

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

JONES HENRIQUE CARVALHO DA SILVA

**APLICAÇÃO DO BOMBEAMENTO E TRATAMENTO NA REMEDIAÇÃO DE
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS CONTAMINADAS - REVISÃO DE LITERATURA E
ESTUDOS DE CASO**

São Paulo

2024

APLICAÇÃO DO BOMBEAMENTO E TRATAMENTO NA REMEDIAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS CONTAMINADAS - REVISÃO DE LITERATURA E ESTUDOS DE CASO

Versão Original

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Netto Moreno

São Paulo

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

SILVA, JONES

APLICAÇÃO DO BOMBEAMENTO E TRATAMENTO NA REMEDIAÇÃO
DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS CONTAMINADAS - REVISÃO DE LITERATURA
E ESTUDOS DE CASO / J. SILVA -- São Paulo, 2024.

49 p.

Monografia (MBA em MBA em Gestão de Áreas Contaminadas,
Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) -
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de
Engenharia Química.

1.Águas subterrâneas (Contaminação) 2.Solos (Remediação)
3.Bombeamento e Tratamento I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

RESUMO

SILVA, JONES. APLICAÇÃO DO BOMBEAMENTO E TRATAMENTO NA REMEDIAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS CONTAMINADAS - REVISÃO DE LITERATURA E ESTUDOS DE CASO. 2024. 50 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

O gerenciamento de áreas contaminadas é de extrema importância na proteção da saúde pública e do meio ambiente, visando mitigar os riscos associados à exposição a contaminantes. Este processo requer uma compreensão detalhada das características das áreas afetadas e dos efeitos dos contaminantes, fornecendo assim as informações necessárias para a tomada de decisões sobre as intervenções mais apropriadas. Uma das abordagens amplamente utilizadas na remediação de águas subterrâneas contaminadas é o método de bombeamento e tratamento (P&T). Esta técnica consiste na extração da água contaminada do lençol freático por meio de bombeamento e seu subsequente tratamento, podendo envolver processos como separação de água e óleo, tratamento em estações específicas ou até mesmo a reinjeção da água tratada no aquífero. Embora haja orientações gerais sobre o design, operação e otimização de sistemas de P&T, há uma falta de diretrizes específicas no Brasil para guiar as decisões sobre a continuidade do uso deste método, a transição para novas técnicas de remediação ou o encerramento do processo de P&T. Esta lacuna na literatura motivou o presente estudo, que teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre a utilização do bombeamento e tratamento na remediação de áreas contaminadas, levantando parâmetros importantes na aplicação do método, assim como discutir os erros e acertos observados em sua implementação. Através da apresentação de três estudos de caso, foi possível observar que o método de bombeamento e tratamento pode ser eficaz, especialmente quando é cuidadosamente planejado e considera todas as variáveis que compõem a complexa estrutura do gerenciamento de áreas contaminadas. Além disso, a bibliografia existente destaca a importância da integração de outras técnicas de remediação para otimizar a eficácia do processo de P&T.

Palavras chaves: Águas subterrâneas (contaminação). Solos (remediação). Bombeamento e Tratamento

ABSTRACT

SILVA, JONES. PUMPING AND TREATMENT APPLICATION IN THE REMEDIATION OF CONTAMINATED GROUNDWATER - LITERATURE REVIEW AND CASE STUDIES. 2024. 50 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

The management of contaminated areas is of essential importance in protecting public health and the environment, aiming to mitigate risks associated with exposure to contaminants. This process requires a detailed understanding of the characteristics of affected areas and the effects of contaminants, thus providing the necessary information for decision-making regarding the most appropriate interventions. One of the widely used approaches in remediating contaminated groundwater is the pumping and treatment (P&T) method. This technique involves extracting contaminated water from the groundwater table through pumping and subsequent treatment, which may involve processes such as water and oil separation, treatment in specific stations, or even reinjection of treated water into the aquifer. Although there are general guidelines on the design, operation, and optimization of P&T systems, there is a lack of specific guidelines in Brazil to guide decisions regarding the continued use of this method, transitioning to new remediation techniques, or terminating the P&T process. This literature gap motivated the present study, which aimed to conduct a comprehensive literature review on the use of pumping and treatment in the remediation of contaminated areas, raising important parameters in the application of the method, as well as discussing the successes and failures observed in its implementation. Through the presentation of three case studies, it was possible to observe that the pumping and treatment method can be effective, especially when carefully planned and considering all variables that make up the complex structure of contaminated area management. Furthermore, existing literature highlights the importance of integrating other remediation techniques to optimize the effectiveness of the P&T process.

Key word: Groundwater (contamination). Soils (remediation). Pumping and Treatment

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das etapas de atuação em áreas contaminadas segundo a Resolução CONAMA 420/2009 (BRASIL, 2009).	14
Figura 2 - Cenário representativo do funcionamento do bombeamento e tratamento, onde uma fonte ativa resulta em uma pluma de fase dissolvida, os poços de bombeamento interceptam a pluma, a água contaminada é bombeada para um sistema de tratamento na superfície. (TRUEX et al, 2015).	16
Figura 3 - Exemplos de contenção hidráulica em vista e seção transversal em um plano utilizando a tecnologia de bombeamento e tratamento: (a) poço de bombeamento, (b) dreno e (c) poço dentro de um sistema de barreira (APA, apud Cohen et al., 1994)	17
Figura 4 - Concentração em relação a duração ou volume de bombeamento, mostrando efeitos de “tailing”, “rebound” e recuperação (APA, apud Cohen et al., 1994).	22
Figura 5 - Alterações nas médias relativas de concentrações de tricloroetileno (TCE) em camadas de argila de diferentes espessuras em função do tempo (APA, 1996., apud NRC, 1994).	25
Figura 6 - Zona residual criada na antiga área de depressão do cone, após desligar o sistema de bombeamento do (EPA, 1996 apud Gorelick et al., 1993).....	27
Figura 7 – Representação de uma estratégia mista de contenção. Um sistema de bombeamento e tratamento é utilizado com barreira para conter a área fonte da contaminação da água subterrânea, posteriormente coletar e tratar a pluma de contaminantes dissolvidos (Cohen et al., 1994).	29
Figura 8 - Concentrações de VOC (Compostos Orgânicos Voláteis) afluentes e efluentes (mg/L) na planta de tratamento Chem-Dyne de 1987 a 1992 (Cohen et al., 1994, segundo Papadopoulos & Associates, 1993).	32
Figura 9 - Estágios de remediação em relação às concentrações de contaminantes de exemplo em um poço em um local de bombeamento e tratamento (EPA, 1992)."	33
Figura 10 - Design inicial do sistema Bombeamento e tratamento do Aterro 2. A seta vermelha representa a direção do eixo da pluma e a direção do gradiente hidráulico no Modelo Conceitual Inicial. A seta amarela mostra o componente lateral do gradiente hidráulico.....	35
Figura 11 - Design otimizado do sistema de Bombeamento e Tratamento do Aterro 2 (os poços PW e a localização revisada da galeria de infiltração) e as linhas de caminho de captura de águas subterrâneas previstas em relação à fonte de contaminação, juntamente com a potenciometria local.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e Desvantagens do Bombeamento e Tratamento.....	21
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	OBJETIVOS.....	11
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
4	REVISÃO DA LITERATURA.....	13
4.1	Áreas Contaminadas	13
4.2	Gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil	14
4.3	Métodos de remediação	15
4.4	Bombeamento e Tratamento	15
4.4.1	Quando o Bombeamento e Tratamento é uma técnica aplicável.....	20
4.4.2	Problemas com “Rebound” e “Tailing” e como antecipá-los.....	22
4.4.3	Bombeamento e tratamento para a redução da massa de contaminantes	27
4.5	Tratamento da Água Subterrânea/NAPL Extraída	29
4.6	Monitoramento da Restauração do Aquífero.....	30
4.6.1	Avaliação do Sucesso na Restauração.....	32
5	ESTUDOS DE CASO	34
6	DISCUSSÃO.....	41
7	CONCLUSÕES.....	45
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso indispensável para manutenção da saúde humana e ambiental sendo o principal fator para manutenção de ciclos biológicos, geológicos e químicos (OLIVEIRA-FILHO e PARRON, 2007).

A diminuição da capacidade de reserva dos recursos hídricos superficiais para abastecimento populacional, principalmente por problemas de secas severas, cada vez mais, tem gerado um aumento na demanda pelo consumo de água subterrânea, proporcionalmente aumentando a preocupação com a qualidade do recurso natural. (SILVA-FILHO *et al.*, 2009).

Dentro de um contexto técnico é importante entender que a água subterrânea corresponde à parte mais lenta do ciclo hidrológico e constitui a principal reserva de água doce do mundo. É toda água em dimensões milimétricas que acumula e se infiltra abaixo da terra, preenchendo os poros (vazios intergranulares) das rochas sedimentares e fissuras das rochas compactas de formações geológicas (BOSCARDIN e BORGHETTI *et al.*, 2004).

Na grande maioria das vezes, a água subterrânea é de difícil acesso e, até pouco tempo atrás, pouco estudada, sendo um recurso caro, que demanda perfuração de poços. A maioria dos estudos e recursos estiveram focados nos cursos d'água superficiais, tornando a água subterrânea um agente secundário (OKI e KANAE, 2006). Segundo Gleeson (2015), apenas 6% de toda água subterrânea que o planeta possui hoje é própria para consumo humano. Essa água, considerada "moderna", está presente mais próxima da superfície e pode ser extraída ou usada para complementar recursos localizados em corpos superficiais (SILVA, 2018).

Com a necessidade do consumo de água subterrânea, cresce a preocupação com a poluição através de vazamentos de dispositivos de controle e/ou armazenamento de produtos perigosos, como tanques, diques de contenção e sistemas separadores de água e óleo. Esses produtos, como óleos e combustíveis, são uma das maiores fontes de contaminação do solo e lençol freático, e cada vez mais tem gerado debates e estudos acerca do tema (FREIRE, TRANNIN e SIMÕES, 2014).

Segundo a RESOLUÇÃO CONAMA n° 420 de 28 de dezembro de 2009, será declarada Área Contaminada sob Intervenção-ACI, pelo órgão ambiental competente, aquela em que for constatada a presença de substâncias químicas em fase livre ou for comprovada, após investigação detalhada e avaliação de risco, a existência de risco à saúde humana.

A contaminação da água subterrânea poderá oferecer riscos diretos e indiretos à saúde humana.

Quando se trata de risco, considera-se a possibilidade de efeitos adversos à saúde humana a partir da inalação, contato com a pele e olhos, ou mesmo ingestão (FREIRE, TRANNIN e SIMÕES, 2014).

O Relatório de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo elaborado pela CETESB (CETESB, 2023), que apresenta dados atualizados em tempo real, informa a população e o número de vezes que um tipo de técnica foi utilizada ou pode estar sendo adotada durante o processo de remediação de áreas contaminadas. Segundo esse relatório, o Bombeamento e Tratamento é o segundo método mais utilizado na remediação das águas subterrâneas.

A técnica de bombeamento e tratamento consiste na retirada da água contaminada do lençol freático por bombeamento, e envio dessa água para tratamento através de sistemas como separadores de água e óleo ou estação de tratamento de efluentes industriais ou mesmo reinjeção no aquífero (EPA, 1996). A utilização desse método objetiva a remoção ou atenuação da pluma de contaminantes, sendo influenciado pelo tamanho da pluma, permeabilidade e tipo de solo (EPA, 1996).

Assim sendo, esse trabalho irá avaliar o estado da arte da técnica de bombeamento e tratamento para a remediação de águas subterrâneas contaminadas.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é realizar uma revisão de trabalhos publicados na literatura que abrangem os aspectos técnicos a serem considerados na aplicação de bombeamento e tratamento de águas subterrâneas como técnica de remediação em áreas contaminadas.

Como objetivos específicos deste trabalho citam-se:

- a. Levantar parâmetros importantes para a aplicação da técnica, como as características do site e entendimento do Modelo Conceitual da área;
- b. Descrever as situações em que o bombeamento e tratamento pode ser utilizado, e com quais contaminações mais se recomenda sua aplicação;
- c. Apresentar estudos de casos relativos à aplicação dessa técnica;
- d. Discutir os erros e os acertos da aplicação do método.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho, foram buscados artigos científicos, livros e manuais técnicos em sites de entidades de pesquisa como o Google Acadêmico, Scielo e Science Direct, assim como consultas aos sites da *Federal Remediation Technologies Roundtable* (FRTR), *United States Environmental Protection Agency* (EPA) e Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

Todas as referências utilizadas foram listadas ao final deste trabalho.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 Áreas Contaminadas

De acordo com (CETESB, 2023) áreas contaminadas são locais onde existiram ou existem fontes primárias de contaminação, e onde persistem ou residem quantidades de matérias ou concentrações de substâncias nos compartimentos ambientais, como água, solo e ar, que podem causar danos aos bens a proteger. Essas áreas surgem geralmente atreladas a processos socioeconômicos ambientalmente incorretos, que na maioria das vezes subdimensionam ou nem mesmo consideram a utilização de recursos naturais sem a observância dos parâmetros de proteção ambiental (LIMA *et al.*, 2017; GÜNTHER, 2006).

Quando se levanta o uso anterior e a depender deste, os sites apresentam como principais causas de contaminação a disposição inadequada de resíduos depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados, manejo inadequado de substâncias perigosas nos processos industriais em operação armazenados de forma inadequada, vazamentos, acidentes, sistemas de controle ambiental avariados, além da desativação de processos (GÜNTHER, 2006).

Atualmente, os temas relacionados a gestão de áreas contaminadas tem sido cada vez mais discutidos, principalmente pela necessidade de reintegração dessas áreas que já não possuem uma predileção do mercado imobiliário, principalmente pelos altos valores envolvidos nas atividades de gerenciamento de áreas contaminadas (HABERMANN e GOUVEIA, 2014).

A reinserção dessas áreas de forma indiscriminada pode significar um grande problema, trazendo risco à população como um todo e ao meio ambiente, pois podem funcionar como fontes dinâmicas de contaminação secundária, extrapolando os contaminantes para além da área afetada e para outros meios, estendendo seus efeitos deletérios (GÜNTHER, 2006).

