

## Técnicas de resposta rápida e investigação de alta resolução

Leandro Gomes Freitas

*Palestra apresentada no curso on-line da ABGE: Investigações  
geoambientais de áreas contaminadas: planejamento,  
técnicas e procedimentos. 127 slides.*

A série “Comunicação Técnica” compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública. **PROIBIDO REPRODUÇÃO**

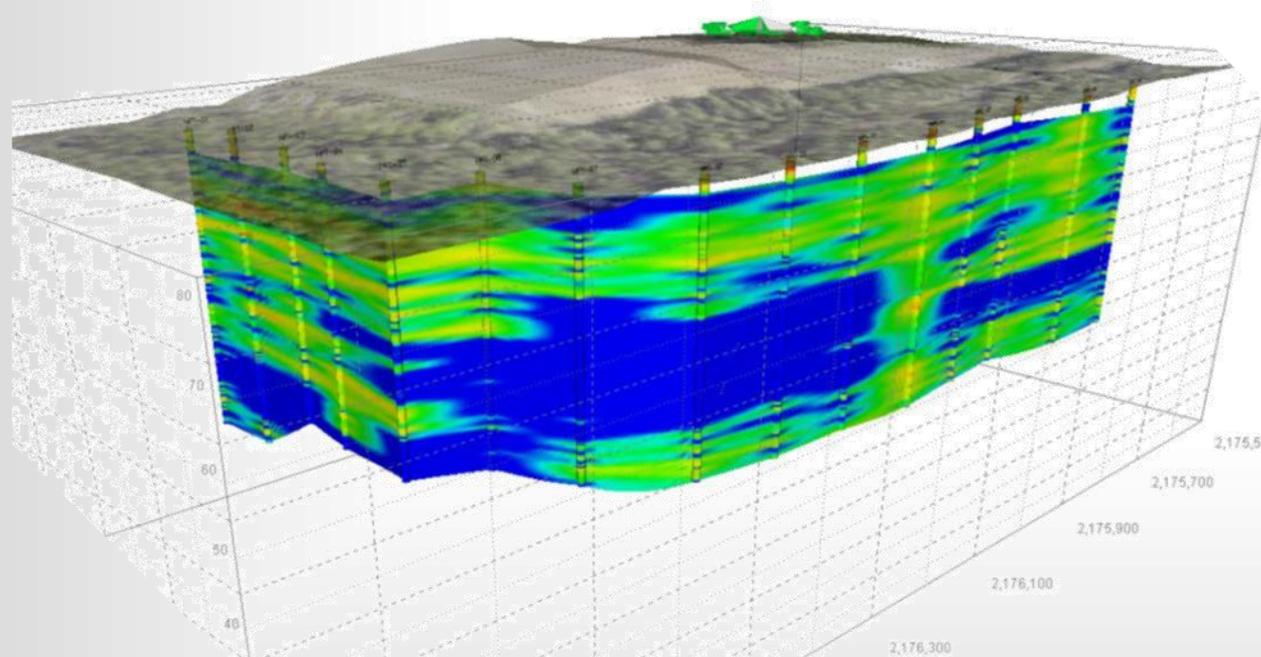
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo  
S/A - IPT  
Av. Prof. Almeida Prado, 532 | Cidade Universitária ou  
Caixa Postal 0141 | CEP 01064-970  
São Paulo | SP | Brasil | CEP 05508-901  
Tel 11 3767 4374/4000 | Fax 11 3767-4099

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)



**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE  
GEOLOGIA DE ENGENHARIA  
E AMBIENTAL**

## INVESTIGAÇÕES GEOAMBIENTAIS DE ÁREAS CONTAMINADAS: PLANEJAMENTO, TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS



# Técnicas de resposta rápida e investigação de alta resolução

Eng. Leandro Gomes de Freitas

[lfreitas@ipt.br](mailto:lfreitas@ipt.br)

17/10/2024



- Engenheiro Ambiental e MSc. em Geociência & Meio Ambiente (UNESP);
- Especialista em Gerenciamento de Áreas Contaminadas (SENAC, 2010);
- Atuo na área desde 2008;
- + 5 anos em consultorias ambientais e 11 anos no IPT;
- Experiência na execução e gerenciamento de projetos de investigação e remediação ambiental;
- Palestrante de cursos e programas de pós-graduação relacionados ao gerenciamento ambiental desde 2016;
- Atualmente é pesquisador do Núcleo de Sustentabilidade e Baixo Carbono (NUSCARBON) do IPT



