Science Review*. SERDP Project ER-1740, Strategic Environmental Research and Development Program, Arlington, Virginia.

São Paulo (Estado). (2009). Lei nº 13.577/2009. Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas. URL: <http://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2009/lei%20n.13.577,%20de%2008.07.2009.htm>.

São Paulo (Estado). (2010). Resolução SMA nº 32, de 11 de maio de 2010. Dispõe sobre diretrizes sobre infrações e sanções administrativas ambientais. URL: https://smastr16.blob.core.windows.net/legislacao/sites/262/2022/07/2010resolucao_sma_032_2010.pdf.

Schifino, G. P. (2015). Avaliação da viabilidade de aplicação das técnicas de tratamento de sítios contaminados por combustíveis derivados do petróleo em solos pouco resistentes a impactes ambientais no Rio Grande do Sul. Trabalho de Diplomação - Engenheiro Ambiental - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Sharma, H. D.; Reddy, K. R. (2004). *Geoenvironmental Engineering: Site Remediation, Waste Containment, and Emerging Waste Management Technologies*. 1ª edition, John Wiley & Sons Inc. Nova Jersey.

Soares, L. C. R. (2023). Comportamento do contaminante creosoto em subsuperfície em área de usina desativada de tratamento de madeiras. Tese de doutoramento, Universidade de São Paulo, 236 p.

Steelman, C. M.; Meyer, J. R.; Parker, B. L. (2017). *Multidimensional investigation of bedrock heterogeneity/unconformities at a DNAPL-impacted site*. *Groundwater*, v. 55, n. 4, pp. 532-549.

Suthersan, S. S.; Payne, F. C. (2005), *In Situ Remediation Engineering*. 1ª edition, CRC Press. Boca Raton.

UE (2004). Diretiva 2004/35/CE. Responsabilidade ambiental em termos de prevenção e reparação de danos ambientais. URL:<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004L0035>.

UE (2006). Diretiva 2006/118/CE. Proteção das águas subterrâneas contra a poluição e a deterioração. URL:<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0118>.

UE (2006). Estratégia temática de proteção do solo. URL:<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006DC0231>.

UE (2010). Diretiva 2010/75/EU. Emissões industriais (prevenção e controlo integrados da poluição). URL:<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0075>.

UE (2014). Diretiva 2014/52/UE. Avaliação dos efeitos de determinados projetos públicos e privados no ambiente. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0052&from=MT>.

UE (2019). Pacto verde europeu. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pt/ip_19_6691.

UE (2021). Proteção dos solos. (2021/C 506/07). URL:<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021IP0143&from=PT>.

UE (2022). Missão da União Europeia para a Saúde dos Solos

UNESCO (1997). Declaração sobre as responsabilidades das gerações presentes em relação às gerações futuras. Paris: Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura.

USEPA. (1991). *Site characterization for subsurface remediation*. U.S. Environmental Protection Agency, US Government Printing Office. Washington, DC. EPA/625/4-91/026.

USEPA. (1994). *DNAPL Site Characterization*. OSWER Publication 9355.4-16FS, EPA/540/F-94/049.

USEPA. (1998). *Technical protocol for evaluating natural attenuation of chlorinated solvents in ground water*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. Washington, DC. EPA 600-R-98-128.

USEPA. (2004). *Final Principles and practices of enhanced anaerobic bioremediation of chlorinated solvents*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC. EPA 542-R-00-008.

USEPA. (2006). *In Situ Chemical Oxidation*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, D.C. EPA 600R-06/072.

USEPA. (2013). *Introduction to in situ bioremediation of groundwater*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response. Washington, DC. EPA 542-R-13-018.

USEPA. (2015). *Technical Guide for Assessing and Mitigating the Vapor Intrusion Pathway from Subsurface Vapor Sources to Indoor Air*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington DC.