O gerenciamento de áreas contaminadas tem como finalidade minimizar os riscos associados à exposição da população e ao impacto no meio ambiente causados por contaminantes. Este processo envolve um conjunto de medidas que visam compreender as características dessas áreas e os efeitos provocados pelos contaminantes, proporcionando informações cruciais para a tomada de decisões em relação às intervenções mais apropriadas (CETESB, 2001).

Os procedimentos e ações críticas durante este processo no país seguem as diretrizes estabelecidas pela Resolução CONAMA 420/2009. Isso engloba as seguintes etapas: identificação, que abrange uma avaliação preliminar e uma investigação confirmatória;

diagnóstico, envolvendo uma investigação minuciosa e uma avaliação de risco para embasar a fase de intervenção; e intervenção, cujo propósito é implementar medidas de controle para eliminar ou reduzir a níveis aceitáveis os riscos. Este processo também inclui o monitoramento da eficácia das medidas adotadas, considerando tanto o uso atual quanto o futuro da área. A Figura 1 oferece uma visão detalhada dessas fases de gerenciamento de áreas contaminadas conforme o Anexo III da Resolução CONAMA 420/2009 (BRASIL, 2009).

Figura 1 - Fluxograma das etapas de atuação em áreas contaminadas segundo a Resolução CONAMA 420/2009 (BRASIL, 2009).

O Brasil possui legislações específicas para o gerenciamento de áreas contaminadas, o Estado de São Paulo particularmente, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) evolui cada vez mais no intuito da padronização e melhoramento técnico dos requisitos ambientais envolvidos com o gerenciamento de áreas contaminadas, sendo que atualmente disponibiliza em seu site um sistema para divulgação das áreas contaminadas cadastradas no estado de São Paulo que funciona em tempo real.

precária. A grande parte dos órgãos ambientais dos Estados brasileiros não divulgam qualquer tipo de informação sobre o tema, estados como São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro disponibilizam informações sobre o tema, porém só os dois primeiros compilam e analisam esses dados, de forma mais abrangente e atualizada (CANARIO e BETTINE, 2020).

4.3 Métodos de remediação

Para abordar a remediação de solos e águas subterrâneas, é crucial levar em conta uma variedade de fatores, incluindo geologia, hidrogeologia, hidrogeoquímica, características físicas e químicas dos contaminantes, considerações regionais como custos de energia, preço da mão-de-obra, aspectos políticos, além do tempo e dos recursos disponíveis (STIER, 2004).

É essencial realizar uma análise abrangente desses elementos para desenvolver estratégias eficazes que atendam aos requisitos específicos de cada situação de contaminação.

Atualmente, no estado de São Paulo, as principais técnicas de remediação utilizadas são: Extração multifásica, Bombeamento e tratamento, Recuperação de fase livre, Remoção de Solo/Resíduo, Atenuação natural monitorada, Oxidação química, Extração de vapores, *Airparging*, Biorremediação, Barreira hidráulica, Cobertura de Resíduo/Solo Contaminado, Redução Química, Biorremediação, Barreira hidráulica, Cobertura de Resíduo/Solo Contaminado, Redução química, Barreira física, Desclorinação Redutiva, Barreiras reativas, *Biosparging*, Encapsulamento geotécnico, Tratamento térmico in situ, *Bioventing* entre outras (CETESB, 2023).

4.4 Bombeamento e Tratamento

No estudo em questão o foco é na remediação de águas subterrâneas utilizando-se da tecnologia de bombeamento e tratamento (*Pump & Treat - P&T*) que é amplamente utilizada no mundo todo. A bibliografia existente, principalmente no quesito técnico é ampla (por exemplo, EPA 1994, 1996a, 1997, 1999a, 1999b, 2000a, 2002a, 2007a, 2008; USACE 1999, 2000, TRUEX 2003, 2006, 2013, 2015 e 2017, BRUSSEAU, 2007, 2011 e 2013) e que fornece informações sobre design, operação e otimização de sistemas bombeamento e tratamento.

Conforme dados da CETESB (2023) o bombeamento e tratamento é uma das técnicas mais amplamente empregadas na remediação de aquíferos contaminados no estado de São Paulo.

A técnica de bombeamento e tratamento na remediação de águas subterrâneas objetiva a remoção da massa ou a contenção da pluma de contaminantes. Portanto, a eficácia na

remediação da água subterrânea por esse método, exige um entendimento aprofundado dos contaminantes e das características específicas do local (EPA,1996).

Além disso, é imperativo que o plano de remediação inclua a implementação de um gerenciamento dinâmico do sistema, baseado em objetivos realistas. (HOFFMAN, 1993).

Segundo a EPA (2013), os sistemas de bombeamento e tratamento consistem em uma abordagem comum para a remediação de águas subterrâneas contaminadas por produtos químicos dissolvidos, como solventes industriais, metais e óleo combustível. Nesse processo, a água subterrânea é extraída de poços e direcionada para um sistema de tratamento. Além disso, ao bombear a água contaminada na direção dos poços, esses sistemas são empregados para "conter" a pluma de contaminantes, impedindo sua propagação no meio subterrâneo. Essa prática visa evitar que os contaminantes alcancem poços de água potável, áreas alagadas, cursos d'água e outros recursos naturais.

Truex et al. (2015) complementa essa descrição ao destacar que a tecnologia do bombeamento e tratamento é conceitualmente simples, envolvendo a extração de águas subterrâneas através do bombeamento e envio da água contaminada para tratamento na superfície, seguido pelo monitoramento para avaliar a eficácia. No entanto, ressalta que o impacto do bombeamento e tratamento é influenciado por diversos fatores e que a tecnologia abrange variações, incluindo fraturamento hidráulico e aprimoramentos químicos e biológicos, que podem ser implementados para aumentar a eficiência do processo.

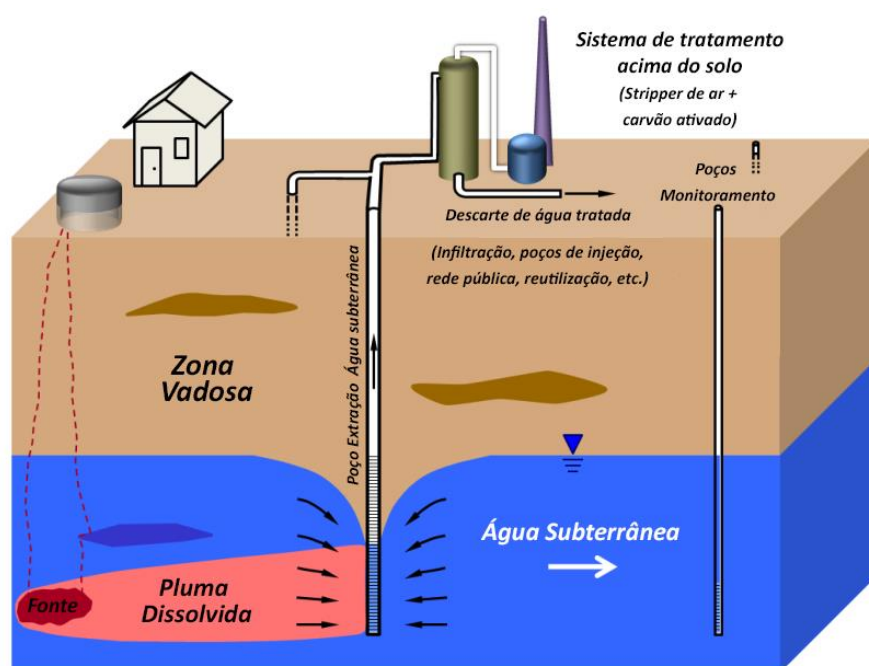


Figura 2 - Cenário representativo do funcionamento do bombeamento e tratamento, onde uma fonte ativa resulta em uma pluma de fase dissolvida, os poços de bombeamento interceptam a pluma, a água contaminada é bombeada para um sistema de tratamento na superfície. (TRUEX et al, 2015).

Segundo a EPA (1996) os sistemas de bombeamento e tratamento são utilizados principalmente para atingir dois objetivos principais: contenção hidráulica e tratamento da água subterrânea contaminada (Figura 2). A contenção hidráulica visa controlar o movimento da água contaminada, evitando a expansão da zona contaminada. O tratamento busca reduzir as concentrações de contaminantes dissolvidos na água para cumprir padrões legais ou permitir o seu uso.

Embora esses objetivos possam ser distintos, muitas vezes os esforços de remediação buscam uma combinação de ambos, adaptando-se à viabilidade de restauração ou à necessidade de contenção.

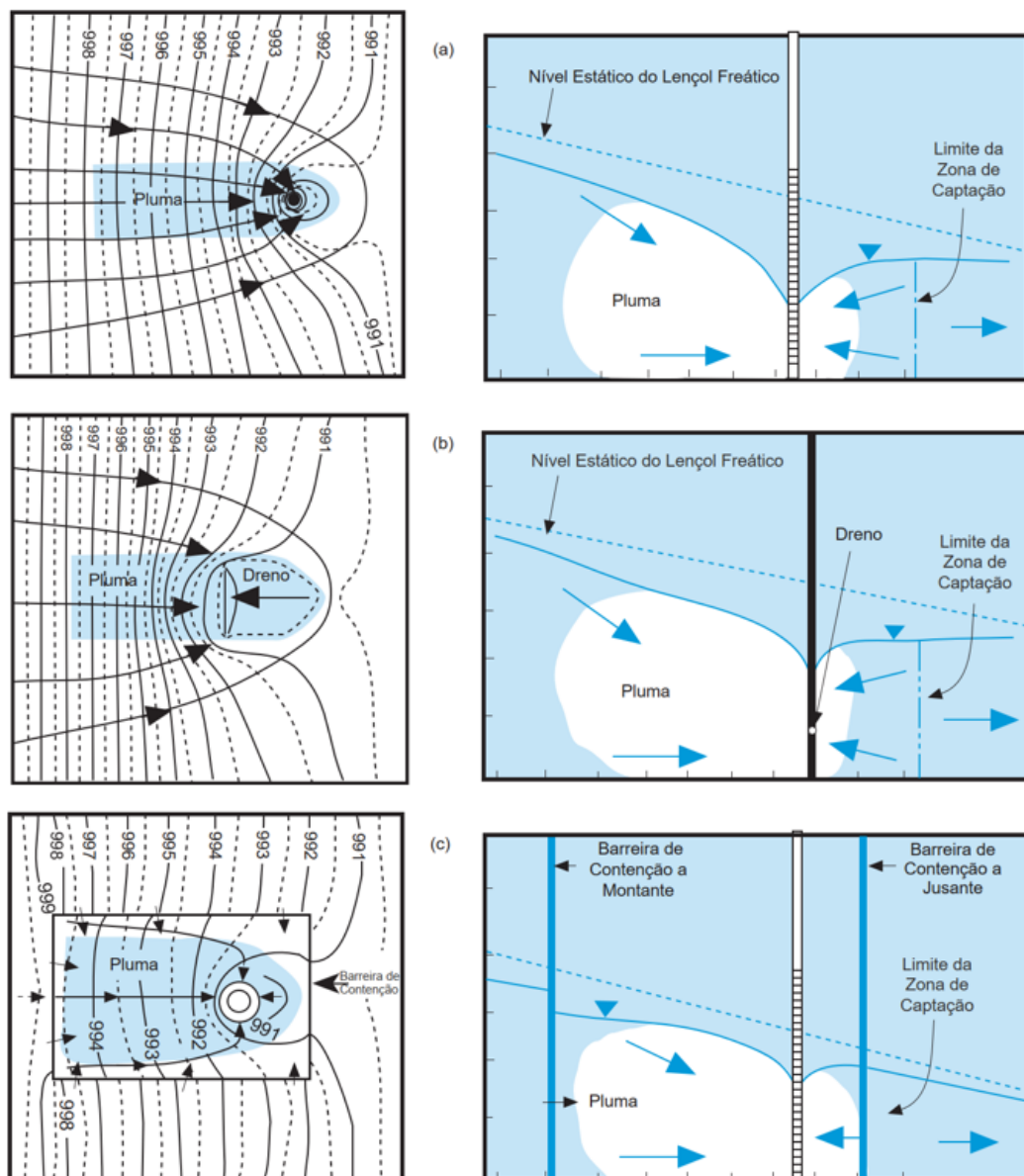


Figura 3 - Exemplos de contenção hidráulica em vista e seção transversal em um plano utilizando a tecnologia de bombeamento e tratamento: (a) poço de bombeamento, (b) dreno e (c) poço dentro de um sistema de barreira (APA, apud Cohen et al., 1994)

O tratamento da água subterrânea muitas vezes poderá incluir várias tecnologias usadas em sequência, essas tecnologias serão mais discutidas à frente nesse trabalho. Segundo FRTR (2020), dependendo da qualidade da água pós-tratamento, essa pode ser reinjetada no aquífero, encaminhada para estações de tratamento ou lançada em um corpo receptor de água superficial, diretamente ou por meio de um sistema de drenagem pluvial, mediante a concordância do órgão ambiental, ou mesmo reutilizada de forma benéfica (por exemplo, como água de irrigação), (FRTR, 2020).

Truex *et al.* (2015), destaca que esse processo em grande escala transfere contaminantes dissolvidos na água subterrânea do subsolo para dispositivos de controle ambiental localizados acima do solo. Uma tecnologia correspondente a esse processo, destinada à extração de contaminantes na fase de vapor de solos na zona não saturada (zona vadosa) é conhecida como extração de vapores do solo.

Essa transferência de massa, que envolve o fluxo de fluidos através do meio poroso do subsolo, também incorpora processos de transferência de massa relacionados às características do meio poroso, às fases presentes, às propriedades dos contaminantes e aos padrões de fluxo derivados da distribuição dos materiais geológicos no subsolo (EPA, 1996).

Truex *et al.* (2017) frisa que o bombeamento envolve a extração de água subterrânea de um aquífero como um mecanismo tanto para remoção de massa de contaminantes, quanto para manipulação do gradiente hidráulico. A parte "tratamento" acima do solo onde foi realizada a operação, geralmente envolve um projeto de engenharia para atingir um objetivo de tratamento específico.

