

## Modelagem implícita para detalhamento do Modelo Conceitual Temporal de Área Complexa com remediação de Plumas Combinadas na Região Metropolitana de São Paulo

*Implicit modeling to detail the Temporal Conceptual Model of a Complex Area with remediation of Combined Plumes in the Metropolitan Region of São Paulo*

Sasha Tom Hart<sup>1</sup> , Reginaldo Antonio Bertolo<sup>1</sup> , Roland Feig<sup>2</sup> , Fernanda Souto Barreto<sup>1</sup> ,  
Joyce Cruz Di Giovanni<sup>3</sup> , José Carlos Rocha Gouvêa Júnior<sup>4</sup> , Maria Stella Agostini<sup>5</sup> 

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo, Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas, Instituto de Geociências, Rua do Lago, 562, CEP: 05508-080, São Paulo, SP, BR (sashartom@gmail.com; bertolo@usp.br; fernandasouto@usp.br)

<sup>2</sup>BASF SE, Ludwigshafen am Rhein, DE (roland.feig@basf.com)

<sup>3</sup>Seequent, São Paulo, SP, BR (joyce.cruz@seequent.com)

<sup>4</sup>Companhia Siderúrgica Nacional, São Paulo, SP, BR (jose.gouvea@csn.com.br)

<sup>5</sup>Basf S.A., São Paulo, SP, BR (maria.agostini@basf.com)

Recebido em 25 de janeiro de 2023; aceito em 30 de maio de 2023.

### Resumo

Existem propriedades e regiões contaminadas que têm sido denominadas no exterior como Áreas Complexas em virtude de desafios técnicos ou não técnicos que requerem estratégias e prazos atípicos para sua restauração. Uma área de estudo desse tipo, com mais de 20 anos de gerenciamento ambiental, foi objeto de modelagem implícita para auxiliar no detalhamento e avaliação do seu Modelo Conceitual Temporal. Os resultados reforçaram o entendimento claro e holístico sobre sua evolução e seus desafios, incluindo Plumas Combinadas geradas de fontes com localização distinta. Foi confirmado que as intervenções na área se beneficiaram de entendimentos regionais e aspectos de Gerenciamento Adaptativo, tais como a definição de objetivos intermediários e o contínuo aperfeiçoamento do modelo conceitual e da remediação. Concluiu-se que o reconhecimento de Áreas Complexas e a aplicação de Gerenciamento Adaptativo têm o potencial de auxiliar no gerenciamento de mais locais no Brasil. Recomenda-se que isso seja feito contemplando adaptações e considerações locais, tais como: englobar, na definição de Áreas Complexas, que os desafios devem, comprovadamente, apresentar alta complexidade e requerer tempos atípicos para sua restauração ou reabilitação (mais de 15 anos, em São Paulo); considerar como desafio técnico o extenso manto de intemperismo de regiões tropicais úmidas; apreciar como desafio técnico e não técnico o alto número de poços de captação não outorgados; considerar como desafio não técnico a existência de conflitos socioeconômicos; e avaliar, inclusive com estudos isotópicos, a possível presença de Plumas Combinadas.

**Palavras-chave:** Gerenciamento de áreas contaminadas; Modelo conceitual; Áreas complexas; Plumas combinadas; Remediação; Modelagem implícita.

### Abstract

There are contaminated properties and regions that have been named abroad as Complex Areas due to the existence of technical or non-technical challenges that require atypical strategies and timelines for their restoration. One such study area, with more than 20 years of environmental management, was subjected to Implicit Modelling to assist in the detailing and evaluation of its Temporal Conceptual Model. The results reinforced a clear and holistic understanding of its evolution and challenges, including the existence of Combined Plumes generated from distinctly source areas. Interventions in the area were confirmed to have benefited from regional understandings and aspects of Adaptive Management, such as the definition of intermediate objectives, continuous refinement of the conceptual model and remediation. It was concluded that recognizing Complex Areas and applying Adaptive Management has the potential to assist the management of more sites in Brazil. This is recommended to be done while taking into account local adaptations and considerations, such as: including in the definition of Complex Areas that the challenges should demonstrably present high complexity and require atypical times for restoration or rehabilitation (more than 15 years, in São Paulo); considering as a technical challenge the extensive mantle of weathering of humid tropical regions; considering as a technical and non-technical challenge the high number of unregistered catchment wells; considering as a non-technical challenge the existence of socioeconomic conflicts; evaluating, including with isotopic studies, the possible presence of Combined Plumes.

**Keywords:** Contaminated site management; Conceptual model; Complex areas; Combined plumes; Remediation; Implicit modeling.

## INTRODUÇÃO

O gerenciamento de áreas contaminadas (GAC) tem se desenvolvido no Brasil, sobretudo nas duas últimas décadas, auxiliado pelo aprimoramento de técnicas internacionais adaptadas às condições do país (Moraes et al., 2014; Teixeira et al., 2016). O GAC vem sendo implementado em mais estados, tipicamente na escala de propriedades privadas e obedecendo a etapas sequenciais estruturadas. Em função dos resultados dessas etapas, tais como a identificação de riscos e a adoção de medidas de intervenção, as áreas têm sido classificadas de modo a refletir o estágio do GAC em que se encontram. A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017) adota ainda uma classificação sobre o contexto do local, paralelamente a outras, especificamente para áreas críticas. Ou seja, um local pode ser classificado com base na identificação de risco iminente à vida ou à saúde humana, na inquietação na população ou nos conflitos entre os atores envolvidos. Nessas situações, é necessário adotar um gerenciamento diferenciado quanto a intervenções, comunicação dos riscos e gestão das informações. Em outubro de 2022, a CETESB (2023) tinha no seu cadastro 18 áreas críticas (0,27%) entre as 6.588 áreas contaminadas.

Segundo um número crescente de autores, existe outro tipo de local contaminado que pode ser denominado como Área Complexa, também por seu contexto (NRC, 2013; Vogel, 2015; Harlerode et al., 2016; ITRC, 2017; Price et al., 2017; Gatsios et al., 2018; Conte et al., 2021; Dong et al., 2021; Hart et al., 2021). Esses são locais, seja uma propriedade ou até uma região, onde existem grandes desafios não técnicos, como sobreposição de responsabilidades, ou desafios técnicos, como Plumas Combinadas, que requerem prazos atípicos e estratégias de Gerenciamento Adaptativo baseadas em modelos conceituais aperfeiçoados e atualizados (NRC, 2013; ITRC, 2017; Price et al., 2017).

Segundo estimativa não oficial do Conselho Nacional de Pesquisa dos Estados Unidos da América (National Research Council — NRC, 2013), das 126 mil áreas contaminadas existentes no país, 12 mil (9,5%) foram consideradas como complexas por sua hidrogeologia e contaminação. Dessa forma, as áreas críticas devem ser entendidas como um subgrupo com desafios específicos, sobretudo não técnicos, dentro de uma quantidade muito maior de áreas complexas que, possivelmente, existem no Brasil.

Conforme Sale e Newell (2011), o primeiro passo para avançar com soluções em áreas contaminadas é buscar entendimento claro e holístico do cenário e dos seus desafios. O aperfeiçoamento do modelo conceitual contribui para esse tipo de entendimento, revelando riscos, incertezas, processos, evoluções temporais, entre outros possíveis importantes atributos (Schultz, 2001; Sale e Newell, 2011; Kresic e Mikszewski, 2013; Hart et al., 2021, 2022).

O desenvolvimento de recursos computacionais, como a modelagem implícita, tem permitido representações e visualizações dinâmicas dos modelos de forma cada vez precisa e rápida (Cowan et al., 2002, 2003; Bertossi et al., 2013; Kresic e Mikszewski, 2013; Zhong et al., 2019; Elshall et al., 2020; Guo et al., 2021; Kikuda, 2022).

