

GEOLOGIA RAIZ

“A simplicidade é o
mais alto grau de
sophistication.”
Leonardo da Vinci
(1452-1519)

No 5º Simpósio de Biorremediação e Tecnologias Ambientais Sustentáveis organizado pela Battelle, em Baltimore, EUA, em abril de 2019, ocorreu uma importante reflexão sobre a importância da geologia em processos de remediação. Em um painel de discussões com o título de “Geologia de Remediação: O Crescente Papel da Geologia em Remediações Bem-sucedidas”, com a participação de diversos profissionais com experiência na área, destacando o professor John Cherry, da Universidade de Guelph e Herb Levine, da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (Usepa), o termo “Geologia de Remediação” foi apresentado, discutido e reconhecido como um novo paradigma, sendo um aspecto fundamental para o desenvolvimento de modelos conceituais mais convincentes e por consequência, uma etapa de estudo absolutamente necessária para que se possa atingir com sucesso os objetivos de um processo de remediação.

Atualmente, as etapas de investigação e remediação de áreas contaminadas já conseguem usar tecnologias extremamente avançadas de forma eficiente, como, análises isotópicas de contaminantes, ferramentas moleculares de análise do DNA de micro-organismos e integrações com *big data*. Por outro lado, a heterogeneidade dos aquíferos permanece sendo o grande desafio para o sucesso dos projetos e a boa e velha geologia continua sólida como uma rocha ígnea, representando o principal componente para a elaboração do modelo conceitual de uma área contaminada.

Estudos organizados pela Usepa em áreas do *Superfund*, nos Estados Unidos, buscaram entender os motivos pelos quais diversos projetos de remediação não estavam sendo bem-sucedidos e quais eram as características comuns dessas áreas com problemas que dificultavam o atingimento das metas de remediação. Uma conclusão importante da Usepa é que nas áreas avaliadas cerca de 90% do transporte da massa de contaminantes na água subterrânea ocorria em camadas que representavam apenas 10% de toda a zona saturada, ou seja, a geologia era um fator preponderante para o transporte de massa e por consequência, também o principal fator para fundamentar o projeto de remediação e as tecnologias a serem adotadas.

A partir desses estudos a Usepa propôs uma importante mudança de paradigma, reforçando que tanto os modelos conceituais de áreas contaminadas como também as estratégias de remediação devem usar a geologia como fundamento de base. A recomendação de revisar os modelos conceituais aplicados inicialmente nessas áreas não necessariamente

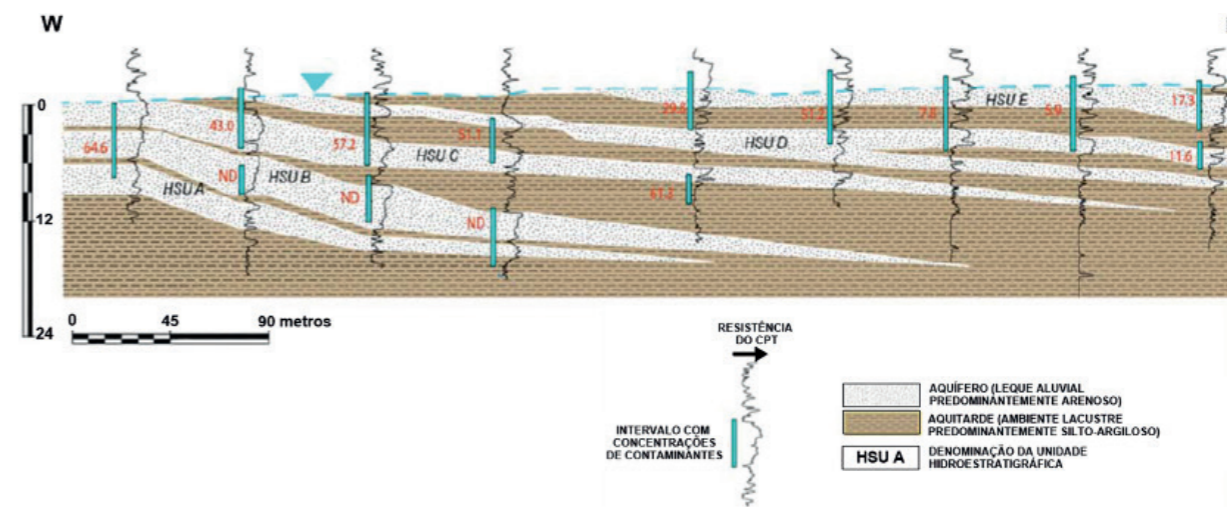


Figura 1 - Seção estratigráfica com sondagens CPT mostrando depósitos arenosos na zona saturada originados em leques aluviais, com mergulho para leste. (Adaptado de Usepa, 2017 - *Best Practices for Environmental Site Management: A Practical Guide for Applying Environmental Sequence Stratigraphy to Improve Conceptual Site Models*).

precisa de novos dados, mas efetivamente necessita de uma reavaliação dos dados existentes, contemplando uma visão mais ampla da geologia regional e também uma análise estratigráfica detalhada aplicada à área de interesse. Pode-se dizer que a Usepa fez uso bastante eficiente da expressão americana *back-to-basics*, e resgatou a tradicional geologia básica, ou como se diz hoje em dia, a “geologia raiz”, descobrindo que ela é um sólido pilar de sustentação para os projetos de remediação.