Um fator comum para a eficácia na extração de contaminantes do subsolo é a transferência de massa entre fases, como a transferência entre líquidos não aquosos (LNAPL) ou materiais sólidos e a água subterrânea. Outro fator crucial é a variação nas características do fluxo da água subterrânea, que resulta da estratificação geológica e da heterogeneidade nos valores das propriedades hidrogeológicas dos materiais do subsolo.

Zonas com alta permeabilidade, como materiais arenosos, são mais fáceis de serem descontaminadas, resultando em uma remoção mais eficiente de contaminantes. Por outro lado, materiais de baixa permeabilidade podem ter um fluxo advectivo limitado, tornando a transferência de massa do contaminante para a água subterrânea restrita a processos de difusão, além dos processos de transferência de massa entre fases. Portanto, a concepção e a operação do sistema de poços de extração, destinados a capturar e remover contaminantes na fase

dissolvida, são de importância primordial para a tecnologia do Bombeamento e Tratamento (EPA, 1994).

Ao considerar a aplicação de um bombeamento e tratamento para remediação ambiental, é crucial iniciar com um desenvolvimento completo do Modelo Conceitual da Área (MCA), ou "up-to-date conceptual site model (CSM)" (FRTR, 2020). Este modelo fornecerá uma compreensão abrangente das características do aquífero, dos contaminantes e das condições locais antes de iniciar o projeto. Já EPA (1996) destaca que é importante fazer questionamentos fundamentais, como determinar se o bombeamento e tratamento são uma abordagem apropriada para a remediação, antecipar fenômenos como "*tailing*" e "*rebound*", enfrentar desafios de contenção hidráulica eficaz, otimizar o design e operação do sistema e considerar variações e alternativas aos métodos convencionais quando necessário. Integrando esses aspectos, um projeto bem-sucedido de bombeamento e tratamento deve começar com uma compreensão completa do local e dos desafios específicos que ele apresenta, permitindo assim a implementação de estratégias eficazes de remediação.

Alguns dados específicos do local, que visam principalmente levantar as características do aquífero e dos contaminantes com quais está sendo desenvolvido o projeto são de suma importância, sendo:

Tipo, área e volume do contaminante, ou seja, a área e profundidade da pluma do contaminante e seu volume devem ser determinados antes de projetar o sistema.

Uma análise da hidroestratigrafia deve ser realizada para determinar zonas de interesse apropriadas com base no padrão de fluxo de água subterrânea e distribuição de contaminantes, caminhos de migração e caminhos preferenciais, bem como critérios regulatórios aplicáveis.

Em Poços verticais, poços horizontais, valas ou galerias devem ser determinadas a localização, quantidade, profundidade, diâmetro, tamanho da perfuração, tipo e classificação do filtro, materiais de construção e compatibilidade com os contaminantes do local ou outras tecnologias de tratamento em uso (por exemplo, aquecimento do solo por resistência elétrica).

Equipamentos do Sistema de tratamento, como aeradores e/ou filtros de carvão ativado granular e projeto de tubulações, instrumentação e sistemas de controle, incluindo controlador lógico programável para operação do sistema.

Estruturas do sistema de tratamento, como estrutura fixa de alvenaria ou reboque que abrigará os equipamentos do sistema e componentes estruturais, mecânicos e elétricos associados.

Localização e autorização de um ponto de descarga para a água tratada. Por exemplo, o tratamento para alguns contaminantes pode ser menos agressivo se puder ser assegurado um tratamento adicional em uma Estação de Tratamento que possa receber o material.

Uma rede de poços de monitoramento para verificar o desempenho do sistema em relação aos objetivos de contenção e/ou redução de massa de contaminantes.

Pontos de amostragem a montante, intermediário e a jusante do sistema para avaliar a eficiência e a conformidade com os requisitos aplicáveis.

4.4.1 Quando o Bombeamento e Tratamento é uma técnica aplicável

O planejamento do sistema de bombeamento requer um entendimento aprofundado das condições hidrodinâmicas e hidrogeológicas do ambiente, do comportamento dos poluentes, e envolve a definição do número e localização dos poços de bombeamento, além do dimensionamento da pluma e volume de águas a serem tratadas. É crucial também avaliar o tipo e concentração dos poluentes na água (FRTR, 2020).

Entre as desvantagens desse método, destaca-se a diminuição da capacidade de remoção dos poluentes químicos ao longo do tempo. Após o processo de bombeamento, pode ocorrer ressurgência de águas contaminadas devido a processos de difusão e dessorção (APEMETA, 2015).

A aplicação do método de bombeamento e tratamento pode ocorrer sem restrições em situações em que as condições hidrogeológicas e o transporte de contaminantes nas águas subterrâneas forem favoráveis. Contudo, em casos em que o subsolo apresenta baixa permeabilidade e o transporte de contaminantes é significativamente retardado devido às características intrínsecas dos materiais presentes no subsolo, o método pode encontrar limitações em sua aplicação (CETESB, 2001).

Segundo Silva (2020), a operação e manutenção de sistemas de bombeamento e tratamento podem representar elevados custos, pois envolvem a operação contínua ao longo de muito tempo, podendo chegar a anos, com poços operando 24 horas por dia, 7 dias por semana. Além disso, é necessário realizar amostragem e análises periódicas da água. Essa prática visa determinar as concentrações do contaminante na água não tratada (originada do poço de extração), bem como as concentrações dos contaminantes na água tratada e no ar, garantindo que os limites estabelecidos sejam atendidos antes do descarte final. Os resultados dessas

amostragens auxiliam na avaliação do volume de contaminante removido, com base nas concentrações da água subterrânea e nas taxas de bombeamento praticadas (CETESB, 2001).

Embora a eficiência da maioria dos sistemas de bombeamento e tratamento seja inicialmente elevada, removendo volumes significativos de contaminantes do aquífero afetado, ao longo do tempo de operação, as concentrações tendem a se estabilizar ou a diminuir em uma taxa muito baixa, aproximando-se assintoticamente de um valor específico que pode ser maior, igual ou inferior às concentrações-alvo, geralmente na faixa de partes por bilhão (ppb) (CETESB, 2001). Esse fenômeno ocorre devido às taxas de retardamento que afetam praticamente todos os contaminantes, causadas pela adsorção, dispersão no aquífero devido a diferenças nas velocidades da água subterrânea, e difusão dos contaminantes de zonas de alta para baixa concentração, além das características heterogêneas do aquífero impactado, principalmente materiais de granulometria fina (CETESB, 2001).

Para Nobre, M. M. e Nobre, R. C. M. (2003), as falhas nos sistemas geralmente são resultantes de uma caracterização preliminar insuficiente ou inadequada do problema. No entanto, sistemas bem planejados e executados de bombeamento de águas subterrâneas podem controlar a migração da pluma para regiões mais afastadas, possibilitando a remoção de fontes secundárias de contaminação. A Tabela 1 apresenta as principais vantagens e desvantagens dos sistemas de Bombeamento e Tratamento.

Tabela 1 - Vantagens e Desvantagens do Bombeamento e Tratamento

Vantagens	Desvantagens
Flexibilidade do Projeto: os poços podem ser adicionados posteriormente	Se a condutividade hidráulica é baixa e/ou a geologia local é complexa e heterogênea, a tecnologia pode não ser a mais adequada para a descontaminação do aquífero
Pode-se usar água tratada para recarga do aquífero	Custos elevados com operação, manutenção e com sistema de monitoramento
Os custos para sua implantação são menores do que para a implantação de barreiras físicas	Requer uso de sofisticados modelos matemáticos para avaliar a sua eficiência
Pode-se utilizar os poços de extração para o monitoramento da tecnologia	Requer tempos longos para atingir níveis de contaminação aceitáveis (<i>cleanup</i>)
A água bombeada pode ser tratada por métodos já disponíveis para tratamento de efluentes	Geralmente a tecnologia só é eficiente quando utilizada em conjunto com outras
Evita a migração das plumas de contaminação dissolvidas na água subterrânea para áreas de abastecimento potável em rios, lagos etc.	Geralmente usada para aquíferos altamente contaminados, pois a tecnologia possui menor eficiência em concentrações menores

Fonte: SILVA, 2020, apud TAVARES, 2013

4.4.2 Problemas com “Rebound” e “Tailing” e como antecipá-los

Segundo a EPA (1996) os fenômenos de "tailing" e "rebound" são frequentemente observados em projetos de bombeamento e tratamento. "Tailing" refere-se à taxa progressivamente mais lenta de diminuição na concentração de contaminantes dissolvidos com a operação contínua de um sistema de bombeamento e tratamento, ou seja, é uma cauda ou prolongamento da concentração dos contaminantes que não diminui tão rapidamente quanto o esperado após a implementação de medidas de remediação. Já o "Rebound" é o aumento bastante rápido na concentração de contaminantes que pode ocorrer após a interrupção do bombeamento, ou mesmo um aumento na concentração de contaminantes em período posterior, que pode estar associado por diversos fatores, como a liberação de contaminantes que estavam adsorvidos em zonas de armazenamento ou mesmo a migração de contaminantes de áreas circunvizinha, ou mesmo pela estabilização da concentração de contaminantes em um nível um pouco mais baixo. A figura 4 abaixo, demonstra como ocorrem os dois efeitos.

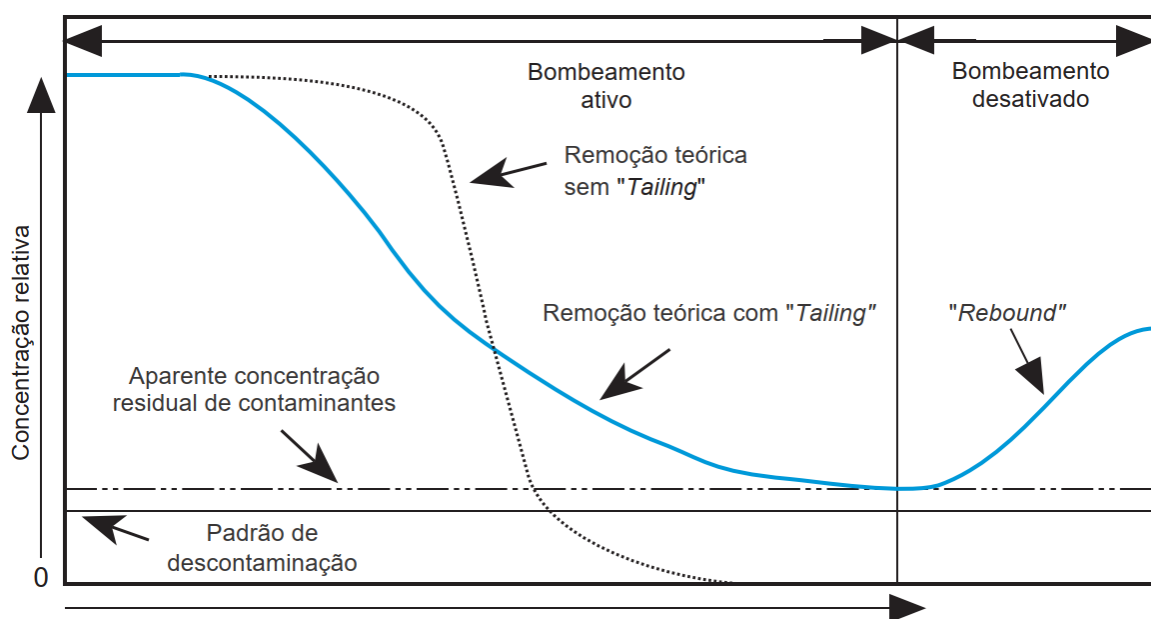


Figura 4 - Concentração em relação a duração ou volume de bombeamento, mostrando efeitos de “tailing”, “rebound” e recuperação (APA, apud Cohen et al., 1994).

4.4.2.1 Efeitos de “Tailing” e “Rebound” após a remediação

O "tailing" apresenta duas dificuldades principais para a recuperação da qualidade da água subterrânea:

- Tempos de tratamento mais longos. Sem o "tailing", teoricamente, os contaminantes poderiam ser removidos bombeando um volume de água equivalente ao volume da pluma de contaminantes. No entanto, o efeito de "tailing" aumenta significativamente o tempo que os

sistemas de bombeamento e tratamento precisam operar para alcançar os objetivos de restauração da água subterrânea. Esse fato, pode fazer com que o bombeamento precise ser conduzido por centenas de anos em vez de dezenas de anos.

- Concentrações residuais acima da referência de qualidade. Quando ocorre o "*tailing*", inicialmente, a redução na taxa de concentrações de contaminantes é bastante rápida, seguida por uma redução mais gradual que eventualmente se estabiliza em um nível aparente de concentração residual, porém, acima da referência de qualidade.

Já o "*rebound*" é mais problemático quando um sistema de bombeamento e tratamento atinge os níveis de referência de qualidade, dando uma sensação de descontaminação da água, porém com o passar do tempo as concentrações aumentam para um nível que excede o padrão.

4.4.2.2 Fatores Contribuintes

Para EPA (1996) o grau em que "*tailing*" e "*rebound*" reduzem a eficiência dos esforços de remediação em um *site*, são em função das características físicas e químicas do contaminante sendo tratado, dos sólidos subsuperficiais e da água subterrânea, outros fatores também contribuem para a ocorrência dos dois fenômenos, os quais serão discutidos a seguir.

- **Líquidos não aquosos**

Embora os *LNAPLs* (*Light Nonaqueous Phase Liquid*) e *DNAPLs* (*Dense Nonaqueous Phase Liquid*) imiscíveis tendam a ser relativamente insolúveis em água, por muitas vezes são suficientemente solúveis para causar concentrações na água subterrânea que excedem os padrões legais aceitáveis (PLA). Consequentemente, a presença de *NAPLs* residuais e acumulados continuarão a contaminar a água subterrânea que entra em contato suficiente para dissolver pequenas quantidades da superfície do *NAPL* durante o processo de bombeamento.