Neste contexto, este estudo tem como objetivo principal contribuir para a discussão sobre áreas complexas e o gerenciamento dos seus desafios, como Plumas Combinadas, baseada no aperfeiçoamento e na atualização de modelos conceituais. Apesar do crescente interesse público, expresso em eventos técnicos, como as últimas edições do Painel de Debates do Senac São Paulo, Seminário Ekos, Conferência Aesas e Workshops NICOLE Latin America, nota-se uma quantidade limitada de publicações sobre esses temas no Brasil. Sob essa perspectiva, será abordada uma área localizada na Região Metropolitana São Paulo, que apresentava desafios complexos e foi sujeita a mais de 20 anos de gerenciamento ambiental (Hart et al., 2021, 2022; Barbieri et al., 2022). Uma ferramenta de modelagem implícita será aplicada visando detalhar (tridimensionalmente e ao longo do tempo) e avaliar seu Modelo Conceitual Temporal.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### Áreas complexas

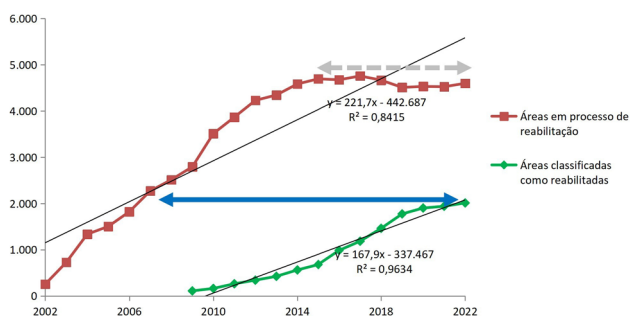
Em 2011, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América indicou que 31% das áreas contaminadas utilizavam 80% dos recursos e existiam dúvidas sobre quando suas remediações seriam concluídas. Em 2013, o NRC (2013) ampliou esse levantamento e desenvolveu alternativas para o gerenciamento de áreas complexas, identificando pelo menos 126 mil locais no país com contaminação residual ainda em níveis inaceitáveis e indicando que “embora tenha havido progresso na remediação de muitos locais de resíduos perigosos”, muitos desses ambientes apresentaram desafios “onde a restauração, provavelmente, não será alcançável nos próximos 50 a 100 anos”. Estimou que 12 mil (9,5%) das 126 mil áreas contaminadas poderiam ser consideradas complexas com base no seu contexto hidrogeológico e de contaminação. O conselho não definiu o tempo mínimo necessário para a reabilitação dessas Áreas Complexas, porém indicou que, para casos não complexos tipicamente, eram necessários cerca de 20 anos de gerenciamento das áreas contaminadas para ser finalizada sua remediação e seu monitoramento.

No Brasil, não foram reconhecidos estudos detalhados ou banco de dados robustos em nível nacional ou estadual que indicassem o tempo tipicamente necessário para alcançar a restauração ou a reabilitação de áreas contaminadas. Os dados disponibilizados pela agência ambiental de São

Paulo (CETESB, 2023) permitem determinar a evolução estatística das áreas nas diferentes fases do processo de reabilitação, bem como as áreas classificadas como reabilitadas (Figura 1). As projeções dos dados indicam linearidade, exceção para a mudança de tendência de crescimento para estabilização do número de áreas em processo de reabilitação por volta de 2015 (refletida em coeficiente de determinação ( $R^2$ ) menor).

Nota-se que o patamar atual de áreas classificadas como reabilitadas (2.062), conforme Figura 1, foi previamente alcançado em 2007 como áreas em processo de reabilitação. Esses dados sugerem a necessidade de cerca de 15 anos de ações de GAC para que a atual quantidade de áreas fosse considerada reabilitada em São Paulo (número próximo ao da referência da NRC, de aproximadamente 20 anos). Os dados também indicam que esse período aumentou ao longo do tempo (por exemplo, dez anos para atingir o número de áreas reabilitadas informado em 2012). Uma das possíveis explicações para isso e da diferença para a estimativa da NRC é que no início da formação desse banco de dados, existia predominância de áreas de postos de combustíveis, e estas costumam ser menos complexas por conter tipicamente plumas com menor área, distribuição vertical e toxicidade do que as de áreas industriais.

Em 2017, o *Interstate Technology & Regulatory Council* (ITRC, 2017; Price et al., 2017) dos Estados Unidos da América desenvolveu orientações para o gerenciamento e remediação de Áreas Complexas. Aproximadamente 190 pessoas foram envolvidas nessa iniciativa, incluindo representantes dos órgãos reguladores ambientais estaduais e federais, representantes de órgãos federais, partes interessadas da comunidade, universidades e especialistas do mercado. Elas identificaram e classificaram os tipos de



**Figura 1.** Evolução do número de áreas contaminadas em processo de reabilitação e de áreas classificadas como reabilitadas no Estado de São Paulo (CETESB, 2023). A seta tracejada cinza indica o período, desde 2015, em que o número de áreas em processo de reabilitação se estabilizou. A seta azul indica um período aproximado de 15 anos entre o atual número de áreas reabilitadas e a constatação de quantidade similar de áreas em processo de reabilitação.

desafios, sobretudo nos Estados Unidos da América, que podem gerar áreas complexas:

- Desafios não técnicos: definição de objetivos/metasp (incluindo legislação), processos de tomada de decisão, atividades de longo prazo, rotatividade na gestão, sobreposição de responsabilidades, controles institucionais, mudanças no uso e restrições de financiamento;
- Desafios técnicos: condições geológicas, hidrogeológicas e geoquímicas heterogêneas, e aquelas relacionadas a características dos contaminantes e de grandes escalas, incluindo Plumas Combinadas.

ITRC (2017) e Price et al. (2017), em consonância com outros autores (NRC, 2013; Vogel, 2015; Harclerode et al., 2016), recomendaram gerenciar Áreas Complexas com a aplicação do Gerenciamento Adaptativo (NRC, 2003). Esse tipo de abordagem foi desenvolvido ao longo das últimas décadas, inicialmente, focando em outros sistemas naturais, como ecossistemas, fauna, flora, recursos hídricos e mudanças climáticas. O Gerenciamento Adaptativo mostrou-se particularmente útil quando existe alto grau de incertezas. Ele promove planejamentos que preveem a utilização de resultados no desenvolvimento e aplicação das soluções. Testes, avaliações e divulgação de aprendizados devem fazer parte desses programas, de modo que seja obtido o conhecimento necessário para melhorar os processos de tomada de decisão (NRC, 2003).

As estratégias de Gerenciamento Adaptativo devem “incorporar abordagens sustentáveis de gestão de risco no início do ciclo de vida do projeto para avaliar com confiança o desempenho e superar as barreiras associadas à percepção de risco, incerteza e falta de transparência” (Harclerode et al., 2016). Segundo ITRC (2017) e Price et al. (2017), o processo de Gerenciamento Adaptativo deve incluir os principais passos:

1. Identificar os desafios no contexto do modelo conceitual;
2. Conduzir uma avaliação da necessidade do Gerenciamento Adaptativo;
3. Aperfeiçoar o modelo conceitual;
4. Indicar ou revisar objetivos gerais;
5. Desenvolver objetivos intermediários e estratégia adaptativa de remediação;
6. Desenvolver um plano de gerenciamento de longo prazo;
7. Projetar e implementar remediação;
8. Monitorar e avaliar *performance*;
9. Aplicar critérios de decisão para avaliar o progresso no atendimento de objetivos intermediários e gerais, bem como a necessidade de otimizar a remediação e/ou aperfeiçoar o modelo conceitual.

O modelo conceitual deve ser revisto periodicamente e considerado uma ferramenta dinâmica. Conforme preconizado por Sale e Newell (2011), deve possibilitar um entendimento claro e holístico do cenário e dos seus desafios.

## Plumas combinadas

ITRC (2017) e Price et al. (2017) indicaram que um dos tipos de desafios técnicos que podem existir em Áreas Complexas são Plumas Combinadas. Marryott et al. (2000) definiram-nas como aquelas plumas “causadas por múltiplas partes” e propuseram uma metodologia para definir a divisão do seu passivo complexo. Para tanto, devem ser utilizadas ferramentas para definir tanto a massa de contaminante quanto o volume de água subterrânea contaminada que cada parte, provavelmente, contribuiu para a pluma. Uma definição mais detalhada foi fornecida no guia do órgão regulador ambiental NJ DEP (2017, p. 8), conforme traduzida e apresentada a seguir:

Uma condição de pluma combinada existe quando plumas, originadas de duas ou mais descargas de contaminantes temporal ou espacialmente distintas, misturaram-se ou avançaram uma sobre a outra na medida em que a remediação realizada em uma pluma certamente afetará a remediação da(s) outra(s) pluma(s) contaminante(s).

O termo original de Plumas Combinadas (*Commingle Plumes*) foi traduzido do inglês com base no entendimento de que ele engloba as condições de plumas que podem estar tanto misturadas quanto sobrepostas, bem como tão adjacentes a ponto de a remediação de uma impactar a da outra. Essa proposta de tradução foi previamente discutida por especialistas brasileiros e em evento de debate técnico (Hart, 2019) sem objeções. Foram notados comentários de que essa condição, possivelmente, era comum, porém ainda pouco reconhecida. Em um deles, questionava-se se a tradução para Pluma Misturada não seria melhor, entretanto, entende-se que a mistura de plumas é apenas uma das situações possíveis no caso de Plumas Combinadas. Ademais, o termo Pluma Misturada pode ser utilizado também em cenários sem Plumas Combinadas, uma vez que a mistura de plumas pode ter se formado de apenas uma fonte contendo múltiplos contaminantes (“coquetel”).

Para distinguir fontes múltiplas deve-se, continuamente, avaliar, atualizar e refinar o modelo conceitual de área (Bertolo, 2017; NJ DEP, 2017; Teixeira e Abreu, 2018). O modelo pode promover a integração, a comunicação e a interpretação dos dados existentes, bem como servir de apoio para processos de tomada de decisão.