Nesse artigo tentamos ir além. Concordamos que uma análise estratigráfica de detalhe seja fundamental, principalmente em aquíferos sedimentares porosos. Conceitos como fácies, depósitos aluvionares, planícies de inundação, discordâncias e relações de conformidade precisam ser revisitados e entendidos especificamente para a área contaminada que se pretende remediar. Mas em casos onde a contaminação está relacionada a aquíferos fraturados é também de extrema importância que sejam revisitados os principais condicionantes da geologia regional, no contexto mais amplo da evolução geotectônica, e da geologia estrutural, com a análise de dobramentos, falhas e fraturas, tanto em escala macro como micro, aplicada diretamente à área contaminada, com o objetivo de permitir uma compreensão mais adequada das variáveis que influenciam o fluxo de água subterrânea e o transporte de contaminantes.

Em outras palavras, a precisão no desenvolvimento do modelo conceitual hidrogeológico é fundamental para o atendimento satisfatório do objetivo de qualquer projeto. A complexidade e os aspectos quantitativos de cada modelo conceitual variam amplamente de acordo com os objetivos de cada projeto e das etapas de investigação. A qualidade do modelo conceitual irá depender da habilidade da equipe de projeto de reunir informações realmente relevantes para o problema em questão, considerando diferentes escalas e fontes, e na sua associação de forma adequada com as informações específicas coletadas na área. Outro aspecto muito importante do modelo conceitual é o entendimento do seu caráter dinâmico. Nas fases iniciais de um projeto é possível obter dois ou três modelos conceituais prelimi-



Foto: Arquivo Fiesp

Pedro Dib
Geólogo, diretor da SANIFOX Brasil
Com a colaboração de Douglas Avila Pascoal, geólogo e modelador matemático da HYDROFLOW; e Paulo Henrique Santos, geólogo e Managing Partner da ERM Brasil