Quando a água subterrânea está se movendo lentamente, as concentrações de contaminantes podem se aproximar do limite de solubilidade do *NAPL*. Embora os sistemas de bombeamento e tratamento aumentem a velocidade da água subterrânea, causando uma diminuição inicial na concentração, a redução na concentração posteriormente se estabilizará até que a taxa de dissolução do *NAPL* esteja em equilíbrio com a velocidade da água subterrânea bombeada. Se o bombeamento parar, a velocidade da água subterrânea diminui e as concentrações podem ter um aumento rápido no início (*rebound*) e, em seguida, atingir gradualmente o equilíbrio (EPA, 1996).

- **Dessorção do Contaminante**

O deslocamento de muitos contaminantes orgânicos e inorgânicos na água subterrânea é desacelerado por meio de processos de sorção, nos quais parte do contaminante dissolvido adere a superfícies sólidas. A quantidade de contaminante sorvido é influenciada pela concentração, com a sorção aumentando à medida que as concentrações se elevam, considerando a capacidade de sorção dos materiais subsuperficiais.

Os contaminantes sorvidos têm a tendência de se acumular em matéria orgânica e em superfícies de óxidos minerais de tamanho argila. Vale ressaltar que a sorção é um processo reversível. Portanto, à medida que as concentrações de contaminantes dissolvidos diminuem devido à operação do sistema de bombeamento e tratamento, contaminantes previamente sorvidos nos meios subsuperficiais podem se desprender da matriz e migrar para a água subterrânea.

As concentrações resultantes da sorção e dessorção exibem uma relação com a velocidade da água subterrânea e o tempo de contato, assemelhando-se aos padrões observados nos *NAPLs*. Isso resulta no atraso das concentrações de contaminantes durante a fase de bombeamento, bem como na ocorrência do fenômeno de "*rebound*" após a interrupção do bombeamento (EPA, 1996).

- **Matriz de Difusão**

À medida que os contaminantes se movem por vias relativamente permeáveis em meios heterogêneos, os gradientes de concentração induzem a difusão da massa de contaminantes para os meios menos permeáveis (EPA, 1996, apud Gillham *et al.*, 1984).

A difusão na matriz tem maior probabilidade de ocorrer com contaminantes dissolvidos que não são fortemente retidos, como ânions inorgânicos e alguns produtos químicos orgânicos. Durante uma operação de bombeamento e tratamento, as concentrações de contaminantes dissolvidos nas zonas relativamente permeáveis diminuem devido ao fluxo advectivo, causando uma inversão no gradiente de concentração inicial e uma difusão lenta de contaminantes dos meios de baixa para alta permeabilidade. A Figura 5, derivada de cálculos teóricos de concentrações de TCE em camadas de argila de diversas espessuras, destaca que a difusão é um processo gradual. Por exemplo, a figura sugere que o tempo necessário para reduzir a concentração de TCE para 10% da concentração inicial seria de 6 anos para uma camada de argila com 0,3 m de espessura, 25 anos para uma camada de argila com 0,6 m de espessura e 100 anos para uma camada de argila com 1,21 m de espessura. A importância da difusão na

matriz cresce à medida que o intervalo de tempo entre a contaminação e a ação de remediação se prolonga. Em aquíferos heterogêneos, é razoável esperar contribuições da difusão na matriz para fenômenos de “*tailing*” e recuperação, sempre que os contaminantes têm se difundido em materiais menos permeáveis ao longo do tempo (EPA, 1996).

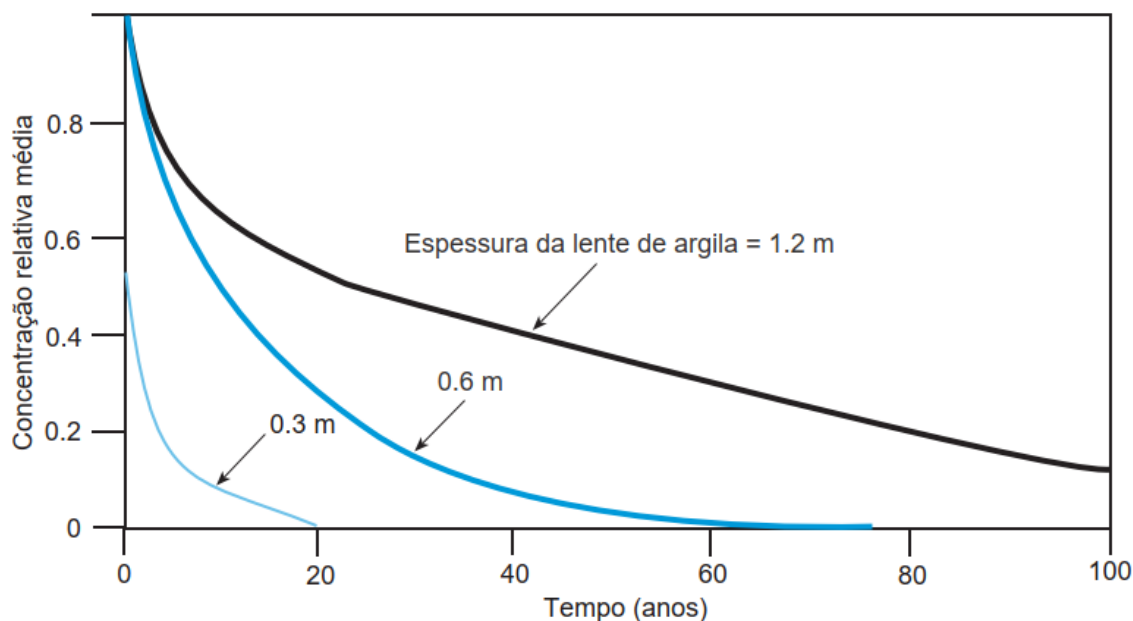


Figura 5 - Alterações nas médias relativas de concentrações de tricloroetileno (TCE) em camadas de argila de diferentes espessuras em função do tempo (APA, 1996., apud NRC, 1994).

- **Variação na Velocidade da Água Subterrânea**

O “*tailing*” e o “*rebound*” também surgem devido às flutuações nos tempos de percurso relacionados aos diversos caminhos seguidos pelos contaminantes em direção a um poço de bombeamento. A água subterrânea nas extremidades de uma área de captação criada pelo poço de bombeamento percorre uma distância maior sob um gradiente hidráulico mais baixo em comparação com a água subterrânea próxima ao centro da zona de bombeamento. Adicionalmente, o tempo que o contaminante leva para chegar ao poço varia dependendo da condutividade hidráulica em aquíferos heterogêneos (EPA, 1996).

4.4.2.3 Avaliação da Significância de *Tailing* e *Rebound* em um Site

Determinar metas realistas para um sistema de bombeamento e tratamento demanda uma caracterização aprofundada do local, visando compreender a complexidade do ambiente hidrogeológico e a distribuição subsuperficial dos contaminantes. Essas informações habilitam o Responsável Técnico a avaliar se as condições no local podem resultar em fenômenos de *tailing* e *rebound*, permitindo, assim, a avaliação da extensão com que essas condições podem

prolongar o tempo necessário para atingir os padrões de descontaminação baseados na saúde humana (EPA, 1996).

A avaliação das características de sorção dos contaminantes pode ser conduzida por meio de ensaios de sorção em lote utilizando materiais aquíferos (EPA, 1996 apud ROY *et al.*, 1992). Entretanto, a heterogeneidade do aquífero pode complicar a interpretação dos resultados desses ensaios. No caso de compostos orgânicos, os efeitos potenciais da sorção podem ser analisados com base em uma revisão da literatura sobre as propriedades dos contaminantes, além de dados específicos do local sobre o carbono orgânico presente nos materiais aquíferos (EPA, 1996 apud PIWONI e KEELY, 1990). Softwares computacionais geoquímicos oferecem uma ferramenta para avaliar o potencial de ocorrência de fenômenos de *tailing* e *rebound* decorrentes de reações de dissolução por precipitação (EPA, 1996).

Com base no exposto, a prioridade é a avaliação da eficácia de remoção ou contenção do produto livre em locais contaminados por *NAPL*, paralelamente a análise da extensão da contaminação residual por *NAPL*. Para *DNAPLs*, a saturação residual pode abranger toda a zona insaturada e saturada. Normalmente, para *LNAPLs*, a contaminação residual concentra-se principalmente na zona vadosa, mas pode estender-se até a profundidade do lençol freático sazonalmente mais baixo, ao passo que o bombeamento destinado a remover o produto livre de *LNAPL* pode induzir o deslocamento do *NAPL* residual para camadas mais profundas da zona saturada. Dessa forma, ao remover *LNAPL* de produto livre que flutua sobre o lençol freático, é imperativo adotar medidas para prevenir ou minimizar o deslocamento do *NAPL* residual para áreas mais profundas da zona saturada (Figura 6). EPA (1996) e Berglund e Cvetkovic (1995) analisaram a importância relativa do grau de heterogeneidade do aquífero na condutividade hidráulica e nos processos de transferência de massa, concluindo que a taxa de transferência de massa e o grau de sorção dos contaminantes nos sólidos são os parâmetros mais cruciais que afetam o tempo estimado para a descontaminação do local.

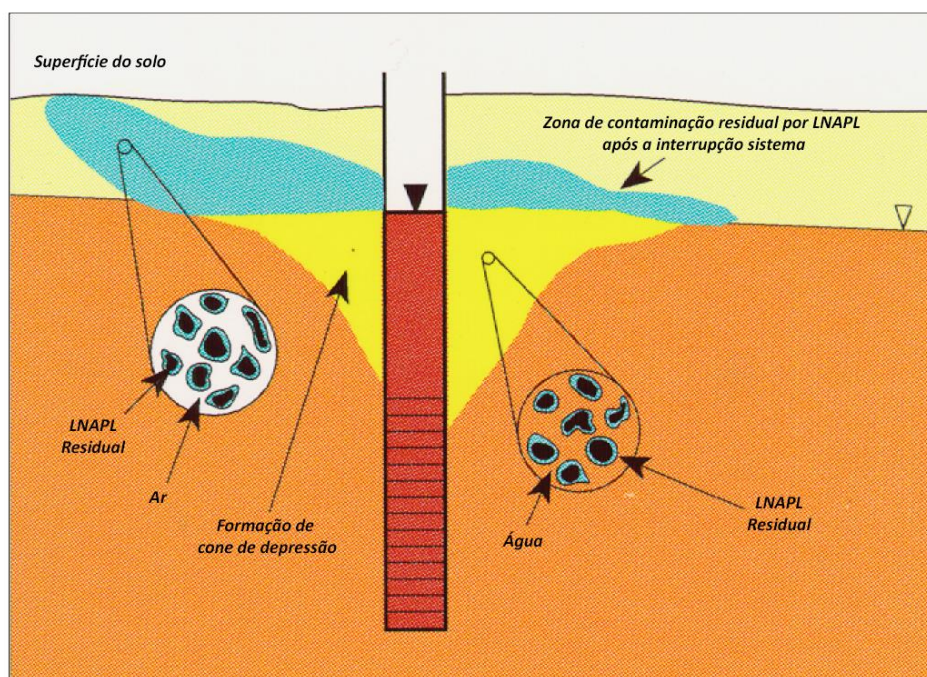


Figura 6 - Zona residual criada na antiga área de depressão do cone, após desligar o sistema de bombeamento do (EPA, 1996 apud Gorelick et al., 1993)

4.4.3 Bombeamento e tratamento para a redução da massa de contaminantes

A utilização de sistemas de bombeamento e tratamento focados na redução da massa de contaminantes em pluma de contaminantes foram amplamente instalados nas décadas de 1980 e 1990 (NRC, 1994); No entanto, dados de desempenho ao longo das últimas décadas mostraram que a tecnologia de bombeamento e tratamento geralmente não é uma boa escolha para esse propósito, exceto em casos raros (NRC, 1994; TRAVIS e DOTY, 1990). Devido à tendência da maioria dos contaminantes em ficarem adsorvidos aos tipos de solo heterogêneos que compõem um aquífero, a massa de contaminante recuperada por um sistema de bombeamento e tratamento pode se tornar rapidamente limitada pelo lento processo de difusão de contaminantes do solo para a água subterrânea.

Quando aplicado em solos permeáveis em plumas em fase dissolvida, o bombeamento e tratamento pode efetivamente reduzir o tamanho da pluma. Uma redução significativa na massa de contaminante também pode ser alcançada para unidades de aquífero mais homogêneas e transmissíveis (ou seja, massa de contaminante conectada pela similaridade do meio). Especialmente quando a extração e a injeção são aplicadas para aumentar substancialmente “flushing” no aquífero, a resposta pode ser relativamente rápida. Essas reduções podem diminuir significativamente os riscos de exposição. Além disso, a extração e injeção podem reduzir as concentrações em áreas fonte que contêm NAPL residual em um período reduzido,

embora a eficiência econômica dependa muito da situação a qual a remediação está sendo empregada (FRTR, 2020).

O bombeamento e tratamento podem ser usados para melhorar a eficácia na remoção de NAPL na área fonte. Além disso, a extração multifásica, uma forma especializada de bombeamento e tratamento aprimorado que aumenta a recuperação de LNAPL, promove a biodegradação de hidrocarbonetos na zona não saturada e recupera o contaminante na fase de vapor do solo contaminado, minimizando a extração de água subterrânea.

O principal objetivo da aplicação de sistemas de bombeamento e tratamento para o controle da fonte é interceptar e capturar a contaminação na fase dissolvida da zona saturada na área fonte. Com essa medida de controle da fonte, a pluma da fase dissolvida a jusante será interrompida a partir da área fonte. A captura dos contaminantes na área fonte permitirá que a pluma a jusante diminua (PNNL, 2015).