## Modelagem implícita e algoritmo *fast* RBFTM™

Como preconiza a agência ambiental de São Paulo (CETESB, 2017), processos de modelagens matemáticas, portanto, simulações por meio de um conjunto de equações, devem ser empregados “para simular o comportamento temporal da contaminação”. No caso da constatação da ultrapassagem dos padrões legais, a modelagem também deverá “contemplar

o transporte tridimensional das substâncias químicas de interesse”, considerando inclusive efeitos de retardamento e eventual bombeamento de poços de captação.

Existem diversos tipos de modelagem matemática (Cowan et al., 2003; Bertossi et al., 2013; D’Afonseca et al., 2020; Kikuda, 2022). A modelagem explícita é aquela realizada por interpretação e digitalização do modelador diretamente a partir de seções geológicas, de forma tipicamente demorada e limitada para atualizações. Já a modelagem implícita é feita de forma automatizada, partindo de informações de posicionamento geográfico e de rápidas interpolações, podendo contemplar campanhas sucessivas de resultados. Vários algoritmos de modelagem implícita têm sido aplicados nas geociências, tais como *Radial Basis Function* (RBF), Inverso da Distância e Krigagem (Vollgger et al., 2015; Pereira et al., 2017).

O algoritmo *Fast RBF™* foi patenteado pela empresa Seequent® e incorporado ao seu *software* de modelagem Leapfrog Works®. Ambos foram selecionados para ser aplicados no presente estudo. Esse algoritmo consiste numa série de funções que envolvem um conjunto de dados, dos quais são escolhidas funções básicas, de forma que sua combinação linear satisfaça as condições de interpolação, conforme apresentado por Caumon et al. (2012) (Equação 1):

$$f(x) = \sum_{l=1}^L c_l \cdot p_l(x) + \sum_{n=1}^N \lambda_n \cdot \Phi(|x - x_n|) \quad (1)$$

Em que:

$p_l(x)$ : Funções polinomiais de base;

$c_l$ : Coeficientes de drifte;

L: Total de termos polinomiais;

N: Número de pontos de dados;

$\Phi(|x - x_n|)$ : Função de covariância entre um ponto de dado ( $x_n$ ) e um ponto desconhecido ( $x$ );

$\lambda_n$ : Coeficientes de interpolação desconhecidos.

Para encontrar os coeficientes, é necessário resolver o seguinte sistema linear (Equação 2):

$$\begin{bmatrix} \Phi & P \\ P^T & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Em que:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi(0) & \cdots & \phi(|x_1 - x_N|) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi(|x_N - x_1|) & \cdots & \phi(0) \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} p_l(x_1) & \cdots & p_l(x_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_l(x_N) & \cdots & p_l(x_N) \end{bmatrix}$$

Diversos tipos de equação em função das distâncias ( $\Phi(r)$ ) podem ser aplicados para garantir solução ao conjunto de

matrizes, em outras palavras, para serem matrizes definidas e positivas, conforme apresentadas na Tabela 1.

O Fast RBF™, método de interpolação global com equivalência matemática à krigagem dupla, possui variogramas de controle de dados e extrapolação passível de execução partindo de média especificada ou de forma automática, por meio de padrões pré-definidos (Seequent, 2020).

**METODOLOGIA**

O histórico e os resultados da área de estudo (Hart et al., 2021, 2022; Barbieri et al., 2022) foram revisitados de modo a reconhecer seus desafios de natureza técnica e não técnica, bem como a evolução e os aspectos adaptativos do gerenciamento da área (NRC, 2013; ITRC, 2017; Price et al., 2017).

O Modelo Conceitual Temporal da área (Hart et al., 2021) foi revisado. Esse tipo de modelo conceitual foi definido como a representação sequencial de modelos conceituais unitemporais (“fotografias”), que indicam a evolução da contaminação, possíveis causas, processos, ações e incertezas. Para auxiliar no desenvolvimento desta revisão, foi selecionada a ferramenta de modelagem implícita do Leapfrog Works®, *software* aplicado visando aumentar o detalhamento tridimensional e temporal do modelo conceitual. Essa atividade de modelagem seguiu o fluxo de trabalho apresentado na Figura 2.

Os dados incorporados ao modelo incluíram a topografia local e do projeto em exibição no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000/zona 23S), imagens de satélite, informações de 248 descrições litológicas de sondagens, considerando a profundidade e as distintas unidades, perfis construtivos de 201 poços, medições de nível de água e resultados analíticos de monitoramento das atividades ambientais entre 2000 e 2019. Foi utilizado o banco de dados de Hart et al. (2021, 2022), considerando os dois compostos presentes que haviam sido identificados como os principais geradores das plumas combinadas: 1,2-Dicloetano (1,2-DCA) e Tetracloroetano (PCE).

O gerenciamento foi avaliado e permitiu identificar campanhas de monitoramento das águas subterrâneas,

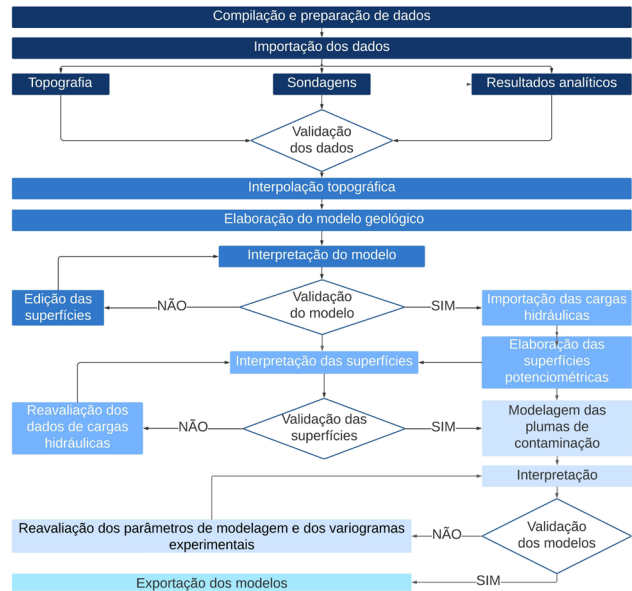
**Tabela 1.** Funções radiais de base.

Tipo de RBF	Equação
Gaussiano	$\phi(r) = e^{-\epsilon^2 r^2}$
Esférico	$\phi(r) = 1,5\epsilon r - 0,5(\epsilon r)^3$
Exponencial	$\phi(r) = e^{-3r/\epsilon}$
Multiquadrático	$\phi(r) = \sqrt{1 + (\epsilon r)^2}$
Linear	$\phi(r) = r$

Fonte: modificada de Fasshauer (2007).

representativas de mudanças de contexto, selecionadas para ser modeladas (Tabela 2). Para minimizar eventuais variações sazonais, essas campanhas são do primeiro semestre de cada ano. Nota-se que a quantidade de poços monitorados aumentou até 2016 e depois, já com a consolidação do modelo conceitual, reduziu-se.

Os resultados analíticos do banco de dados foram avaliados e validados dentro da interface do Leapfrog Works®,



Fonte: com base em Seequent (2017).

**Figura 2.** Fluxograma para elaboração de modelos conceituais no Leapfrog Works.

**Tabela 2.** Campanhas de monitoramento das águas subterrâneas (do primeiro semestre de cada ano) selecionadas para modelagem.

Ano	Contexto	Quantidade de poços
2000	Campanha inicial de amostragem	8
2006	Após investigações e início de <i>Pump &amp; Treat</i> (2002)	44
2011	Continuação do sistema de <i>Pump &amp; Treat</i>	49
2013	Continuação do <i>Pump &amp; Treat</i> e investigações (e.g. MIP)	64
2016	Pós-desligamento do <i>Pump &amp; Treat</i> (2014) e novas investigações (e.g. montante, fraturado, isótopos)	81
2018	Pós-execução de remediação térmica (finalizado no primeiro semestre de 2017) e biorremediação	68
2019	Dois anos pós-execução de remediação térmica	54

que possibilitou identificar discrepâncias de formação e amostras duplicatas. Nesses casos, a formação foi uniformizada e, de forma conservadora, utilizados os dados da duplicata com mais alta concentração. As concentrações reportadas como inferiores ao limite de quantificação do laboratório (tipicamente de 2 ug/L) foram substituídas pela metade, de modo a minimizar a superestimação dos volumes e efeitos de distorção na borda durante a interpolação para delimitar as plumas.