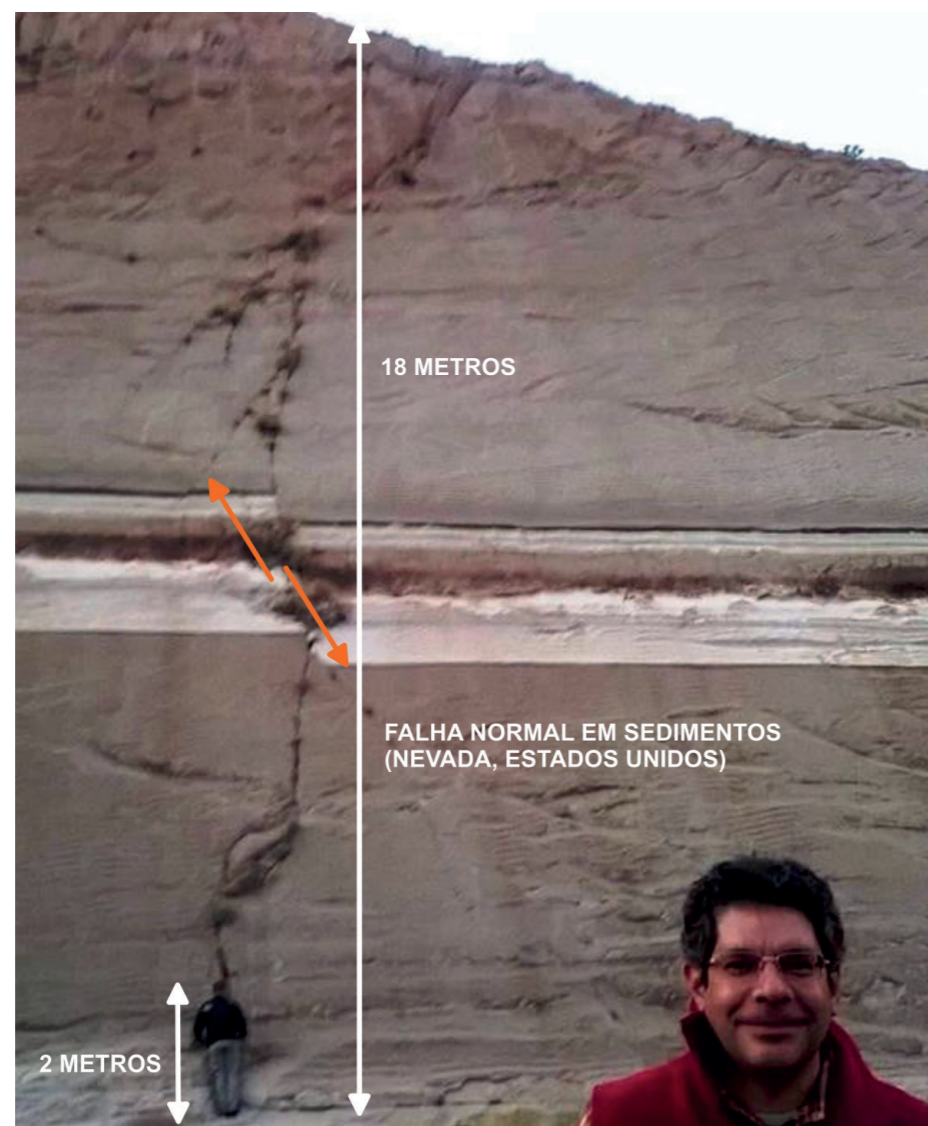


Foto: Paulo Henrique Santos

Figura 2 - Elementos de geologia estrutural sendo analisados pelos geólogos Douglas Pascoal, Paulo Santos e Pedro Dib (na foto). Eles estão no entorno de Las Vegas, Nevada, nos Estados Unidos

nares que competem entre si durante a evolução do conhecimento da área. No desenvolvimento do projeto e coleta de dados, os modelos conceituais auxiliam nos planos de investigação e na definição de incertezas, concentrando os esforços da equipe em soluções factíveis para cada projeto; seja a construção de um poço de abastecimento ou um sistema de biorremediação.

MUDANÇA DE PARADIGMAS

É também uma característica fundamental do modelo conceitual a capacidade de demonstrar dados complexos de forma compreensiva e realista. Os geólogos desde sempre fizeram uso de desenhos e modelos em 3D em suas cader-

netas de campo, mas hoje as ferramentas são diferentes. As tecnologias de visualização espacial nos permitem criar rapidamente centenas de vistas multidimensionais de uma área, considerando múltiplos parâmetros dentro de um formato interativo. A visualização da distribuição e a interação de diversos parâmetros no contexto geoespacial, proporcionam uma excelente forma de aprimorar e testar o entendimento dos modelos conceituais, bem como ilustrar de forma compreensiva inúmeros contextos complexos. Dentre os programas comumente utilizados podemos citar o MVS/ EVS PRO da CTech, o ArcGIS 3D Analyst da ESRI, o RockWorks da RockWare e o Earth Vision da Dynamic Graphics.

Há casos práticos recentes onde áreas contaminadas que foram intensivamente investigadas e com processos de remediação em andamento apresentaram limitações na evolução do projeto. Nestes casos foi tomada a decisão de uma profunda revisão de seus modelos conceituais, com foco em uma compreensão mais detalhada dos condicionantes relacionados à geologia básica, nossa geologia raiz, e suas relações com a contaminação, com o objetivo de definir técnicas mais adequadas para dar continuidade de forma mais eficiente à remediação. A integração de um enorme volume de dados históricos com informações mais recentes obtidas com ferramentas de alta resolução para caracterização geológica e hidrogeológica e a visualização adequada de todos esses dados foram a chave fundamental no processo de revisão da área com o olhar geológico.

O investimento realizado nestes casos concretos com essa abordagem mostrou excelentes resultados. A robustez das informações organizadas com o foco adequado teve papel importante para que as equipes de engenharia pudessem definir ajustes ou redirecionamentos no processo de remediação.

A publicação americana "Alternatives for Managing the Nation's Complex Contaminated Groundwater Sites" (National Research Council, 2013) apresenta uma importante correlação entre áreas contaminadas e complexidades específicas da geologia de cada área. Pelo menos 126.000 áreas contaminadas nos Estados Unidos ainda apresentam concentrações de contaminantes que impedem que a área seja considerada remediada, destacando que esse número total de áreas foi considerado como subestimado. Cerca de 10% do total, ou seja, aproximadamente 12.000 áreas são consideradas como "áreas complexas", definidas como complexas em função das limitações inerentes aos processos de remediação, que por sua vez são limitados em função das heterogeneidades geológicas (sendo as áreas com aquíferos fraturados as mais heterogêneas), da distribuição da contaminação e do tipo de contaminante. Apesar de todos os avanços tecnológicos que já são aplicados nas etapas de investigação e remediação, estima-se que mesmo considerando o período de tempo entre 50 e 100 anos, essas áreas contaminadas complexas provavelmente não serão completamente remediadas.

Os diagnósticos dos problemas das áreas contaminadas já estão bem definidos e os desafios para resolver esses problemas são reais e urgentes. Os avanços tecnológicos contribuem de forma bastante clara, mas vale sempre a pena fazer uma reflexão sobre o conhecimento que já foi desenvolvido no passado e fazer uso eficiente de tudo que já foi descoberto e estudado. Os modelos atuais de remediação de áreas contaminadas foram desafiados. O paradigma parece estar realmente mudando com um novo olhar do conhecimento que já existe, para o que é definido como geologia básica, ou melhor dizendo, geologia raiz. ■