A EPA (1996) versa sobre a utilização de outros métodos juntamente com o bombeamento e tratamento. Por exemplo, a associação com uma contenção hidráulica, como uma parede (barreira) pode se tornar um requisito fundamental nos resultados obtidos no processo de tratamento, especialmente em contextos de restauração de aquíferos para os valores referência de qualidade. Em casos específicos como no caso da presença de NAPL, a contenção através de barreiras hidráulicas pode ser primordial na retenção da fase residual do contaminante. A eficácia da contenção hidráulica, quando se utiliza poços de bombeamento, depende da criação cuidadosa de zonas de captura horizontais e verticais, dirigindo toda a água subterrânea contaminada para os poços ou outras barreiras hidráulicas. A anisotropia do aquífero deve ser considerada, pois a negligência desse fator pode gerar limitações na capacidade de remoção dos contaminantes ou mesmo não ser suficiente para estabelecer zonas de captura, o que pode resultar na fuga de contaminantes desses sistemas. Além disso, zonas de estagnação, provenientes das operações de bombeamento ou do uso de poços de injeção, têm o potencial de diminuir a eficácia dos esforços de descontaminação do aquífero.

A figura 7 mostra uma representação de como é a operação de uma barreira hidráulica juntamente com um bombeamento e tratamento.

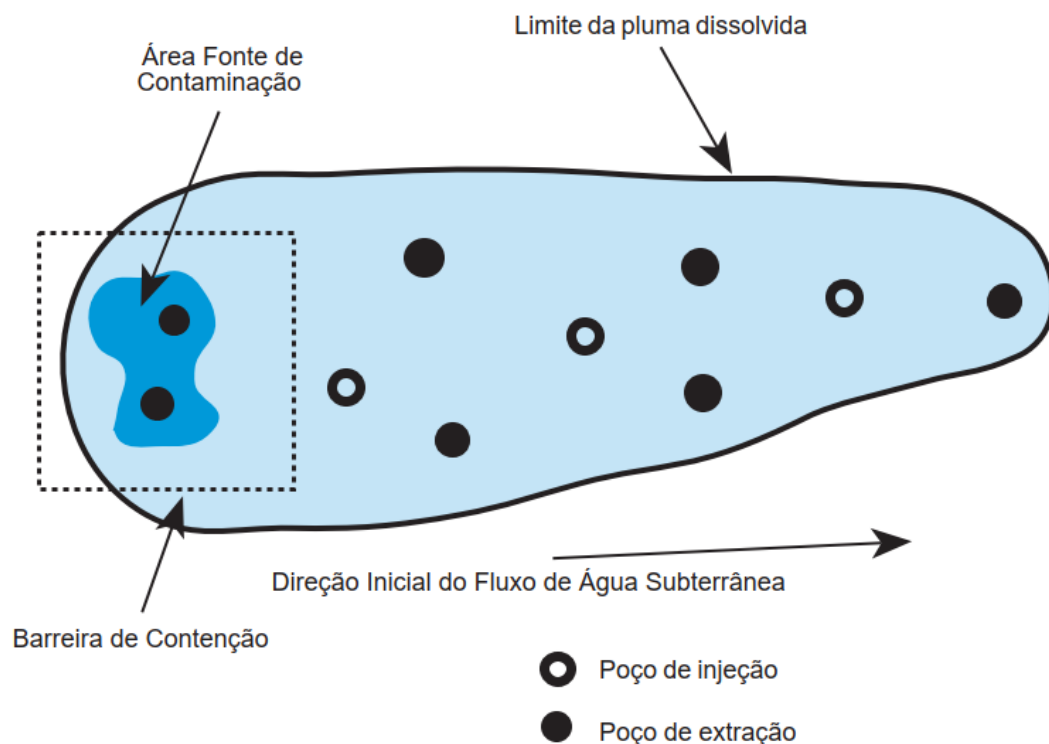


Figura 7 – Representação de uma estratégia mista de contenção. Um sistema de bombeamento e tratamento é utilizado com barreira para conter a área fonte da contaminação da água subterrânea, posteriormente coletar e tratar a pluma de contaminantes dissolvidos (Cohen et al., 1994).

Alguns contaminantes específicos como os compostos BTEX, devido à sua natureza moderadamente hidrofóbica, tendem a ser adsorvidos no material geológico, resultando em uma fonte contínua de contaminação. Essa característica torna desafiadora a remoção completa desses compostos por meio do bombeamento. Essa dificuldade é um fator que torna a tecnologia de bombeamento e tratamento impraticável para a remoção eficaz da contaminação residual, sendo economicamente inviável quando utilizada de forma isolada, por isso a necessidade de se utilizar outros métodos em associação conforme destacado por SCHENK (2004).

4.5 Tratamento da Água Subterrânea/NAPL Extraída

O tratamento de água subterrânea contaminada, conforme mencionado pela FRTR (2020), é influenciado por vários fatores, incluindo o tipo de contaminante, concentrações e taxas de extração. Em geral, quando se trata de água subterrânea e NAPL, a etapa inicial costuma envolver a utilização de um separador óleo/água ou uma tecnologia equivalente.

O NAPL recuperado é destinado ao armazenamento ou transportado para outro local para tratamento, enquanto a água subterrânea passa por uma série de processos de tratamento,

como "*stripping*" de ar ou o uso de carvão ativado granular, buscando atender aos critérios regulatórios para descarte em sistemas de drenagem pluvial.

Um método específico, conforme descrito por Ferreira (2000), é o "*Air Stripping*". Este método consiste na extração de contaminantes orgânicos do solo ou da água subterrânea, empregando vácuo ou ar. A técnica combina métodos físicos de remoção e biodegradação, utilizando a injeção de ar abaixo do nível freático para transferir a fase aquosa para a fase vapor. O vapor é então coletado e tratado em unidades de carvão ativado granulado, oxidadores catalíticos ou catalisadores térmicos, frequentemente em conjunto com o bombeamento e tratamento na remediação de águas subterrâneas. Segundo Negrão (2002), o processo é caracterizado como não destrutivo, aumentando a área de contato dos compostos orgânicos voláteis com o ar durante a extração da água subterrânea contaminada. O tratamento pode ser realizado por meio de colunas de *stripping* ou tanques de aeração. O modelo típico de *air stripper* de coluna envolve um jato de água contaminada no topo, distribuído sobre material de enchimento, com um ventilador forçando o ar no sentido contrário ao escoamento da água. Em relação aos tanques de aeração, estes removem compostos voláteis através da introdução de bolhas de ar na água contaminada, garantindo um contato eficiente entre água e ar. Ambos os métodos podem incorporar equipamentos adicionais para otimizar a eficiência e segurança do sistema.

4.6 Monitoramento da Restauração do Aquífero

Para EPA (1996) o monitoramento da restauração do aquífero compreende três elementos principais:

- **Coleta de Água Subterrânea:**

Coleta de água subterrânea de todos os poços de extração e observação principalmente nos que estão dentro da pluma de contaminantes para interpretar o progresso da descontaminação.

Parâmetros analisados, incluindo substâncias químicas de interesse, produtos que afetam o sistema de tratamento (como ferro), e indicadores de outros processos (como oxigênio dissolvido, dióxido de carbono e produtos de biodegradação). Esses dados são cruciais para ajustar a operação eficiente dos poços (COHEN *et al.*, 1994).

- **Amostragem Periódica e Análise Química:**

Amostragem periódica e análise química de materiais do aquífero em locais representativos na zona de contaminação para medir a remoção de contaminantes não dissolvidos.

Análise regular da água bruta que entra e do efluente que sai do sistema de tratamento, para avaliar o desempenho, mudanças nas condições químicas da água bruta que podem influenciar a eficácia do tratamento, e tendências na concentração de contaminantes dissolvidos. A Figura 8 fornece uma visualização dessas concentrações durante os primeiros 6 anos de operação na planta de tratamento no *Superfund* da *Chem-Dyne* (COHEN *et al.*, 1994).

Os sistemas de bombeamento e tratamento exigem monitoramento interno, incluindo:

- Taxas de fluxo de entrada e saída, fluxo total e taxas de fluxo de cada poço.
- Concentrações de contaminantes na água de entrada, intermediária e saída.
- Levantamento sinótico do nível da água subterrânea para avaliar o gradiente hidráulico.
- Sensoriamento de produtos livres na água de saída, se aplicável.
- Monitoramento do nível da água nos tanques de processo, queda de pressão nos recipientes de tratamento e taxa de fluxo de ar nos *strippers*.
- Concentrações de contaminantes no sistema de tratamento de gases, incluindo entrada, intermediário e saída.

A coleta periódica de amostras de água subterrânea na rede de poços de monitoramento é necessária para demonstrar o desempenho contínuo do sistema e avaliar tendências de redução de concentração de contaminantes. O plano de monitoramento deve ser baseado em objetivos específicos de remediação do local, com métricas claras estabelecidas para facilitar a tomada de decisões e o gerenciamento adaptativo.

Essas métricas, devem estar sujeitas a avaliação contínua, podendo representar o alcance dos objetivos de remediação, a atingir alguma condição de estabilidade, ou um nível predefinido onde a atenuação natural ou uma tecnologia alternativa é capaz de alcançar os níveis de descontaminação em um prazo razoável. (COHEN *et al.*, 1994; ITRC, 2017).

Os dados de monitoramento são cruciais para otimizar a rede de poços de extração, melhorar a recuperação e manter a eficiência na remoção de massa e na operação da planta de tratamento. Níveis prematuros e assintóticos de remoção de massa podem indicar a necessidade de otimização dos poços de bombeamento e/ou dos processos de tratamento (COHEN *et al.*, 1994).

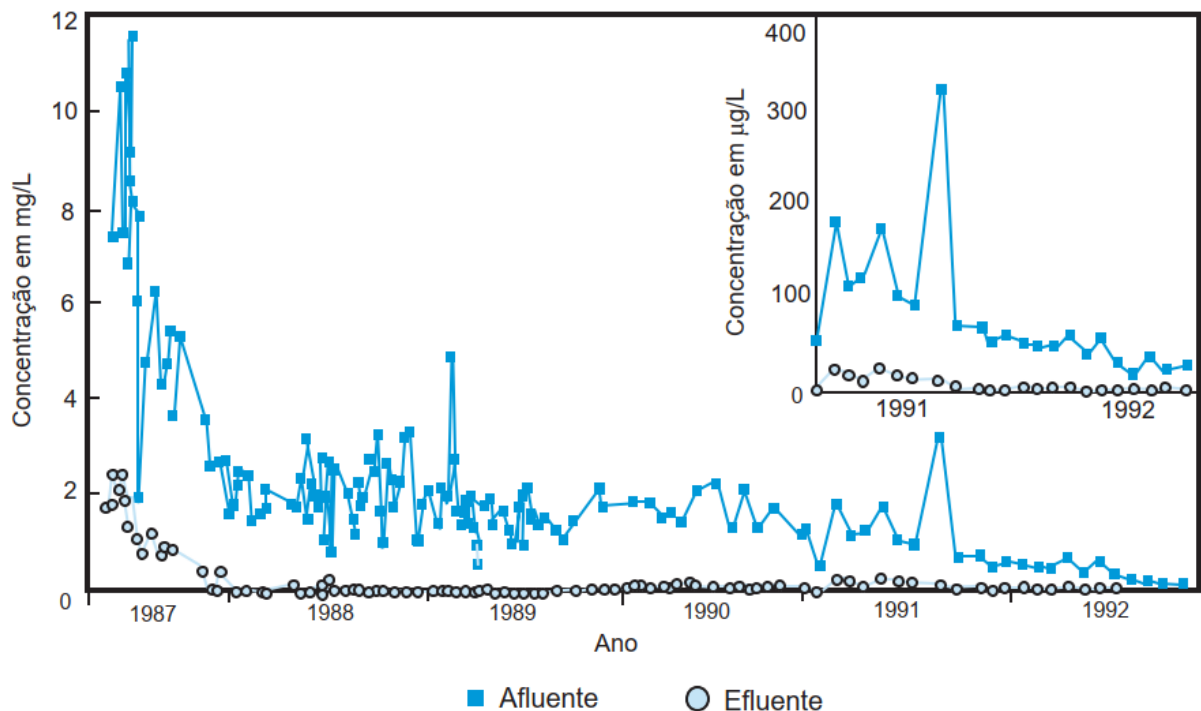


Figura 8 - Concentrações de VOC (Compostos Orgânicos Voláteis) afluentes e efluentes (mg/L) na planta de tratamento Chem-Dyne de 1987 a 1992 (Cohen et al., 1994, segundo Papadopoulos & Associates, 1993).

4.6.1 Avaliação do Sucesso na Restauração

EPA (1996) define seis estágios de remediação usando dados de qualidade da água de um único poço (Figura 9). A restauração da água subterrânea, conforme definido operacionalmente, é alcançada quando um padrão de descontaminação predefinido é atingido e mantido.

- Estágio 1. Avaliação do local para determinar a necessidade e as condições de uma ação de remediação; definir o padrão de descontaminação.
- Estágio 2. Operação do sistema de remediação, durante o qual as concentrações de contaminantes diminuem.
- Estágio 3. Conclusão do tratamento após as concentrações de contaminantes permanecerem abaixo do padrão de referência de qualidade por um período suficiente com base no conhecimento especializado do sistema de água subterrânea e dados coletados durante as operações de bombeamento e tratamento.
- Estágio 4. Monitoramento pós-encerramento dos níveis de água e concentrações de contaminantes para determinar quando o sistema de fluxo de água subterrânea é restabelecido.
- Estágio 5. Amostragem para avaliar o alcance do padrão de referência de qualidade. Se o padrão de tratamento não for atingido, o projeto de tratamento pode precisar ser avaliado e revisado.

- Estágio 6. Declaração de que o aquífero está limpo ou ainda contaminado com base nos dados coletados durante o Estágio 5.

Cohen *et al.* (1994) e a EPA (1992) abordam de maneira mais detalhada os tipos de técnicas estatísticas necessárias para analisar tendências de curto e longo prazo nas concentrações de contaminantes.

O indicador mais simples do progresso na remoção de contaminantes da água subterrânea é um gráfico dos estágios da remediação em relação a concentração de contaminantes do aquífero, medida pelas concentrações nos afluentes para o sistema de tratamento.