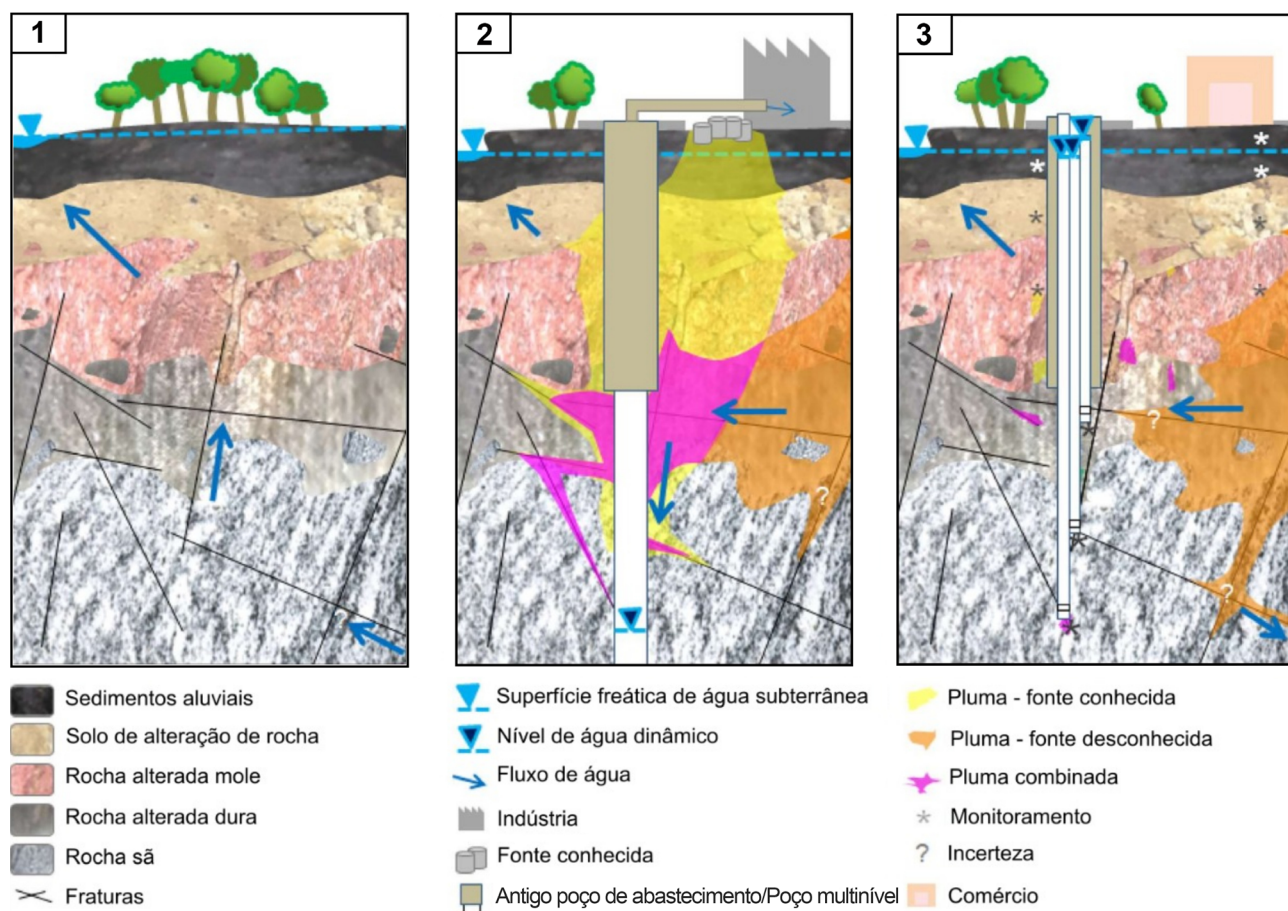
## ÁREA DE ESTUDO: DESAFIOS E GERENCIAMENTO

A área de estudo era uma antiga propriedade industrial localizada em zona de uso misto, na Região Metropolitana de São Paulo, que apresentava intenso uso da água subterrânea captada por meio de poços tubulares. Essa área foi descrita em Hart et al. (2021, 2022) e Barbieri et al. (2022),

incluindo um Modelo Conceitual Temporal, conforme ilustrado na Figura 3.

Depois da identificação de contaminação nos seus antigos poços de captação (cadastrados) em 2000, o local foi sujeito a diversas medidas de investigação intrusiva e não intrusiva, que incluíram a instalação de uma rede de poços de monitoramento. Mais recentemente, as descrições de testemunhos das campanhas de sondagem foram revisadas e reclassificadas por Hart et al. (2021), seguindo Vaz (1996). O contexto inclui extensas zonas de intemperismo em rochas do Complexo Embu, que apresentam alta anisotropia, heterogeneidade e conectividade (Vaz, 1996; Hart et al., 2007; Lojkasek-Lima, 2018; Hart et al., 2021). As seguintes unidades geológicas foram reconhecidas:

- 1) Aterro: matriz composta por argila e areia com presença de entulhos;
- 2) Argila Orgânica: argilas aluviais escuras com restos de plantas;
- 3) Sedimentos Variados: predomínio de areia na parte inferior;



Fonte: Hart et al. (2021).

**Figura 3.** Modelo Conceitual Temporal: 1) antes da contaminação, com fluxo de água subterrânea ascendente; 2) durante o uso industrial, com poço de abastecimento e Pluma Combinada; 3) depois da remediação, com possível pluma remanescente da área externa.

- 4) Solo de Alteração (expandido): zona de transição gradual, incluindo solo eluvial e de alteração e rocha alterada mole. Solo composto por materiais argilossiltoarenosos, mais homogêneo em níveis rasos, passando a bem heterogêneo, com estruturas diversas da rocha gnáissica parental;
- 5) Rocha Alterada Dura: gnaïsse com intemperismo mineral e resistência física variável. Apresenta porosidade dupla, com fluxo predominante via fraturas;
- 6) Rocha Sã: biotita quartzognáïsse fraturado (Complexo Embu) e porosidade abaixo de 1%.

As três primeiras unidades fazem parte do Aquífero Sedimentar, enquanto as três últimas, do Aquífero Cristalino Fraturado (alvo da maioria dos poços de captação, comumente sem outorga, por sua típica melhor qualidade e quantidade de água).

Por treze anos, uma rede de poços de captação, incluindo os antigos, foi utilizada em um sistema *Pump & Treat* como principal estratégia de remediação. Dentro da indústria, na sua área de montante, uma área fonte de solventes clorados (sobretudo 1,2-DCA) foi identificada onde previamente houve estocagem temporária de materiais usados. Em 2014, depois da constatação de que os objetivos finais da remediação não estavam sendo atingidos, iniciou-se um processo de avaliação dos resultados, definição de objetivos intermediários, aperfeiçoamento do modelo conceitual e otimização da estratégia de remediação (estratégias similares ao preconizado pelo Gerenciamento Adaptativo). Os objetivos intermediários incluíram resolução de incertezas, como a delimitação da área-fonte, estudos do extenso manto de intemperismo e rocha fraturada, bem como a remediação prioritária da fonte secundária, localizada em camada orgânica, seguida por melhorias no entorno e nas camadas abaixo.

O aperfeiçoamento do modelo conceitual incluiu a complementação da investigação nos sentidos vertical e horizontal. Várias linhas de evidência, incluindo caracterização de alta resolução, resultados analíticos, hidrogeologia e estudos isotópicos, indicaram a existência de plumas combinadas e, ao menos, mais uma fonte de contaminação em área industrial externa localizada a montante (Hart et al., 2021, 2022), conforme apresentado na Figura 4.

Medições de nível de água na área das plumas indicaram que as diferentes unidades geológicas apresentavam alto grau de conectividade hidráulica, e o fluxo das águas subterrâneas nas diferentes camadas unidades era predominantemente para sudeste, com componente vertical descendente. Foram calculados gradientes hidráulicos próximos de 1%, com aumentos registrados durante eventos de bombeamento (internos e, possivelmente, externos). Novas tecnologias de remediação foram avaliadas, selecionadas e aplicadas. Um processo térmico foi aplicado na área-fonte (secundária, interna) e biorremediação nas suas plumas,

inclusive nas combinadas, segundo metas definidas em avaliação de risco. Os processos de remediação, atendimento das metas e a tendência geral de queda das concentrações foram confirmados em novo estudo isotópico (Hart et al., 2022) e monitoramento da qualidade do solo, de vapores e de águas subterrâneas. Três anos depois, novas amostragens das águas subterrâneas indicaram continuidade da tendência geral de queda das suas concentrações.

Este caso pode ser considerado típico de Área Complexa, tendo em vista a existência de diversos desafios técnicos e não técnicos, com gerenciamento para reabilitação durando cerca de 20 anos (área formalmente classificada como reabilitada em 2021). Dentre os desafios técnicos listados pela ITRC (2017), destaca-se a presença de geologia de baixa permeabilidade, hidrogeologia em meio fraturado, contaminantes densos e de degradabilidade complexa, grande extensão das plumas (vertical e horizontalmente) e Plumas Combinadas. Ademais, notou-se complexidade relacionada com a distribuição heterogênea de contaminantes ao longo do extenso manto de intemperismo e a possível influência de poços de captação não cadastrados (Hart et al., 2021).