Vanderkooy, M.; McMaster, M.; Wealthall, G; Seyedabbasi, M.A.; Sale, T.C.; Newell, C.J. (2014). *User's Guide for 14-Compartment Model*. Strategic Environmental Research and Development (SERDP) Program.

Webber, I. (2012). *PCBs and associated aromatics*. In: Ziegler, E. N. Encyclopedia of Environmental Science and Engineering. v II. pp. 873-970.

Welty, N.; Curry, P.; Quinnan, J. (2016). *Smart Characterization and Return of Investigation in: Advances in Remediation: A New Way to Thinking*. pp 13-18.

Wiedemeier, T., Rifai, H., Wilson, J., & Newell, C. (1999). *Natural attenuation of fuels and chlorinated solvents in the subsurface*. 1^a edition, John Wiley & Sons. New York.

Wilson, J.L., Conrad, S.H., Mason, W.R., Peplinski, W. and Hagen, E., (1990). *Laboratory investigation of residual liquid organics, from spills, leaks and the disposal of hazardous wastes in groundwater*. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, Oklahoma. USEPA/600/6-90/004.

REFERÊNCIAS CONSULTADAS

- Alberto, R. P. (2015). Da Perícia ao Perito. 4ª Ed. Niterói-RJ: Ed. Impetus, 499 p.
- Almeida, J. R. (2011). Perícia ambiental judicial e securitária: impacte, dano e passivo ambiental. 1ª edição, THEX Editora. Rio de Janeiro.
- Archer, A. B. (2009). Direito do Ambiente e Responsabilidade Civil. 1ª edição, Almedina. Coimbra.
- Ayala, P. A. (2002). Direito e Incerteza: A proteção jurídica das futuras gerações no estado de direito ambiental. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 346 p.
- Benjamin, A. H. (2011). A natureza no direito brasileiro: coisa, sujeito ou nada disso. *Nomos*. v. 31 n.1, pp. 79-98.
- Bouguerra, L. M. (1997). A Poluição Invisível. 1ª edição, Instituto Piaget. Lisboa.
- Bradley, P.M., Chapelle, F.H. (1996). *Anaerobic Mineralization of Vinyl Chloride in Fe(III)-Reducing, Aquifer Sediments*. *Environmental Science & Technology*, v. 30, pp.2084–2086.
- Bradley, P.M., Chapelle, F.H. (1997). *Kinetics of DCE and VC Mineralization under Methanogenic and Fe(III)-Reducing Conditions*. *Environmental Science & Technology*, v. 31, pp. 2692–2696.
- Bradley, P.M., Landmeyer, J.E., Dinicola, R.S. (1998). *Anaerobic Oxidation of [1,2-14C] Dichloroethene under Mn(IV)-Reducing Conditions: Applied and Environmental Microbiology*, v. 64, pp.1560–1562.
- Bradley, P.M., Chapelle, F.H., Lovley, D.R. (1998). *Humic acids as electron acceptors for anaerobic microbial oxidation of vinyl chloride and dichloroethene: Applied and environmental microbiology*, v. 64, pp. 3102–3105.
- Bradley, P.M., Chapelle, F.H. (2000). *Aerobic microbial mineralization of dichloroethane as sole carbon substrate*. *Environmental Science & Technology*, v. 34, pp. 221–223.
- Colborn, T., Dumanoski, D. & Myers, J. P. (2002). O Futuro Roubado. 1ª edição, L&PM. Porto Alegre.
- Cunha, R. C. A. (1997). Avaliação de risco em áreas contaminadas por fontes industriais desativadas - estudo de caso. Tese de doutoramento, Universidade de São Paulo, 165 p.
- Declaração da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano — 1972 Princípio 1 da Declaração de Estocolmo de 1972. URL: <https://www.un.org/en/conferences/environment/stockholm1972> .
- EEA. (2019) O ambiente na Europa: Estado e perspectivas 2020. Copenhagen.