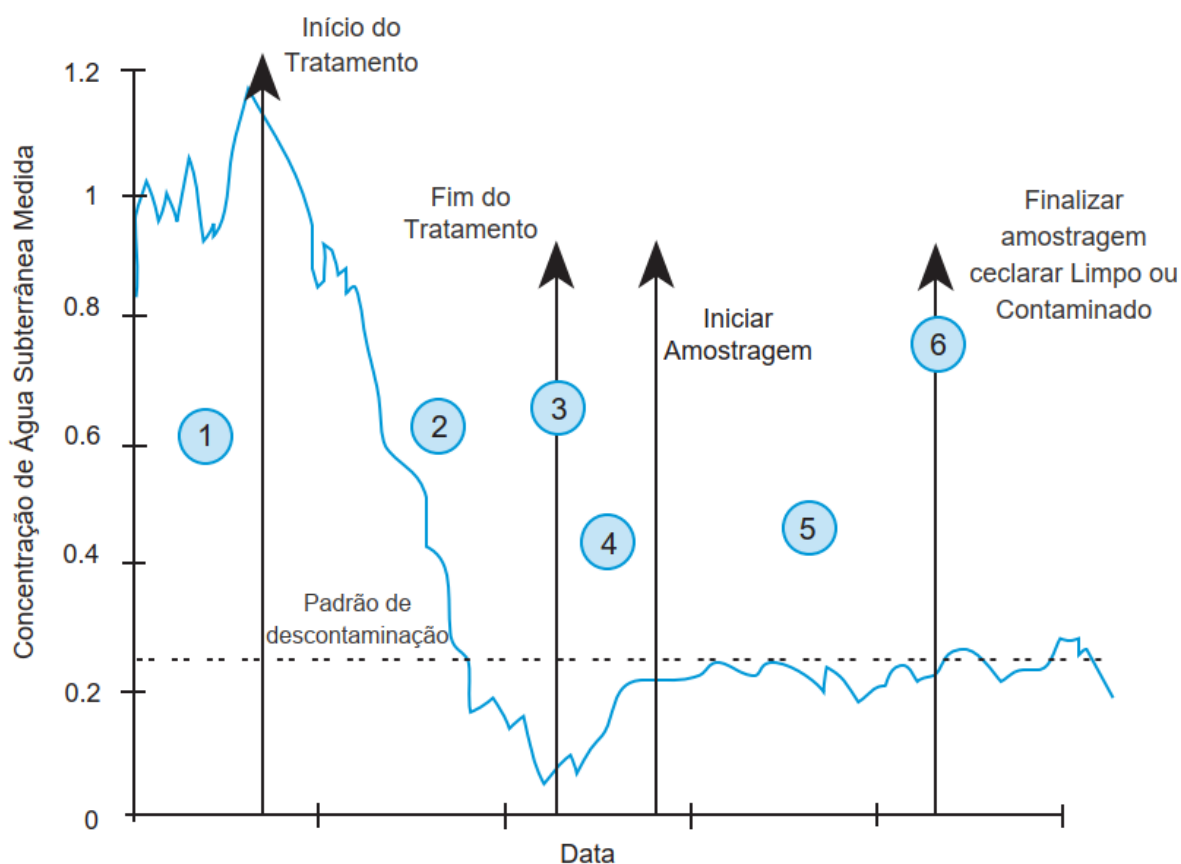


Figura 9 - Estágios de remediação em relação às concentrações de contaminantes de exemplo em um poço em um local de bombeamento e tratamento (EPA, 1992)."

5 ESTUDOS DE CASO

A seguir, serão apresentados três estudos de caso que exemplificam a aplicação das técnicas de bombeamento e tratamento. Cada estudo possui particularidades distintas, e o foco do relato é principalmente nos resultados alcançados por meio dessas abordagens, com ênfase no sucesso das operações e nos métodos de execução.

O Estudo de Caso 1 aborda uma contaminação por TCE (tricloroetileno), demonstrando como um modelo conceitual inadequado pode comprometer a eficácia da remediação. O Estudo de Caso 2 também trata de uma contaminação por TCE, destacando a integração do bombeamento e tratamento com outras técnicas complementares no processo de remediação.

Por fim, o Estudo de Caso 3 examina uma contaminação por hidrocarbonetos em um posto de gasolina, refletindo uma problemática comum aos postos de combustíveis no Brasil.

Estudo de Caso 1: Sistema de Tratamento e Bombeamento (P&T) no Aterro Sanitário 2 na base da The Joint Base Lewis McChord (JBLM).

Estudo apresentado no artigo “Performance Assessment of Pump-and-Treat Systems” (TRUEX, 2017).

Pontos chave

- Bombeamento e Tratamento em um aterro;
- Existia uma pluma resistente;
- A remediação era difícil, pois o gradiente hidráulico era muito complexo;
- Foi necessário outro tipo auxiliar de tratamento;
- Após otimização do bombeamento e tratamento a pluma começou a diminuir.

Após a instalação do sistema inicial de Bombeamento e Tratamento no Aterro 2 da JBLM, foram realizados monitoramentos contínuos nas águas subterrâneas, sendo que depois de um certo tempo, foi revelado que a fonte ainda estava ativa e liberando contaminantes, formando uma pluma, e diferente do que se pensava, não estava diminuindo. O projeto inicial de Bombeamento e Tratamento foi baseado em um Modelo Conceitual Inicial pré-estabelecido, considerando um gradiente hidráulico paralelo ao eixo de migração da pluma a jusante. Investigações anteriores foram conduzidas para mapear a fonte, sendo que foram conduzidas para apoiar as novas decisões em relação a aplicação da remediação, incluindo a redução da fonte no Aterro 2. Essas investigações revelaram a complexidade do gradiente hidráulico na área da fonte, com componentes de fluxo tanto diretamente ao longo do eixo da pluma quanto lateralmente, variando sazonalmente devido à drenagem para um córrego adjacente.

A JBLM utilizou essas informações para atualizar o Modelo Conceitual, especialmente considerando esses padrões de fluxo.

A contenção por bombeamento e tratamento ainda eram necessárias após as ações de redução da fonte (auxiliada por um tratamento térmico). Portanto, uma avaliação de desempenho do bombeamento e tratamento foi conduzida pela JBLM para avaliar a otimização do sistema à luz do Modelo Conceitual Atualizado.

Dois elementos do sistema de Bombeamento e Tratamento poderiam ser ajustados sem alterar o sistema de tratamento acima do solo: as localizações dos poços de extração e as taxas de fluxo. As simulações demonstraram que uma configuração em forma de "v" dos poços de extração e uma nova localização para a infiltração de água tratada efetivamente capturariam a área da fonte (conforme mostrado na Figura 10). Os dados coletados nos primeiros 5 anos de operação do bombeamento e tratamento indicaram que a pluma a jusante havia diminuído com a nova configuração do Bombeamento e tratamento (Figura 11). Este estudo de caso destaca a importância de atualizar o Modelo Conceitual quando os resultados não estão sendo satisfatórios, para identificação de alguma variável que não havia sido considerada.

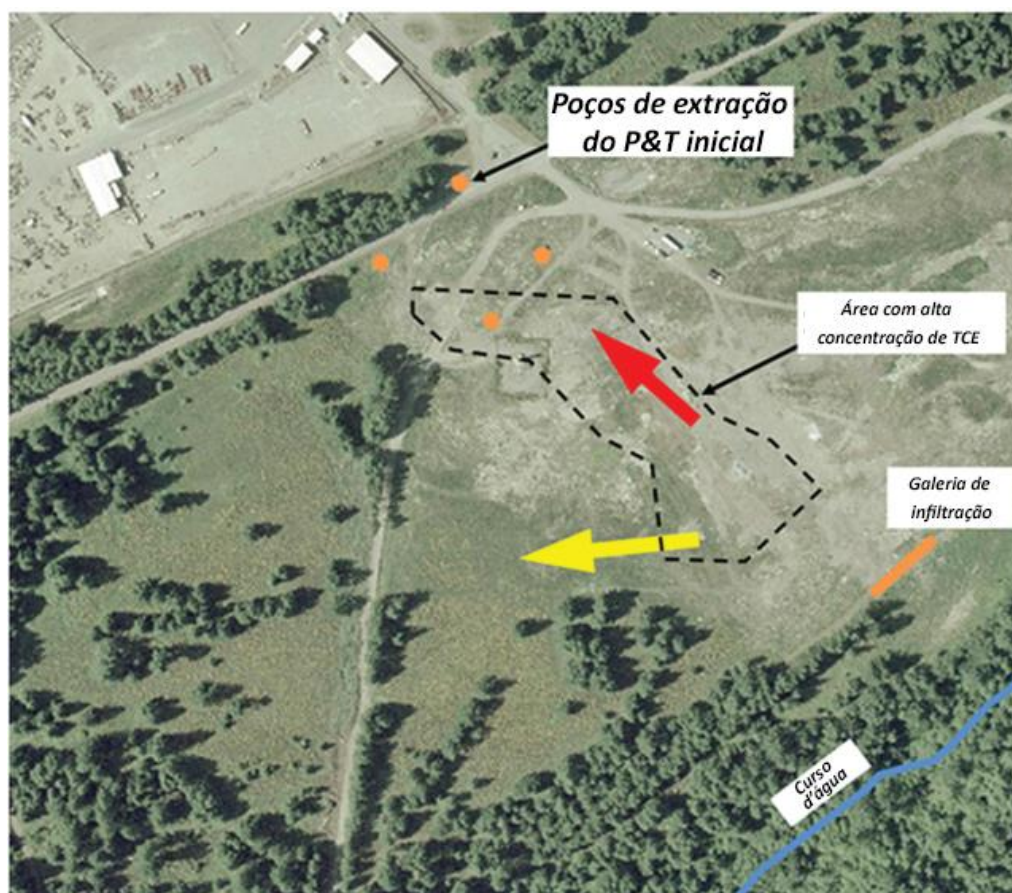


Figura 10 - Design inicial do sistema Bombeamento e tratamento do Aterro 2. A seta vermelha representa a direção do eixo da pluma e a direção do gradiente hidráulico no Modelo Conceitual Inicial. A seta amarela mostra o componente lateral do gradiente hidráulico.

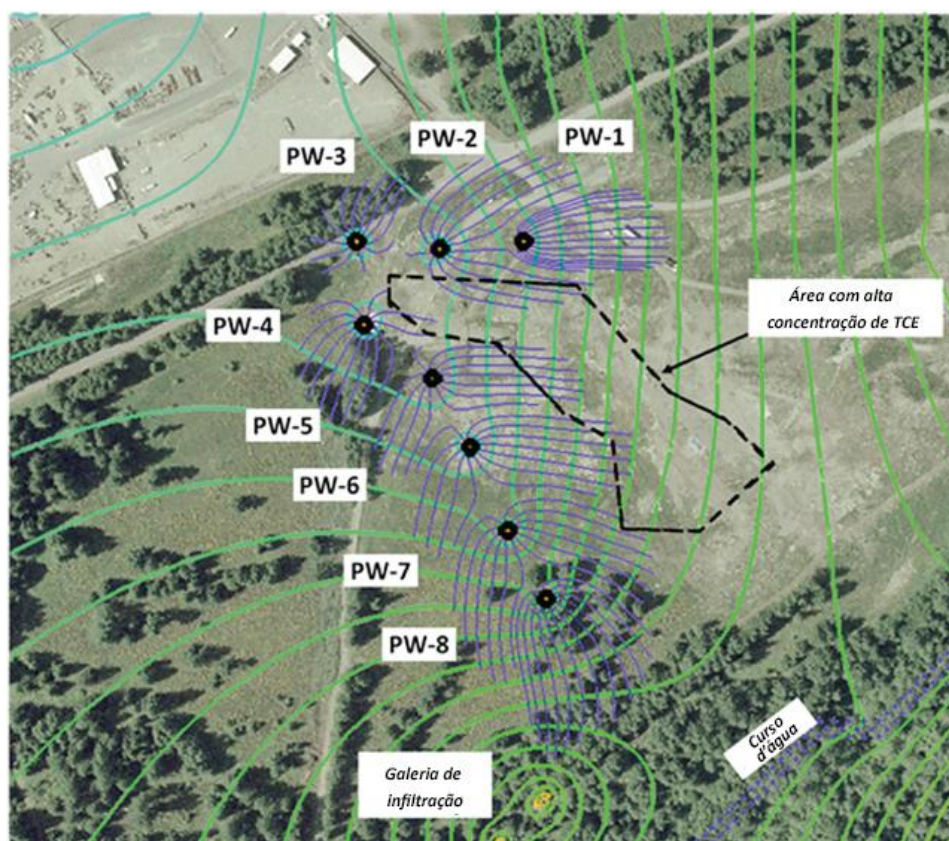


Figura 11 - Design otimizado do sistema de Bombeamento e Tratamento do Aterro 2 (os poços PW e a localização revisada da galeria de infiltração) e as linhas de caminho de captura de águas subterrâneas previstas em relação à fonte de contaminação, juntamente com a potenciometria local.

Estudo de caso 2 – Depósito do Exército de Tooele

Estudo apresentado no livro “*Performance Assessment for Pump-and-Treat Closure or Transition*” (TRUEX, 2015).

Pontos chave

- Transição de Bombeamento e Tratamento para ANM (Atenuação Natural Monitorada);
- A pluma diminuiu durante a aplicação do Bombeamento e Tratamento;
- A equipe do projeto antecipou que a pluma seria estável sem Bombeamento e Tratamento;
- O sistema de Bombeamento e Tratamento foi desligado e o monitoramento foi iniciado para verificar o desempenho da atenuação natural;
- O ANM está em andamento com algum tratamento nos *hotspots* sendo aplicado (*air sparging*) para reduzir o fluxo de contaminantes da fonte para partes da pluma;
- A ANM está em andamento com contingências estabelecidas caso ocorra expansão da pluma.

Na região do Depósito do Exército de *Tooele*, localizado em *Tooele, Utah*, foi identificada uma extensa contaminação do lençol freático com TCE (tetracloroetileno) e diversos outros solventes clorados durante os anos finais da década de 1980. A origem da contaminação remonta ao descarte de águas residuais industriais provenientes das operações de manutenção de equipamentos militares e munições no Depósito, iniciadas em 1942 e continuadas até o final dos anos 1980. Diversos métodos de descarte foram empregados ao longo dos anos, incluindo o depósito em aterros sem mantas ou revestimentos, valas e, posteriormente, em lagoas de resíduos industriais. A maior parte dessas atividades industriais foi encerrada no início dos anos 1990.