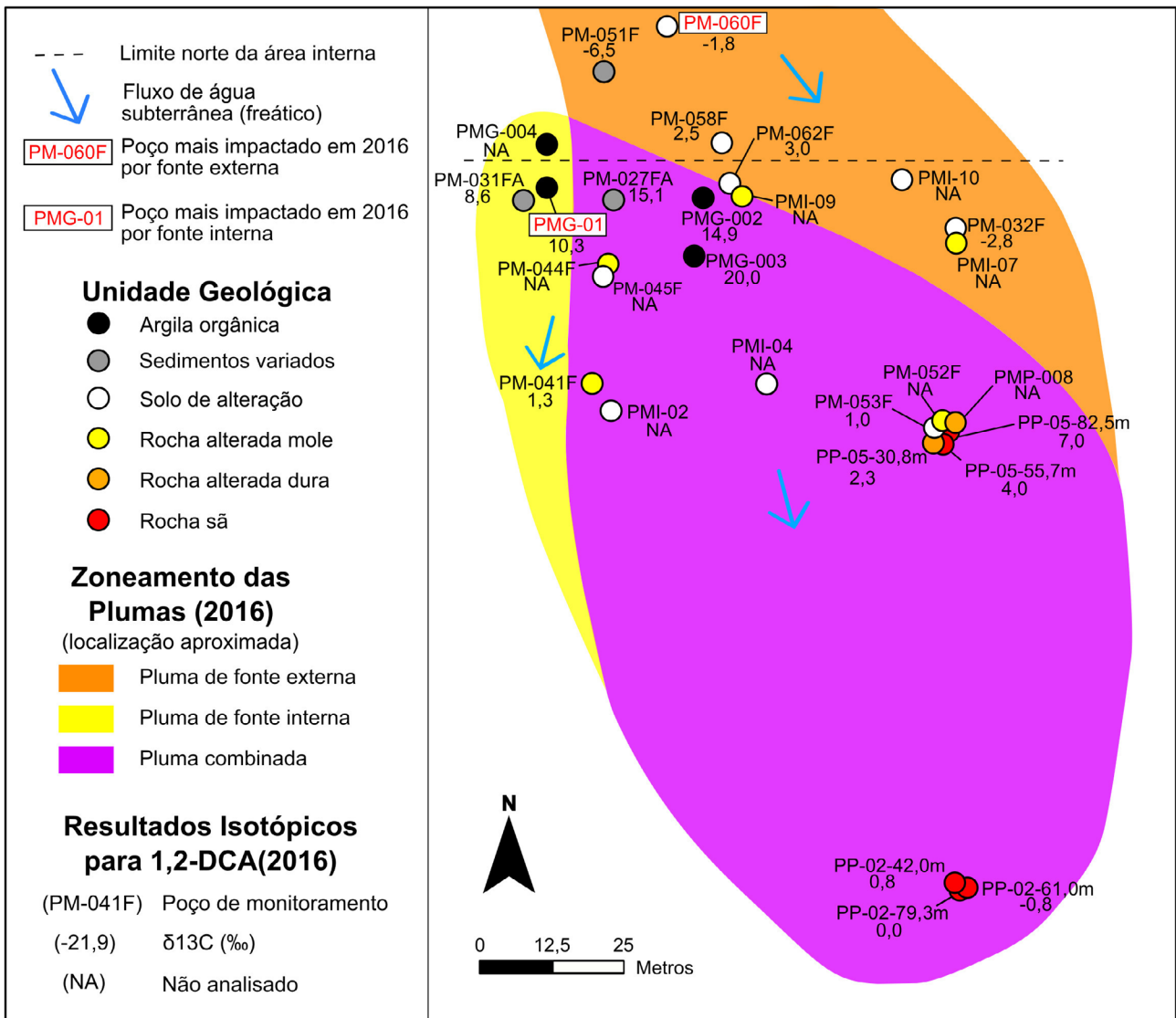
Dentre os desafios não técnicos listados, destacam-se: definição de objetivos e metas de remediação, atividades de longo prazo, rotatividade dos responsáveis pela gestão ambiental, sobreposição de responsabilidades financeiras, implementação de controles institucionais e mudanças no uso urbanístico do solo. Observou-se ainda complexidade relacionada com diversos episódios de furto de materiais, como tampas de poços, e de ocupação irregular por pessoas em situação de vulnerabilidade social, intensificados nos períodos de piora das condições econômicas em geral.

## RESULTADOS DA MODELAGEM IMPLÍCITA

### Modelagem tridimensional hidrogeológica

Os perfis das sondagens e dos poços da área de estudo foram modelados junto com as cargas hidráulicas registradas durante as campanhas de monitoramento. Mapas potenciométricos gerados para as diversas campanhas e unidades geológicas (acima da rocha sã) indicaram que a porção norte da área de estudo era uma região de montante, com predomínio de fluxo de água subterrânea na direção sul, enquanto nas porções mais centrais e à jusante, o fluxo apresentava variações para sudeste e sudoeste (Figura 5).

A localização e a profundidade das unidades geológicas identificadas foram interpoladas para definir superfícies de contorno. Para modelar a estratigrafia, foi utilizada a ferramenta de geometria para depósitos do Fast RBF™, um conjunto de funções específicas para depósitos recomendadas para modelar superfícies de contato com estratigrafia concordante. A modelagem do bloco tridimensional,



Fonte: Hart et al. (2021).

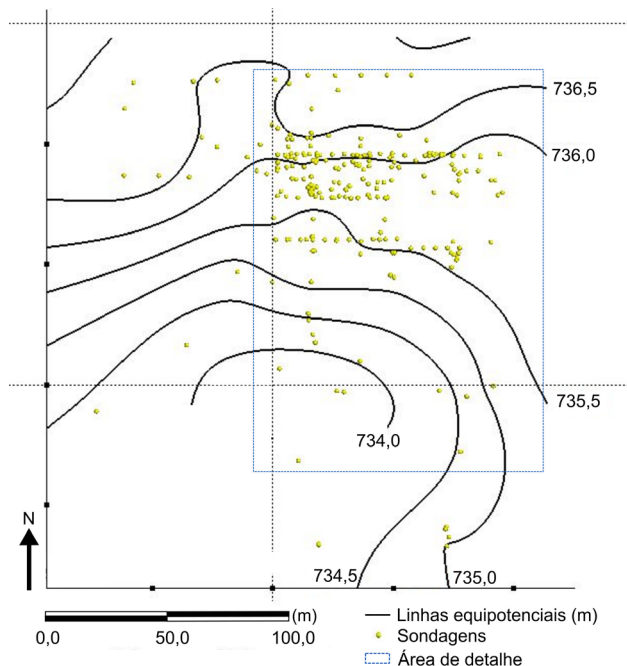
**Figura 4.** Resultados isotópicos, antes da otimização da remediação, utilizados junto de outras linhas de evidência para o zoneamento das plumas com origem interna, externa e combinadas.

seja da geologia, seja da pluma, permitiu sua visualização sob diversas perspectivas (rotações em todas as direções), bem como avaliar detalhes da sua distribuição, profundidade e continuidade em nível de escala centimétrica à regional (Figura 6).

As camadas mais rasas, localizadas acima do Solo de Alteração, apresentam estratigrafia com certa variação nas suas geometrias e espessuras em decorrência dos processos de sedimentação e atividades de aterramento. Nessas camadas, nota-se porosidade primária, com fluxo via interstícios de poros. Nos estratos imediatamente abaixo, de Solo de Alteração e Rocha Alterada Dura, constata-se estratigrafia mais horizontal e porosidade mista em virtude da presença

crescente de fraturas em maior profundidade. A unidade basal do modelo geológico (Rocha Sã) apresenta início em aproximadamente 30 metros abaixo da superfície topográfica e profundidade máxima identificada em antigos poços de captação (300 metros). Essa unidade é caracterizada pela predominância de porosidade secundária (fraturas), que permite o fluxo de água subterrânea, conforme confirmado por meio de perfilagens geofísicas e testes hidrogeológicos em dois antigos poços de captação (Hart et al., 2021). A extrapolação desses dados e a delimitação das plumas em meio fraturado apresentaram as maiores incertezas, por isso a modelagem da unidade geológica de Rocha Sã não é apresentada neste artigo.



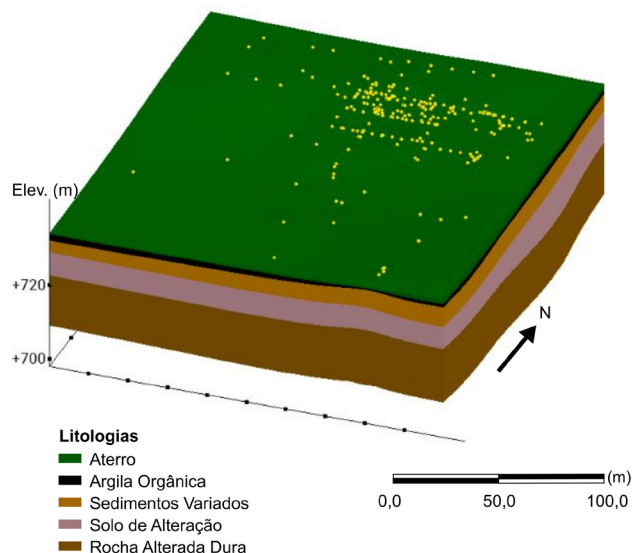


**Figura 5.** Localização das sondagens na área de estudo sobre mapa potenciométrico do nível freático (dados de 2019) com fluxo de água subterrânea predominante para sul (similar ao detectado em períodos anteriores e em outros níveis). A “Área de Detalhe” indica onde foram constatadas as plumas representadas na Figura 4.