- EEA. (2020). Introdução aos solos.
- Falufosi, M. O. (2012). *Application of geochemistry in forensic studies*. In: Seminar in Geology, Faculty of Science, University of Ibadan, Nigeria, 44 p.
- Farias, A. *et al.* (2012). Crimes de poluição. In: Tocchetto, D. Perícia ambiental criminal. 2ª edição, Millennium. Campinas.
- Freitas, J. (2019). Sustentabilidade: direito ao futuro. 4ª edição, Fórum. Belo Horizonte.
- Gomes, C. A. (2013). Direito Ambiental. O ambiente como objeto e os objetos do direito do ambiente. 1ª edição, Juruá. Curitiba.
- Gomes, C. A. (2018). Introdução ao direito do ambiente. 4ª edição. AAFDL Editora. Lisboa.
- Gomes, C. A, Lanceiro, R T, Oliveira, H. (2021). O objeto e a evolução do Direito do Ambiente. Tratado de direito do ambiente, Lisboa, v.1, pp. 32-77.
- Hess-Kosa, K. (2008). *Environmental site assessment. Phase I: fundamentals, guidelines and regulations*. 3ª ed. Boca Raton: CRC Press.
- Imwinkelried, E. J. (2012). *Forensic Metrology: The New Honesty about the Uncertainty of Measurements in Scientific Analysis*. UC Davis Legal Studies Research Paper N 317.
- Innerarity, D. (2013). A Humanidade Ameaçada: a Gestão dos Riscos Globais. 1ª Ed. Lisboa: Teodolito, 239 p.
- ITRC. (2020). *Integrated DNAPL Site Strategy*. IDSS-2. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, IDSS Team.
- Kaplan, I. R., Galperin, Y., LU, S-T. & Lee, R-P. (1997). *Forensic Environmental Geochemistry: differentiation of fuel-types, their sources and release time*. Organic Geochemistry, Amsterdam, v.27, Issues 5–6, pp. 289-299, 301-317.
- Leite, J. R. M. & Ayala, P. A. (2012). Dano Ambiental. 8ª edição. Forence. Rio de Janeiro.
- Magalhães, B; Pinto, J. V.B; Coutinho, P. (2020). Direito do ambiente, do ordenamento do território e do urbanismo – legislação essencial. 2ª edição, Quid Juris Sociedade editora. Lisboa.
- Manziona, R. L. (2015). Águas subterrâneas. Conceitos e aplicações sob uma visão multidisciplinar. 1ª edição, Paco Editorial. Jundiaí.
- Marriott, B. B. (1997). *Environmental Impact Assessment. A Practical Guide*. 1ª edition, McGraw-Hill. New York.
- Morrison, R. D. & Murphy, B. L. (2007). *Introduction to Environmental Forensics*. 1ª edition, Elsevier. London.
- Neves, M. C. P. & Marques, V. S. (2017). Ética aplicada – Ambiente. 1ª edição. Edições 70. Lisboa.

NFESC. (2004). *Principles and practices of enhanced anaerobic bioremediation of chlorinated solvents*. Environmental Security Technology Certification Program Arlington, Virginia.

Oliveira, A. P. (2007). *Causalidade e Imputação na Responsabilidade Civil Ambiental*. 1ª edição, Almedina. Coimbra.

Oliveira, H. D. (2020). *O conteúdo do dever do Estado de garantia de reparação do dano público ambiental no direito público do ambiente*. Tese doutoramento, Universidade de Lisboa, 628 p.

Oliveira, H. (2021). *Princípios do direito do ambiente*. Tratado de direito do ambiente, Lisboa, v.1, pp. 78-124.

Prego, R., Duarte, A., Panteleitchouk, A. & Santos, T. R. (2002). *Estudo sobre Contaminação Ambiental na Península Ibérica*. 1ª edição, Instituto Piaget. Lisboa.

Philp, R.P. (2014). *An overview of environmental forensics*. *Geológica Acta*, ALAGO Sp. Pub, Oklahoma, vol. 12, nº 4, pp. 363-374.