O processo de remediação do subsolo no Depósito foi conduzido sob licenciamento, descrito na *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA), com várias medidas sendo implementadas desde o início dos anos 1990. Um sistema de Bombeamento e Tratamento foi instalado em 1993, alcançando plena operacionalidade em 1994. Além disso, outras ações foram tomadas para controlar o fluxo de massa contaminante para o lençol freático, incluindo a cobertura das valas antigas, lagoas e áreas de depósito. Posteriormente, foi iniciada a extração de vapores do solo (EVS) para lidar com a contaminação na zona vadosa profunda, que apresenta mais de 91,44 metros de espessura em alguns locais.

O Depósito está localizado no Vale de *Tooele*, parte da bacia de drenagem do *Great Salt Lake*, e é predominantemente composto por depósitos aluviais de granulação grossa, provenientes das montanhas circundantes. Esses depósitos são intercalados com materiais de granulação mais fina, incluindo depósitos lacustres, e têm uma espessura total de mais de 182,88 metros. Em algumas áreas, elevações rochosas delimitadas por falhas de calcário e quartzito se aproximam da superfície, complicando o fluxo de água subterrânea. As falhas atuam como barreiras ao fluxo de água, especialmente quando orientadas perpendicularmente à direção do fluxo, resultando em gradientes acentuados através delas. A contaminação afetou tanto os materiais inconsolidados saturados quanto as rochas.

O sistema de Bombeamento e Tratamento foi projetado para conter a contaminação e restaurar o aquífero. Poços de extração foram posicionados tanto dentro da pluma quanto em sua extremidade a jusante, com taxas de bombeamento elevadas (aproximadamente 5.500 gpm). A água bombeada foi tratada por *air stripping* antes de ser reinjetada no aquífero a jusante para controle hidráulico.

A operação do sistema resultou em uma redução da pluma e em algumas diminuições na concentração de contaminantes em locais dentro da pluma.

Uma avaliação realizada pelo Exército na década de 2000 indicou que havia pouco benefício em manter o sistema operacional ativo. Consequentemente, um teste de "não operação" foi conduzido a partir de 2004, desligando o sistema de Bombeamento e Tratamento e monitorando a pluma cuidadosamente. O sistema permanece desligado, e planos estão em vigor para desativá-lo, pois a pluma parece estar estável. Medidas contingentes foram estabelecidas caso a pluma comece a migrar para fora da área de gerenciamento definida.

Estudos sobre atenuação natural, tanto por processos metabólicos quanto abióticos, estão sendo conduzidos no local para entender o destino da pluma. Um modelamento robusto de fluxo de água subterrânea foi desenvolvido e está em constante atualização. Embora o modelo atualmente não inclua processos de degradação, ele será atualizado se os estudos de atenuação indicarem sua importância.

Além disso, estão sendo realizados tratamentos na água subterrânea em áreas de *hotspots* nas áreas fonte, utilizando técnicas de *air sparging*, para reduzir a descarga de massa contaminante a jusante.

A transição para o monitoramento da atenuação natural ocorreu em áreas onde as concentrações de contaminantes excediam os Valores Máximos Permitidos, com medidas direcionadas para reduzir *hotspots* e estudos em andamento para avaliar a capacidade da atenuação. Medidas contingentes envolvendo diferentes tecnologias de bombeamento e tratamento estão sendo propostas caso a pluma migre para fora da área de gerenciamento.

Estudo de Caso 3 – São Sebastião – Litoral Norte de São Paulo – Autoposto Baía do Sol

Estudo apresentado no artigo “*Pump and treat free phase in Coastal Aquifer*”, (FREIRE, TRANNIN & SIMÕES, 2014).

Pontos chave

- Remediação de fase livre, utilizando Bombeamento e Tratamento;
- Contaminação por hidrocarbonetos;
- Períodos prolongados de sistema ativo;

O Autoposto Baía do Sol Ltda., é um estabelecimento de venda de combustíveis localizado na cidade costeira de São Sebastião, no litoral norte de São Paulo. A área circundante ao posto é caracterizada por uma mescla de estabelecimentos comerciais e residenciais, além de contar com a proximidade de um corpo d'água e estar a menos de 200 metros do Oceano Atlântico.

A geologia local é predominantemente composta por areia, com variações de textura que vão de fina a grossa, e a presença de rochas sedimentares. Na região do litoral norte paulista, existem dois sistemas aquíferos principais: o Aquífero Cristalino, formado por terrenos cristalinos da Serra do Mar, e o Aquífero Costeiro, composto por sedimentos encontrados ao longo das praias.

O Autoposto Baía do Sol Ltda., está situado sobre o Aquífero Costeiro, formado há menos de 2 milhões de anos, composto por uma variedade de sedimentos depositados em ambiente fluvial. A qualidade das águas desse aquífero pode ser comprometida por diversas fontes de poluição, como fossas negras, fossas sépticas mal construídas e tanques de armazenamento de combustível.

Por meio de levantamentos realizados na área, foi identificada a presença de poluentes em fase livre com até 18 cm de espessura no poço de monitoramento PM 01. Como medida de remediação, foi adotada a técnica de bombeamento e tratamento da fase livre, que está em desenvolvimento desde setembro de 2008. A área foi classificada como contaminada pela CETESB. A eficiência e eficácia do sistema de remediação foram avaliadas quinzenalmente, inspecionando os poços de monitoramento e as espessuras da pluma de contaminação. O PM 01 foi o único a apresentar fase livre. A pluma de fase dissolvida foi avaliada por meio de análises químicas em laboratório certificado, seguindo os procedimentos da CETESB. Amostras da água subterrânea bombeada e tratada foram analisadas antes de serem enviadas ao poço de injeção. Amostras de água do PM 01 em processo de remediação direta também foram coletadas. O PMN 03 constitui um poço de monitoramento profundo, em conjunto multinível com o PM 03.

Durante as investigações ambientais entre julho de 2006 e agosto de 2008, não foram encontradas concentrações de contaminantes em fase residual nos pontos de solo amostrados. No entanto, amostras de água subterrânea coletadas nesse período revelaram contaminação em fase livre no poço de monitoramento PM 01 e em fase dissolvida nos poços PM 03, PM 04, PM 05 e PM 06, com valores acima dos limites estabelecidos pela CETESB.

Em setembro de 2008, um sistema de remediação por bombeamento e tratamento foi implantado no PM 01, embora as plumas de fase dissolvida não estivessem delimitadas.

A contaminação foi atribuída a vazamentos e derrames de gasolina e diesel nos tanques e bombas de combustíveis. A eficácia desse sistema foi avaliada quinzenalmente, revelando uma redução na espessura da pluma de 5 para 1 cm em seis meses. No entanto, o processo de remediação levou 18 meses devido à necessidade de ajustes constantes devido à alta variação

do nível freático. Em 2010, novos poços de monitoramento foram instalados, permitindo uma delimitação mais precisa das plumas de contaminação. As análises químicas subsequentes confirmaram a remediação da pluma em fase livre, mas ainda havia presença de contaminantes em fase dissolvida acima dos limites aceitáveis.

Apesar das críticas à eficácia do sistema de bombeamento e tratamento, estudos anteriores destacam sua aplicabilidade e sucesso em áreas contaminadas por postos de combustíveis. No entanto, a eliminação das fontes contaminadoras e a escolha de técnicas sustentáveis de remediação são fundamentais para o sucesso do processo, enfatizando a importância de uma compreensão abrangente das condições do local na tomada de decisões.

6 DISCUSSÃO

O método de Bombeamento e Tratamento (P&T) foi pioneiro na remediação de águas subterrâneas e continua sendo uma das técnicas mais amplamente utilizadas até hoje. No entanto, ao longo dos anos, o entendimento de modelo conceitual foi refinado, com inclusão de variáveis comportamentais fundamentais que cada site possa apresentar de maneira única, passando por mudanças significativas. Por exemplo, atualmente já há o entendimento de que o transporte de contaminantes é um processo controlado por vias, impulsionado pela complexidade local do aquífero (geologia e geomorfologia), onde os contaminantes se movem predominantemente por meio de advecção, em meios heterogêneos, e principalmente nas áreas mais permeáveis do aquífero. Além disso, já se sabe que o processo de difusão também desempenha um papel importante ao limitar e complicar esse movimento, armazenando massa e liberando-a posteriormente das áreas menos permeáveis do aquífero (Payne *et al.*, 2008; Piscopo *et al.*, 2013). Dadas as circunstâncias, a compreensão do desempenho dos sistemas de bombeamento e tratamento tem sido reconsiderada gradativamente, sendo que esses avanços na compreensão do transporte e armazenamento de contaminantes influenciam nas abordagens de design e estratégias operacionais, especialmente ao lidar com contaminantes miscíveis e de extensas plumas difusas de contaminação (SUTHERSAN *et al.*, 2015).

Para BRUSSEAU (2013), o uso do bombeamento e tratamento até dada época era majoritariamente para remoção de contaminantes e cumprimento de requisitos regulatórios. Sendo que os dados muito raramente eram utilizados para monitoramento de massa de contaminações removidas. Fato é, que a aplicação dos dados se torna primordial para fazer uma caracterização local e até tomar uma decisão sobre a o uso ou cessar do método de remediação com bombeamento e tratamento. (BRUSSEAU *et al.*, 2007, 2011a, b).

Com essa compreensão de evolução na concepção do método, a discussão sobre à Tecnologia de Bombeamento e Tratamento traz à tona alguns pontos cruciais para compreender as limitações dessa tecnologia.

Primeiramente, para avaliar os resultados de uma incursão realizada com bombeamento e tratamento, todos os dados de campo precisam possuir uma coesão, sendo que o tratamento estabelecido, tenha sido bem planejado e a noção exata da localização da fonte de contaminação e a extensão da pluma, seja ela em fase livre ou dissolvida, esteja mapeada. Além disso, todos os dados coletados, precisam de acurácia incluindo a concentração de contaminantes, dados de monitoramento abrangendo uma rede espacialmente ampla, e informações de operação do sistema, como taxas de fluxo e períodos de operação (TRUEX, 2015).

O princípio básico para o pleno entendimento do funcionamento do sistema é ter a concepção que as variáveis como o padrão dos poços e o posicionamento em relação a pluma ou fonte de contaminação, são elementos estratégicos operacionais.

BRUSSEAU (2013) dá exemplos contundentes de como a análise dos dados de campo de um bombeamento e tratamento tem o potencial de fornecer importantes informações do desenvolvimento do método, sendo-os:

- Estimativas da massa inicial de contaminantes
- Tempo da descarga de massa de contaminantes
- Tempo e magnitudes das taxas de remoção de massa
- Caracterização da relação entre reduções na descarga de massa de contaminantes e reduções na massa de contaminantes
- Delimitação da arquitetura da zona fonte
- Delimitação das condições de remoção de massa de contaminantes
- Avaliação da persistência do contaminante
- Identificação de processos específicos de transferência de massa e outros fatores que influenciam na remoção de massa
- Avaliação do impacto das ações de remediação na zona fonte na redução geral de riscos

Da mesma forma TRUEX (2015), corrobora com essa linha de raciocínio, e cita que os dados de distribuição e tendências de concentração de contaminantes são essenciais para avaliar se houve redução na pluma durante a aplicação do bombeamento e tratamento, principalmente para fornecer *insights* para as avaliações subsequentes dos elementos de decisão. Os dados concisos e atualizados da pluma fornecem um contexto para analisar a distribuição e as tendências de concentração e fornecer mapas da pluma. Esses mapas visuais permitem observar o comportamento da pluma ao longo do tempo, fornecendo informações valiosas sobre as tendências gerais.

EPA (2002) descreve que as mudanças na contaminação podem ser quantificadas através de uma avaliação baseada em massa. As informações coletadas para verificar as concentrações e entender as tendências de contaminantes devem ser utilizadas para determinar se a pluma como um todo diminuiu durante o tratamento de P&T.

No entanto, também é importante examinar os elementos que compõem e comportam a pluma para identificar áreas que podem ser resistentes ao bombeamento e tratamento, resultando em uma persistência da pluma. Em alguns casos, pode ser necessário desenvolver descrições de pluma em três dimensões mais detalhadas e análises de tendência de

contaminantes utilizando técnicas de caracterização e monitoramento de alta resolução (TRUEX, 2013).

Em alguns caso após a utilização do método de bombeamento e tratamento, opta-se por uma Atenuação Natural Monitorada, tal método pode ser considerado como uma estratégia pós bombeamento e tratamento viável, desde que os responsáveis envolvidos no projeto de descontaminação do *site*, concordem com a existência de uma zona específica do aquífero onde em conjunto com controles institucionais específicos, a ANM possa ocorrer ao longo do tempo para reduzir as concentrações da pluma dentro de um prazo razoável. Nos Estados Unidos da América, a avaliação da Atenuação Natural Monitorada é realizada considerando diretrizes da OSWER (Office of Solid Waste and Emergency Response) que é uma divisão da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) que possui orientações e protocolos específicos para utilização de tal método (EPA 1998, 2002b, 2003, 2004, 2007c, 2007d, 2010, 2011b; ITRC 1999a, 1999b, 2008, 2010b; USGS 2003; WIEDEMEIER *et al.* 1999).

O entendimento ao avaliar a transição para uma Atenuação Natural Monitorada após o término ou redução do bombeamento e tratamento, é necessário para considerar diferentes linhas de evidência em comparação com locais onde a remediação não foi aplicada. Por exemplo, a avaliação de se uma pluma está estável, encolhendo ou expandindo não é relevante porque as condições da pluma foram afetadas pelo Bombeamento e Tratamento e mudarão novamente quando o Bombeamento e Tratamento for encerrado. As análises devem incluir a consideração do modelo conceitual do local como base para avaliar o comportamento da pluma e os recursos ou processos que controlam o comportamento da pluma. Como também deve ser realizado um cálculo de taxa de atenuação (mudança na concentração através do tempo) (TRUEX, 2015).