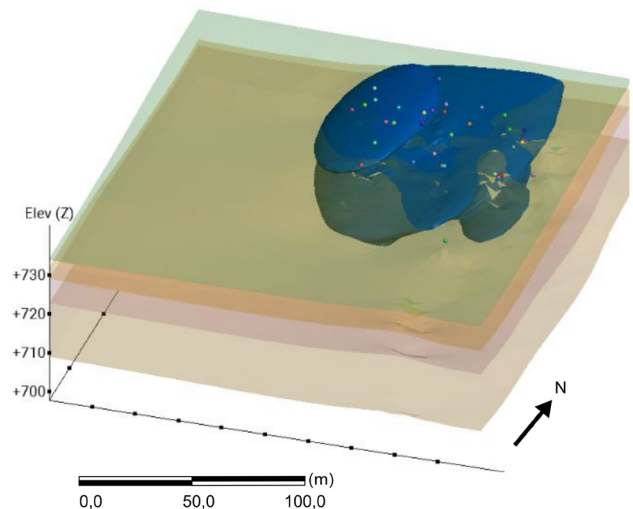
### Modelagem temporal de plumas de contaminantes

Plumas tridimensionais foram modeladas para cada campanha e substância química de interesse (1,2-DCA e PCE). Os modelos de plumas foram gerados com diversas opções de isoconcentração, incluindo valores de potabilidade, metas de remediação e ordens de grandeza (selecionadas para atender aos objetivos deste artigo). A superfície freática, definida em medição dos níveis de água, foi utilizada para delimitar a borda superior das plumas. A operação do *software* permitiu a visualização sobreposta dos modelos geológicos e de plumas, de modo a possibilitar a avaliação de detalhes dos impactos correlacionada com as distintas unidades (Figura 7). Além de rotações e variações na escala, foram ajustadas as cores e a transparência dos elementos para tentar facilitar a visualização da complexa geometria das plumas.

Os modelos das plumas das campanhas foram integrados de forma sequencial (com imagens sobrepostas ou adjacentes) a fim de permitir o detalhamento tridimensional e ao longo do Modelo Conceitual Temporal. Para a integração sequencial com sobreposição de imagens de cada contaminante, contou-se com recursos de edição de

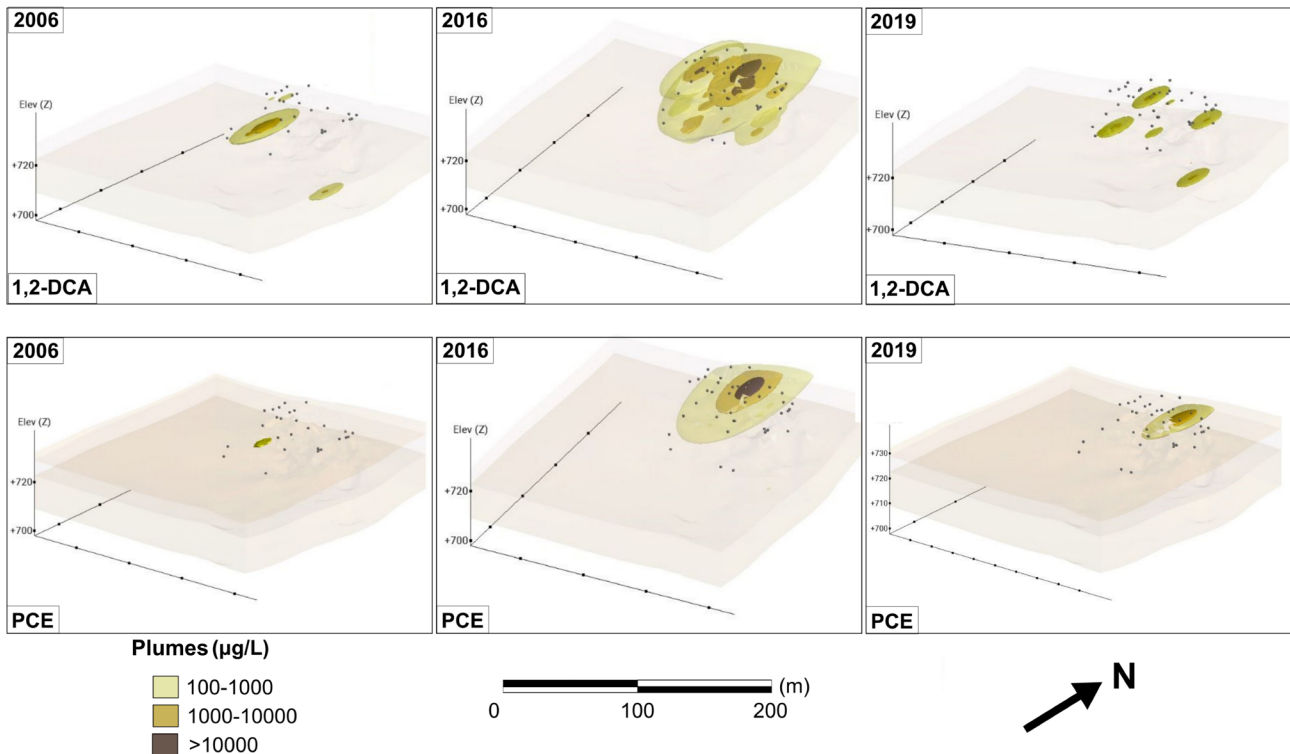


**Figura 6.** Modelo geológico tridimensional com definição de superfícies e da estratigrafia (acima da unidade geológica de Rocha Sã). Exagero vertical de 2x.



**Figura 7.** Exemplo de visualização de superfícies do modelo geológico (com transparência) conjugada com a pluma de 2016 para 1,2-DCA (em azul, com isoconcentração de 100 µg/L). Os pontos indicam localização em superfície de poços. O tom azul-claro indica impactos mais rasos (relacionados sobretudo à fonte interna). Nota-se a delimitação incompleta ao norte, em área de montante (parte da pluma relacionada com a fonte externa). Exagero vertical de 2x.

vídeo que permitem a rotação e a compilação dos modelos. Já a integração sequencial com imagens adjacentes foi concretizada pela distribuição de imagens estáticas dos modelos, como apresentado na Figura 8. Essa figura apresenta resultados para três campanhas, as quais foram



**Figura 8.** Exemplo de detalhamento tridimensional do Modelo Conceitual Temporal pela integração sequencial de superfícies geológicas e imagens adjacentes de plumas (PCE e 1,2-DCA). Nota-se aumento das plumas entre 2006, durante remediação inicial, e 2016, pós-complementação das investigações, seguido de diminuição em 2019 (pós-remediações complementares). O entendimento da área de montante, ao norte, aumentou em 2016, entretanto, a delimitação de parte da pluma (relacionada com fonte externa) mantinha-se incompleta. Exagero vertical de 2x.

selecionadas por ser consideradas mais representativas da evolução temporal da área: em 2006, durante a remediação inicial; em 2016, pós-complementação das investigações; e em 2019, pós-remediações complementares da área fonte interna e Plumias Combinadas.

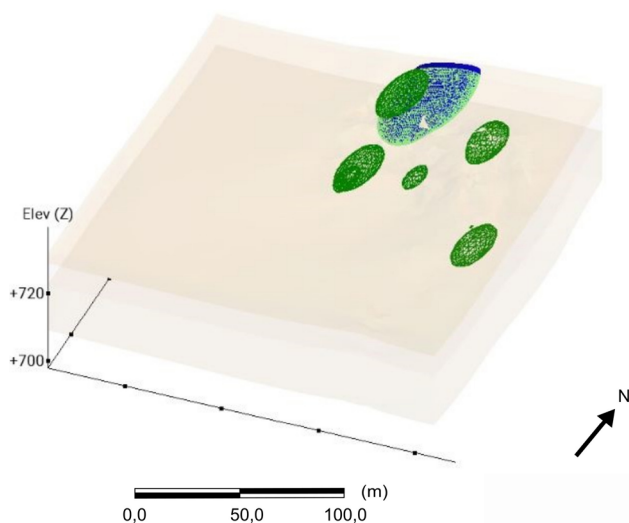
Os cenários modelados indicam alterações e aumentos localizados na geometria das plumas de contaminação até 2016. Essas mudanças podem estar associadas à evolução real das plumas, induzidas por processos, tais como o fluxo (natural e induzido) das águas subterrâneas e aportes de massa oriundos de múltiplas áreas-fontes ainda existentes. Outra possível explicação para essas mudanças é a variação nas instrumentações utilizadas nos monitoramentos. Entre 2000 e 2016, houve expansão espacial e incremento da quantidade de pontos de monitoramento (Tabela 2) que, comprovadamente, permitiu melhor delimitação das plumas e das áreas-fontes, incluindo o reconhecimento inicial de fonte externa, que teve início em 2015.