# Sumário

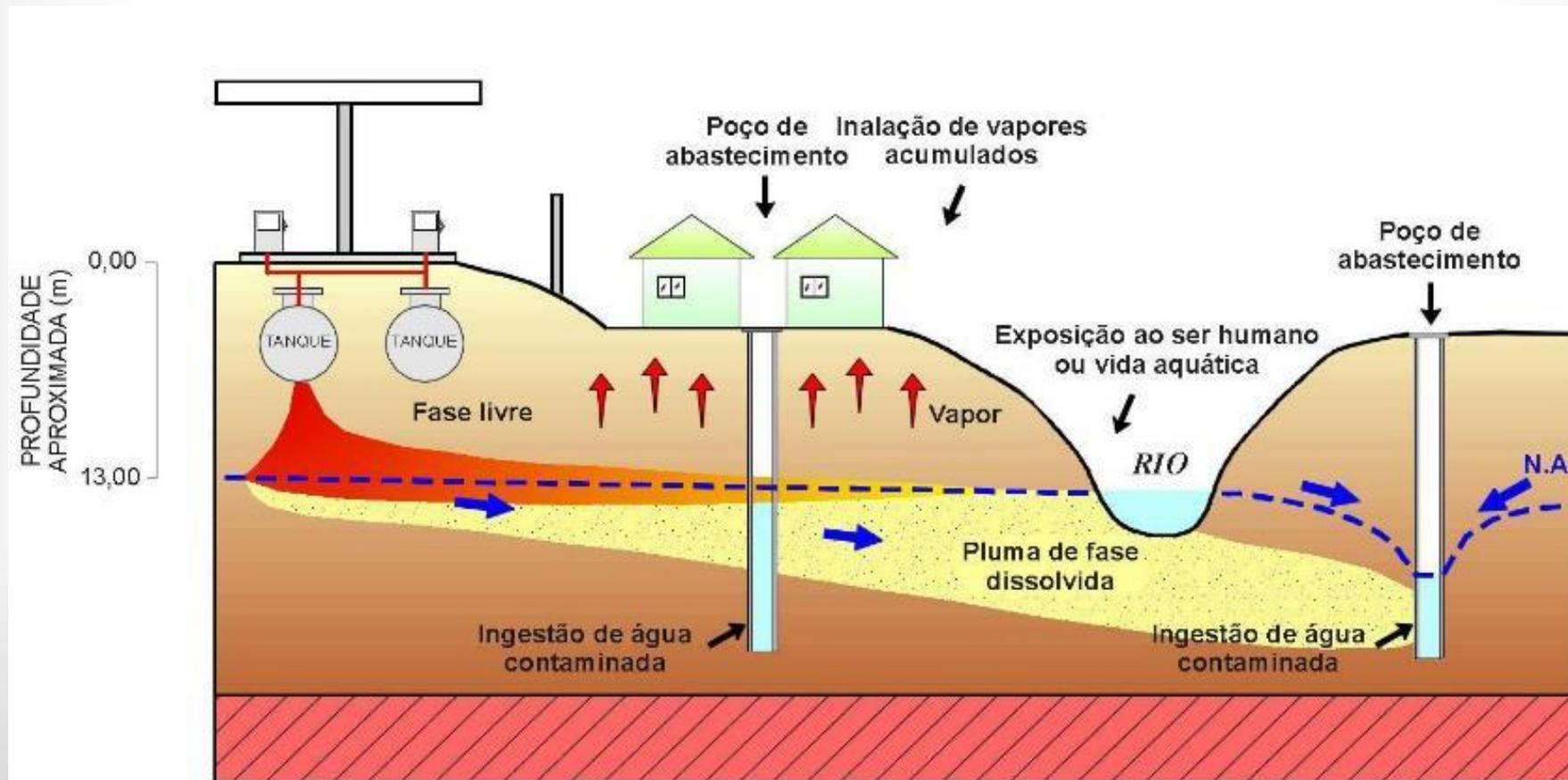
- Métodos tradicionais de investigação e Incertezas do MCA
- Abordagem da investigação de alta resolução (HRSC)
- Novos paradigmas do GAC
- Representação gráfica e modelos 3D e 4D