Em determinadas situações, a tecnologia do bombeamento e tratamento pode demandar um prazo prolongado para a descontaminação, acarretando custos contínuos significativos. Mesmo com um entendimento claro da localização da pluma de contaminação e um projeto adequado do sistema, pode chegar um ponto em que os benefícios do sistema se tornam menos evidentes. Isso ocorre porque o processo de bombeamento e tratamento envolve a transferência em massa de água subterrânea e contaminantes dissolvidos, além de processos em menor escala que ocorrem entre diferentes unidades hidrogeológicas e fases do contaminante. Com o tempo, é possível que a eficácia da remoção de massa de contaminantes diminua, enfrentando limitações associadas a esses processos em menor escala (TRUEX, 2011).

É comum que o desempenho do sistema de bombeamento e tratamento exiba um período inicial de remoção significativa da massa, que eventualmente diminui e se aproxima de uma concentração estável, possivelmente acima dos Valores de Referência de Qualidade. Infelizmente, esses sistemas também tendem a apresentar uma queda de desempenho e reaparecimento da pluma, resultando como consequência em um "bombeamento eterno" até que os objetivos do projeto sejam alcançados. Essa dinâmica pode estar relacionada a fenômenos como "*rebound*" e "*tailing*", onde novas contaminações surgem devido à falta de um entendimento completo do *site*, e à falta de otimização adaptativa do sistema de bombeamento e tratamento (SUTHERSAN *et al*, 2015)

Dessa forma, o pleno conhecimento do MCA do site é imprescindível na aplicação deste método de remediação, pois a partir dessa concepção, poderá ocorrer a revisão do projeto e ou operação dos sistemas de remediação, e apoiar a tomada de decisões sobre modificações na remediação, tendo um gerenciamento de longo prazo do local e encerramento (BRUSSEAU, 2013).

7 CONCLUSÕES

Considerando a imperatividade das questões ambientais e a preservação dos aquíferos como fundamentais, os dispêndios vinculados à investigação e remediação ambiental, particularmente no contexto das águas subterrâneas, devem ser percebidos como investimentos indispensáveis. Estes investimentos requerem uma abordagem precisa, sustentada por um planejamento cuidadoso e a obtenção refinada de dados, visando abarcar todas as fases subsequentes do processo.

O método do Bombeamento e Tratamento é uma estratégia amplamente empregada em intervenções emergenciais, principalmente como abordagem eficaz na eliminação da fase livre de diversos tipos de contaminantes. A escolha pelo método é facilitada tanto pelo acesso (número de empresas que realizam) quanto pelo custo inicial relativamente baixo, se comparado a outros métodos.

Uma abordagem estruturada é crucial para a avaliação do desempenho do sistema de Bombeamento e Tratamento. A implementação da tecnologia requer uma análise criteriosa baseada em testes de campo, evitando estimativas imprecisas que possam resultar em superdimensionamento e baixa eficácia do sistema, consequentemente prolongando o período de tratamento e encarecendo substancialmente o processo. Fatores como a heterogeneidade do aquífero, a extensão tridimensional da pluma, a natureza dos contaminantes e as possíveis variações da pluma em resposta à aplicação do bombeamento e tratamento devem ser minuciosamente considerados durante o projeto. É crucial projetar o sistema com flexibilidade para ajustes futuros e redução gradual dos contaminantes. Esses dados podem ser respaldados por cálculos e modelagens que conferem confiabilidade técnica às decisões. Esses fatores proporcionam subsídios aos responsáveis técnicos na formulação de decisões adequadas às próximas etapas do processo de remediação em locais onde essa técnica será aplicada.

Quando não são estudadas todas as variáveis essenciais para a aplicação completa do método, os custos operacionais podem aumentar consideravelmente e persistir ao longo de anos. Esta situação se torna mais desafiadora quando contrastada com a aparente facilidade das abordagens iniciais. De fato, o Bombeamento e Tratamento pode ser potencializado quando combinado com outras técnicas, como biorremediação, remoção de camadas de solo contaminado, injeção de agentes químicos, entre outras. Essas abordagens complementares, conhecidas como remediação multifásica, frequentemente se revelam mais eficazes na abordagem de uma ampla gama de contaminantes e condições específicas do local.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APEMETA. Brochura Técnica 2015 - Solos contaminados - O Problema e as Soluções de Remediação, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa. 2015.
- BERGLUND, S. & CVETKOVIC V. Pump-and-Treat Remediation of Heterogeneous Aquifers: Effects of Rate-Limited Mass Transfer. *Ground Water* 33(4):675-685. 1995
- BOSCARDIN, N.; BORGHETTI, J. R; ROSA, E.F.F. Aquífero Guarani – A verdadeira integração dos países do Mercosul. Curitiba, 2004.
- BRUSSEAU, M. L., CARROLL, K. C., ALLEN, T., BAKER, J., DIGUISEPPI, W., HATTON, J, *et al.* The impact of in situ Chemical oxidation on contaminant mass discharge: linking source-zone and plume-scale characterizations of remediation performance. *Environmental Science and Technology*, 45,5352–5358. 2011a.
- BRUSSEAU, M. L., NELSON, N. T., ZHANG, Z., BLUE, J. E., ROHRER, J., e ALLEN, T. Source-zone characterization of achlorinated-solvent contaminated Superfund site in Tucson,AZ. *Journal of Contaminant Hydrology*, 90, 21–40. 2007.
- BRUSSEAU, M.L. Use of Historical Pump-and-Treat Data to Enhance Site Characterization and Remediation Performance Assessment. *Springer Science Water Air Soil Pollut* 224:1741. 2013.
- CANARIO, P.G.G; BETTINE, S.C. Gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil: uma análise crítica. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 39, n. 3, p. 751 - 764, 2020
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). Disponível em: [Seção 1.2: Conceituação » Áreas Contaminadas \(cetesb.sp.gov.br\)](https://cetesb.sp.gov.br/Secao12/Conceituacao/areas-contaminadas). Acesso em: 20 de dez. 2023.
- COHEN, R.M; VINCENT A.H; MERCER J.W; FAUST C.R., & SPALDING C.P. Methods for Monitoring Pump-and-Treat Performance. EPA/600/R-94/123. R.S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK. 102 pp. 1994.
- CETESB. Disponível em: [Relatório de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo \(infraestruturameioambiente.sp.gov.br\)](https://infraestruturameioambiente.sp.gov.br/Relatorio-de-Areas-Contaminadas-e-Reabilitadas-no-Estado-de-Sao-Paulo). Acesso em: 27 de dez. 2023.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas. São Paulo: CETESB, 2001.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). A systematic approach for evaluation of capture zones at pump and treat systems, EPA/600/R-08/003. Cincinnati, Ohio: U.S. Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory. 2008.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Elements for effective management of operating pump and treat systems, EPA/542/R-02/009. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response. 2002^a.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Ground water issue: Design guidelines for conventional pump-and-treat systems, EPA/540/S-97/504. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. 1997.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Guidance for evaluating completion of groundwater restoration remedial actions, OSWER 9355.0-129. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response. 2013.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Hydraulic optimization demonstration for groundwater pump-and-treat systems, volume I: Preoptimization screening (method and demonstration), EPA/542/R-99/011A. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency. 1999a.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Hydraulic optimization demonstration for groundwater pump-and-treat systems, volume II: Application of hydraulic optimization, EPA/542/R99/011B. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency. 1999b.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Methods for monitoring pump- and-treat performance, EPA/600/R-94/123. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. 1994.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Optimization strategies for long-term ground water remedies (with particular emphasis on pump and treat systems), EPA/542/R-07/007. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency. 2007.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Pump-and-treat groundwater remediation: A guide for decision makers and practitioners, EPA/625/R-95/005. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. 1996.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Superfund reform strategy, implementation memorandum: Optimization of fundlead ground water pump treat (P&T) systems. OSWER Directive 9283.1-13. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response. 2000.

FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGIES ROUNDTABLE (FRTR). Disponível em: [Groundwater Pump and Treat | FRTR Remediation Technologies Screening Matrix](#). Acesso em: 11 de nov. 2023.

FERREIRA, S. B. Estudos laboratoriais para avaliação do potencial de contaminação de água e do solo por gasolina oxigenada. Tese (Doutorado Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

FREIRE, P.A.C; TRANNIN, I.C.B; SIMÕES, S.J.C. Bombeamento e tratamento da fase livre em Aquífero Litorâneo ESA ABES.v.19. São Paulo, p. 461-470, 2014.

GILLHAM, R.W., SUDICKY, E.A, CHERRY J.A, & FRIND E.O. An Advective-Diffusion Concept to Solute Transport in Heterogeneous Unconsolidated Geologic Deposits. Water Resour. Res. 20(3):369-378. 1984.

GLEESON, T The global volume and distribution of modern groundwater, Nature Geoscience, p 1-7. 2015.

GORELICK, S.M; FREEZE, R.A; DONOHUE, D. & KEELY J.F. Groundwater Contamination: Optimal Capture and Containment. Lewis Publishers: Boca Raton, FL. 416 pp. 1993.

GÜNTER, M. R. W. Áreas contaminadas no contexto da gestão urbana. São Paulo em Perspectiva, v.20, n.2, p.105-17, 2006.

HABERMANN, M; GOUVEIA, N. Requalificação urbana em áreas contaminadas na cidade de São Paulo. Estudos Avançados 28. p 129-137, 2014.

HOFFMAN, F. Ground-Water Remediation Using “Smart Pump and Treat.” Ground Water 31(1):98-106. 1993.

ITRC. Remediation Management of Complex Sites. Disponível em: [Remediation Management of Complex Sites \(itrcweb.org\)](http://www.itrcweb.org). Acesso em: 15 de dez. 2023.

LIMA *et al.* Gerenciamento de áreas contaminadas por postos de combustíveis em Cuiabá, Mato Grosso, Brasil. Rev. Ambient. Água vol. 12 n. Taubaté. 2017.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). Alternatives for Ground Water Cleanup. National Academy Press. 336 pp. 1994.

NEGRÃO, P. Extração de compostos orgânicos voláteis de águas subterrâneas através de air strippers. Clean News. Campinas, n. 05, 2002.

NOBRE, M.M. & NOBRE, R.C.M. Remediação de solos. R. Química Derivados, 417:1-5, 2003.

OKI, T. & KANAE, S. Global hydrological cycles and world water resources. Science 313, 1068–1072, 2006.

OLIVEIRA FILHO, E. C.; PARRON, L. M. Avaliação de qualidade das águas no Brasil: O rio Preto examinado. Espaço e Geografia, v. 10, p. 279-294, 2007.

PAYNE, F.C; QUINNAN J.A; & POTTER S.T. Remediation Hydraulics. Boca Raton, Florida: CRC Press, 408 pp. 2008.

PISCOPO, A.N., NEUPAUER, R.M., & MAYS, D.C. Engineered injection and extraction to enhance reaction for improved in situ remediation. Water Resources Research 49: 1–8. 2013.

PIWONI, M.D. & KEELEY J.W. Basic Concepts of Contaminant Sorption at Hazardous Waste Sites. Ground Water Issue. EPA/ 540/4-90/053. R.S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK. 7 pp. 1990.

ROY, W.R., KRAPAC I.G., CHOU S.F.J., & GRIFFIN R.A. Batch-Type Procedures for Estimating Soil Adsorption of Chemicals. EPA/530/SW-87/006F (NTIS PB92-146190). Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, OH. 100 pp. 1992

SILVA, J. H. C. Caracterização Hidrogeoquímica das Águas Subterrâneas do Município de Macaé (RJ). Dissertação de Mestrado em Ciências Ambientais, UFRJ, Macaé, 2018.

SILVA, T.T. Técnicas de remediação utilizadas no tratamento da contaminação de solo e água subterrânea por vazamentos em postos de combustíveis. Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2020.

SILVA-FILHO *et al.* Groundwater chemical characterization of a Rio de Janeiro coastal aquifer, SE – Brazil, Journal of South American Earth Sciences (27), Niterói, pp. 100-108. 2009.

STIER, T. Seguindo as tendências das tecnologias de remediação. Será que às vezes não escolhemos a abordagem errada? In: MOERI, E.; COELHO, R.; MARKER, A. (Ed.). Remediação e revitalização de áreas contaminadas. São Paulo: Signus Editora, 2004.

SUTHERSAN, S; KILLENBECK, E; POTTER, S; DIVINE, C & LEFRANCOIS, M. Resurgence of Pump and Treat Solutions: Directed Groundwater Recirculation. Groundwater Monitoring & Remediation 35, no. 2/ 2015.

TAVARES, S. R. L. Remediação de solos e águas contaminadas por metais pesados: conceitos básicos e fundamentos. Rio de Janeiro, 2013.

TRAVIS, C.C. & DOTY C.B. Can Contaminated Aquifers at Superfund Site Be Remediated? Environ. Sci. Technol. 24(1):1464-1466. 1990.

TRUEX, M.J; JOHNSON, C.D BECKER, D.J., LEE M.H., e NIMMONS M.J. Performance assessment for pump-and-treat closure or transition, PNNL-24696. Richland, Washington: Pacific Northwest National Laboratory. 2015.

TRUEX, M.J; JOHNSON, C.D, MACBETH, T; BECKER, D; LYNCH, K; GIAUDRONE, D; FRANTZ, A; e LEE M.H. Performance Assessment of Pump-and-Treat Systems. Groundwater Monitoring & Remediation 37, n°. 3/ pág. 28–44. 2017.

TRUEX, M.J; JOHNSON, C.D. Pump-and-Treat System Performance Assessment. Tacoma, Washington: Public Works, Joint Base Lewis McChord. 2013.

TRUEX, M.J; JOHNSON, C.D; COLE C.R. Numerical flow and transport model for the Fort Lewis Logistics Center, DSERTS No. FTLE-33. Fort Lewis, Washington: Fort Lewis Public Works, Building 2102. 2006.

TRUEX, M.J; JOHNSON, C.D; COLE C.R. Numerical groundwater modeling in support of relocating the pump-and-treat recharge system. East Gate Disposal Yard, Fort Lewis, Washington, DSERTS No. FTLE-33. Fort Lewis, WA: Fort Lewis Public Works, Building 2012. 2003.

WIEDEMEIER, T. H. *et al.* Natural attenuation of fuels and chlorinated solvents in the subsurface. John Wiley & Sons, 1999.