Com base em entendimentos mais claros e holísticos do cenário de contaminação, em 2016, foram iniciados novos sistemas de remediação: térmico (no segundo semestre de 2016 e no primeiro de 2017) e biorremediação (do primeiro semestre de 2016 até o primeiro de 2018). As ações

de remediação tiveram como objetivo eliminar a área fonte secundária interna (na camada de Argila Orgânica) e reduzir as concentrações das plumas associadas. Os resultados pós-remediação, incluindo novo estudo isotópico, confirmaram significativa redução na concentração e na extensão das plumas, nas áreas alvo de tratamento, no seu entorno e na área de jusante (Hart et al., 2022).

Entre 2016 e 2019, também se constatou diminuição do número de poços utilizados nas campanhas de monitoramento para patamar acima das campanhas anteriores a 2016 (Tabela 2). Essa alteração no número de instrumentações foi baseada no reconhecimento de poços considerados redundantes, portanto, não deve ter tido impacto significativo na definição da geometria das plumas de contaminantes.

Os modelos das Plumias Tridimensionais de PCE e 1,2-DCA também foram integrados pelo *software* para sobreposição de imagens dos dois contaminantes; sua visualização permitiu reconhecer locais com mistura das duas plumas (Figura 9). Essa forma de pluma misturada, associada com múltiplas áreas fontes, configura a existência de uma das situações características de Plumias Combinadas, como descritas anteriormente.



**Figura 9.** Exemplo de visualização de superfícies geológicas (com transparência), conjugadas com plumas de 2019 com isoconcentrações de 100 µg/L de PCE (azul) e 1,2-DCA (verde). As plumas sobrepostas na região ao norte indicam mistura das substâncias, presença de Plumas Combinadas (reduzidas pós-remediação) e delimitação incompleta a montante (parte da pluma relacionada com a fonte externa). Exagero vertical de 2x.

## CONCLUSÕES

Este estudo confirmou a importância do desenvolvimento de modelos conceituais claros e holísticos para se entender os desafios de áreas complexas. Foi abordada uma área contaminada localizada na Região Metropolitana de São Paulo, na qual foi aplicada modelagem implícita pelo uso do *software* Leapfrog Works® (Seequent) e algoritmo Fast RBF™. Os resultados obtidos neste estudo permitiram o detalhamento tridimensional e ao longo do Modelo Conceitual Temporal com confirmação de entendimentos discutidos por Hart et al. (2021, 2022) e Barbieri et al. (2022). A área de estudo apresentou desafios típicos de Áreas Complexas, tais como Plumas Combinadas com fontes em locais distintos, bem como desafios comuns no Brasil, a exemplo do extenso manto de intemperismo de rocha.

As estratégias de investigação e remediação da área se beneficiaram de conceitos preconizados no Gerenciamento Adaptativo, como o sucessivo aperfeiçoamento do modelo conceitual, a avaliação geral dos resultados, a definição de objetivos intermediários e a otimização das estratégias de remediação. Nesse contexto, foram ainda reconhecidas incertezas relacionadas à delimitação de fontes externas, bem como à complexidade de fluxo no meio fraturado.

No Brasil, possivelmente, existem muitos outros locais similares a essa área de estudo, com desafios técnicos e não técnicos que impedem o atendimento de objetivos em prazos típicos. Nesses casos, recomenda-se aplicar as estratégias

internacionais sobre Áreas Complexas (NRC, 2003, 2013; ITRC, 2017; Price et al., 2017), contemplando ainda adaptações e considerações locais, tais como:

- 1) Englobar na definição de Áreas Complexas aquelas contaminadas que, comprovadamente, apresentam desafios de alta complexidade e requerem mais tempo de ações contínuas de gerenciamento do que o tipicamente necessário para uma área ser reabilitada (estimativa atual aproximada de 15 anos em São Paulo e 20 anos nos EUA);
- 2) Considerar, dentre os desafios técnicos (de condições geológicas), extenso manto de intemperismo em regiões tropicais úmidas em virtude de sua alta heterogeneidade e controle da distribuição de contaminantes);
- 3) Ponderar, dentre os desafios técnicos (de condições hidrogeológicas) e não técnicos (de medidas institucionais), o bombeamento em poços de captação não cadastrados (por gerar incertezas sobre fluxo e contaminação, bem como dificuldade de gerenciamento);
- 4) Considerar, dentre os desafios não técnicos, os conflitos socioeconômicos, tais como aqueles relacionados com insegurança, exposição e ocupações irregulares em decorrência de instabilidade, riscos associados e dificuldade de diálogo);
- 5) Avaliar criteriosamente, inclusive com estudos isotópicos, eventuais plumas combinadas, uma vez que essa situação, possivelmente, é ignorada em diversas áreas do Brasil, e seu reconhecimento é essencial para o devido gerenciamento.

O reconhecimento de áreas complexas e o entendimento claro e holístico dos seus desafios, tais como Plumas Combinadas, com Modelos Conceituais Temporais, têm o potencial de auxiliar no gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil. O desenvolvimento de novos estudos e aplicações da modelagem implícita e do Gerenciamento Adaptativo também pode ser de grande valia para aumentar o entendimento e a confiança das partes interessadas. Dessa forma, os processos de tomada de decisões podem ser bem fundamentados e gerar resultados que permitam o progressivo atendimento dos objetivos intermediários e finais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à BASF e à Seequent o suporte na elaboração do presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

Barbieri, C., Martins, V., Oliveira, C., Hart, S. (2022). Isótopos forenses nas investigações de poluição ambiental Isótopos forenses. In: Nardoto, G., Mayrink, R., Barbieri, C., Costa, F. (eds.), *Isótopos Forenses*. Campinas: Millennium.

- Bertolo, R. (2017). *Bases Técnicas Para a Gestão de Áreas Contaminadas Por Solventes Organoclorados Em aquíferos fraturados*. Tese (Livre-Docência). São Paulo: Instituto de Geociências, USP. <https://doi.org/10.11606/T.44.2018.tde-16032018-095039>
- Bertossi, A. P. A., Menezes, J. P. C., Cecílio, R. A., Oliveira Garcia, G., Neves, M. A. (2013). Seleção e agrupamento de indicadores da qualidade de águas utilizando Estatística Multivariada. *Semina: Ciências Agrárias*, 34(5), 2025-2036. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n5p2025>
- Caumon, G., Gray, G., Antoine, C., Titeux, M. O. (2012). Three-dimensional implicit stratigraphic model building from remote sensing data on tetrahedral meshes: theory and application to a regional model of La Popa Basin, NE Mexico. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3), 1613-1621. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2207727>
- Conte, A., Chiaberge, S., Pedron, F., Barbaferri, M., Petruzzelli, G., Vocciante, M., Franchi E, Pietrini I. (2021). Dealing with complex contamination: A novel approach with a combined bio-phytoremediation strategy and effective analytical techniques. *Journal of Environmental Management*, 288, 112381. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112381>
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2017). *Decisão de diretoria nº 038/2017/c, de 07 fevereiro de 2017*. Procedimento para Gerenciamento de Áreas Contaminadas. CETESB. 65 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-038-2017-C.pdf>. Acesso em: 31 maio 2023.
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2023). *Relatório de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo*. CETESB. Disponível em: <https://mapas.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=28e7bb2238a443819447a8ec3ae4abe5>. Acesso em: 15 jan. 2023.
- Cowan, E. J., Beatson, R. K., Fright, W. R., McLennan, T. J., Mitchell, T. J. (2002). Rapid geological modelling. *Applied Structural Geology for Mineral Exploration and Mining International Symposium*. Extended Abstract. Austrália, p. 23-25. Disponível em: [http://www.orefind.com/docs/orefind-research-papers-in-pdf/rapid\\_geological\\_modelling.pdf](http://www.orefind.com/docs/orefind-research-papers-in-pdf/rapid_geological_modelling.pdf). Acesso em: 31 maio 2023.
- Cowan, E. J., Beatson, R. K., Ross, H. J., Fright, W. R., McLennan, T. J., Evans, T. R., Carr, J. C., Lane, R. G., Bright, D. V., Gillman, A. J., Oshurst, P. A., Titley, M. (2003). Practical implicit geological modelling. *5<sup>th</sup> International Mining Geology Conference*. Victoria, Austrália, p. 89-99. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/281685127\\_Practical\\_Implicit\\_Geological\\_Modelling](https://www.researchgate.net/publication/281685127_Practical_Implicit_Geological_Modelling). Acesso em: 31 maio 2023.
- D’Affonseca, F. M., Finkel, M., Cirpka, O. A. (2020). Combining implicit geological modeling, field surveys, and hydrogeological modeling to describe groundwater flow in a karst aquifer. *Hydrogeology Journal*, 28, 2779-2802. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02220-z>
- Dong, H., Xun, Y., Yoneda, M., Feng, L. (2021). Risk assessment of complex contaminated sites based on the fractional transformation of metals: Model development and a case study. *Science of The Total Environment*, 786, 147509. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147509>
- Elshall, A. S., Ye, M., Finkel, M. (2020). Evaluating two multi-model simulation-optimization approaches for managing groundwater contaminant plumes. *Journal of Hydrology*, 590, 125427. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125427>
- Fasshauer, G. E. (2007). *Meshfree approximation methods with MATLAB* (v. 6). Danders: World Scientific Publishing. <https://doi.org/10.1142/6437>
- Gatsios, E., García-Rincón, J., Rayner, J. L., McLaughlan, R. G., Davis, G. B. (2018). LNAPL transmissivity as a remediation metric in complex sites under water table fluctuations. *Journal of Environmental Management*, 215, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.026>
- Guo, J., Wang, X., Wang, J., Dai, X., Wu, L., Li, C., Jessell, M. (2021). Three-dimensional geological modeling and spatial analysis from geotechnical borehole data using an implicit surface and marching tetrahedra algorithm. *Engineering Geology*, 284, 106047. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106047>
- Harclerode, M. A., Macbeth, T. W., Miller, M. E., Gurr, C. J., Myers, T. S. (2016). Early decision framework for integrating sustainable risk management for complex remediation sites: Drivers, barriers, and performance metrics. *Journal of Environmental Management*, 184(Part 1), 57-66. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.087>
- Hart, S. T. (2019). Desafios Técnicos: Monitoramento. *XV Painel de Debates Sobre Gerenciamento de Áreas Contaminadas: Desafios e Responsabilidades no Atingimento das Metas de Remediação*. São Paulo: Senac/Aesas.