Ribeiro, W.C. (2020). *A ordem ambiental internacional*. 3ª edição, Editora Contexto. São Paulo.

Ritz, K., Dawson, L. & Miller D. (2008). *Criminal and Environmental Soil Forensics*. 1ª edition, Springer. London.

Ruffell, A. & Mckinley, J. (2004). *Forensic geoscience: applications of geology, geomorphology and geophysics to criminal investigations*. Irlanda: Earth-Science Reviews, pp. 235-247.

Sands, P. (2004). *Principles of International Environmental Law*. 4ª edição, Cambridge University Press. Reino Unido.

Santos, J.C. (2012). *A perícia ambiental criminal*. In: Tocchetto, D. *Perícia ambiental criminal*. 2ª edição, Millennium, Campinas.

Steigleder, A. M. (2003). *Aspectos jurídicos da reparação de áreas contaminadas por resíduos industriais*. *Revista de Direito Ambiental*, vol. 29. São Paulo: Editora Revista dos Tribunais.

Thieffry, P. (2008). *Direito Europeu do Ambiente*. 1ª edição, Instituto Piaget. Lisboa.

USEPA (1987). *Transformations of halogenated aliphatic compounds: oxidation, reduction, substitution, and dehydrohalogenation reactions occur abiotically or in microbial and mammalian systems*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/J-87/206.

USEPA (1991). *Ground Water Issue: dense nonaqueous phase liquids*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response Office of Research and Development. Washington, DC. EPA/540/4-91-002.

USEPA (1993). *Evaluation of the likelihood of DNAPL presence at NPL sites, national results*. OSWER Publication 9355.4-13, EPA/540-R-93-073.

USEPA (1999). *Engineered approaches to in situ bioremediation of chlorinated solvents: fundamentals and field applications*. U.S. Environmental Protection Agency, Solid Waste and Emergency Response. Washington, 1999. EPA 542-R-00-008.

USEPA (2003). *The DNAPL Remediation Challenge: Is There a Case for Source Depletion?* U.S. Environmental Protection Agency Washington, Office of Research and Development. Washington, DC. EPA/600/R-03/143.

USEPA (2003). *The DNAPL Remediation Challenge: Is There a Case for Source Depletion*. U.S. Environmental Protection Agency Washington, Office of Research and Development. Washington, DC. EPA/600/R-03/143.

USEPA (2004). *Site characterization technologies for DNAPL investigations*. U.S. Environmental Protection Agency Washington, Office of Research and Development. Washington, DC. EPA/542/R-04/017.

USEPA (2017). *Best Practices for Environmental Site Management: A Practical Guide for Applying Environmental Sequence Stratigraphy to Improve Conceptual Site Models*. U.S. Environmental Protection Agency, Decontamination Analytical and Technical Service. Fairfax, Virginia. EPA/600/R-17/293.

USEPA (2021). *Handbook for Sampling and Sample Preservation of Water and Wastewater*. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C. EPA-600/4-82-029.

USEPA (2022). *Regional Screening Levels (RSLs) Generic Tables*.

Veiga, J. E. (2019). *O Antropoceno e a Ciência do Sistema Terra*. 1ª edição, Editora 34. São Paulo.

Veyret, Y. (2003). *Os riscos. O homem como agressor e vítima do meio ambiente*. 1ª edição, Editora Contexto. São Paulo.

Vieira, K. V. (2010). *Perícia Judicial Ambiental: Conhecimentos técnicos e jurídicos como suporte para tomada de decisão*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 155 p.

Wedy, G. (2009). *O princípio constitucional da precaução como instrumento de tutela do meio ambiente e da saúde pública*. 1ª Editora Fórum. Belo Horizonte.





2024

ERIKA VON ZUBEN

GEOQUÍMICA APLICADA A PERÍCIA AMBIENTAL