- Hart, S. T., Alves, F. M., Cho, J. (2007). Conceptual Model of Tropically Weathered and Fractured Crystalline Bedrock and its Implications for In Situ Chemical Oxidation. *U.S. EPA/NGWA Fractured Rock Conference: State of the Science and Measuring Success in Remediation*, Portland, Main, p. 357-369. Disponível em: <https://clu-in.org/products/siteprof/2007fracrock/053Hart,S.pdf>. Acesso em: 31 maio 2023.
- Hart, S. T., Bertolo, R. A., Agostini, M., Feig, R., Barbosa, M., Lojkasek-Lima, P. (2021). Temporal conceptual model of contaminated complex sites applied for the management of a former supply well area in tropically weathered bedrock. *Sustainable Water Resources Management*, 7, 11. <https://doi.org/10.1007/s40899-021-00488-x>
- Hart, S. T., Bertolo, R. A., Agostini, M. S., Feig, R., Lojkasek-Lima, P., Gouvea Jr., J. C. R., Barreto, F. S., Aravena, R. (2022). Hydrogeochemical and isotopic evaluation of VOC commingled plumes in a weathered fractured bedrock aquifer treated with thermal and bioremediation. *Journal of Contaminant Hydrology*, 245, 103940. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103940>
- ITRC – Interstate Technology Regulatory Council (2017). *Remediation Management of Complex Sites*. ITRC. Disponível em: <https://rmcs-1.itrcweb.org/>. Acesso em: 15 jul. 2022.
- Kikuda, A. T. (2022). *Uso da função distância na modelagem geométrica de corpos de minério e proposta da distância estratigráfica aplicada ao cálculo de variogramas experimentais*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, USP. <https://doi.org/10.11606/T.44.2022.tde-18112022-095005>
- Kresic, N., Mikszewski, A. (2013). *Hydrogeological Conceptual Site Models: Data Analysis and Visualization*. Nova York: CRC Press.
- Lojkasek-Lima, P. (2018). *Caraterização de Detalhe do Perfil Vertical de Contaminação em Aquífero Cristalino Alterado: Aplicação da Metodologia “Discrete Fracture Network” (DFN) – Jurubatuba, São Paulo*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, USP. <https://doi.org/10.11606/T.44.2018.tde-03082020-112622>
- Marryott, R. A., Sabadell, G. P., Ahlfeld, D. P., Harris, P. H., Pinder, G. F. (2000). Allocating Remedial Costs at Superfund Sites with Commingled Groundwater Contaminant Plumes. *Environmental Forensics*, 1(1), 47-54. <https://doi.org/10.1006/enfo.1999.0006>
- Moraes, S. L., Teixeira, C. E., Maximiano, A. M. S. (eds.) (2014). *Guia de elaboração de planos de intervenção para o gerenciamento de áreas contaminadas*. São Paulo: IPT e BNDES.
- NJ DEP – New Jersey Department of Environmental Protection (2017). *Commingled Plume Technical Guidance Document*, v. 1. Nova Jérsei: NJ DEP. 105 p. Disponível em: [https://www.nj.gov/dep/srp/guidance/archive/commingled\\_plume\\_guidance\\_v1\\_0\\_201704.pdf](https://www.nj.gov/dep/srp/guidance/archive/commingled_plume_guidance_v1_0_201704.pdf). Acesso em: 31 maio 2023.
- NRC – National Research Council (2003). *Environmental Cleanup at Navy Facilities: Adaptive Site Management*. Washington, D.C.: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/10599>
- NRC – National Research Council (2013). *Alternatives for Managing the Nation’s Complex Contaminated Groundwater Sites: Committee on Future Options for Management in the Nation’s Subsurface Remediation Effort*. Washington, D.C.: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/14668>
- Pereira, P. E. C., Rabelo, M. N., Ribeiro, C. C., Diniz-Pinto, H. S. (2017). Geological modeling by an indicator kriging approach applied to a limestone deposit in Indiara city, Goiás. *REM, International Engineering Journal*, 70(3), 331-337. <https://doi.org/10.1590/0370-44672016700113>
- Price, J., Spreng, C., Hawley, E. L., Deeb, R. (2017). Remediation management of complex sites using an adaptive site management approach. *Journal of Environmental Management*, 204(Part 2), 738-747. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.009>
- Sale, T., Newell, C. (2011). *A Guide for Selecting Remedies for Subsurface Releases of Chlorinated Solvents*. EUA: Department of Defense Environmental Security Technology Certification Program (ESTCP). 134 p. Disponível em: [https://clu-in.org/download/contaminantfocus/dnapl/treatment\\_technologies/dnapl-er-200530-dg.pdf](https://clu-in.org/download/contaminantfocus/dnapl/treatment_technologies/dnapl-er-200530-dg.pdf). Acesso em: 31 maio 2023.
- Schultz, A. C. (2001). The Conceptual Site Model — Not Just Another Pretty Face, Technical developments. *Environmental Claims Journal*, 13(3), 113-120. <https://doi.org/10.1080/10406020109355177>
- Seequent (2017). *User Manual for Leapfrog Works*. Seequent, 750 p. Disponível em: <https://help.seequent.com/Works/3.1/en-GB/LeapfrogWorksUserManual.pdf>. Acesso em: 16 out. 2022.
- Seequent (2020). *Comparing leapfrog radial basis function and kriging*. Seequent. Disponível em: <https://www.seequent.com/comparing-leapfrog-radial-basis-function-and-kriging/>. Acesso em: 25 abr. 2021.

Teixeira, C. E., Motta, F. G., Moraes, S. L. (2016). *Panorama do setor de gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil*. São Paulo: IPT. Disponível em: [http://www.ipt.br/centros\\_tecnologicos/CTGeo/livros/60-panorama\\_do\\_setor\\_de\\_gerenciamento\\_de\\_areas\\_contaminadas\\_no\\_brasil.htm](http://www.ipt.br/centros_tecnologicos/CTGeo/livros/60-panorama_do_setor_de_gerenciamento_de_areas_contaminadas_no_brasil.htm). Acesso em: 31 maio 2023.

Teixeira, L. G. P., Abreu, A. E. S. (2018). Aplicação da Análise Isotópica de Composto Específico (Técnica CSIA) em Perícias Ambientais para Distinguir Diferentes Fontes de Contaminação. *Revista do Instituto Geológico*, 39(1), 31-41. <https://doi.org/10.5935/0100-929X.20180003>

Vaz, L. F. (1996). Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais. *Revista Solos e Rochas*, 19(2), 117-136.

Vogel, C. (2015). *Defense Environmental Restoration Program (DERP) Study*. Presentation to the Interstate Technology & Regulatory Council Remediation Management of Complex Sites (RMCS) Team.

Vollgger, S. A., Cruden, A. R., Ailleres, L., Cowan, E. J. (2015). Regional dome evolution and its control on ore-grade distribution: Insights from 3D implicit modelling of the Navachab gold deposit, Namibia. *Ore Geology Reviews*, 69, 268-284. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.02.020>

Zhong, D., Wang, L., Lin, B., Jia, M. (2019). Implicit modelling of complex orebody with constraints of geological rules. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(11), 2392-2399. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)65145-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)65145-9)