## INTERVALO

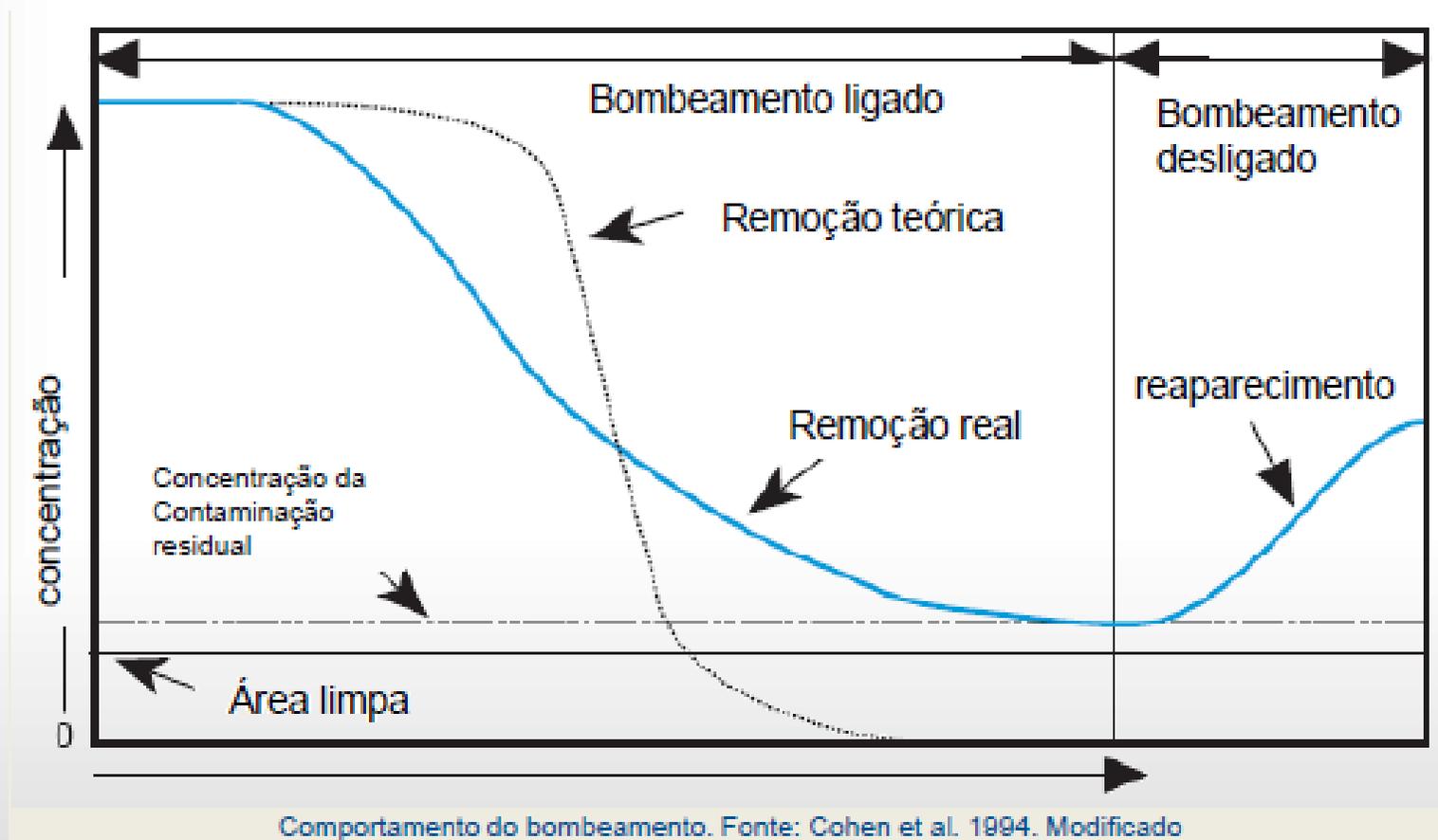
- Técnicas de varredura e resposta rápida (screening)
- Principais técnicas de HRSC para caracterização hidroestratigráfica;
- Principais técnicas de HRSC para caracterização dos contaminantes;
- Combinação de técnicas;
- Estudos de caso

## Modelo Conceitual da Inv. Detalhada (MCA 3)

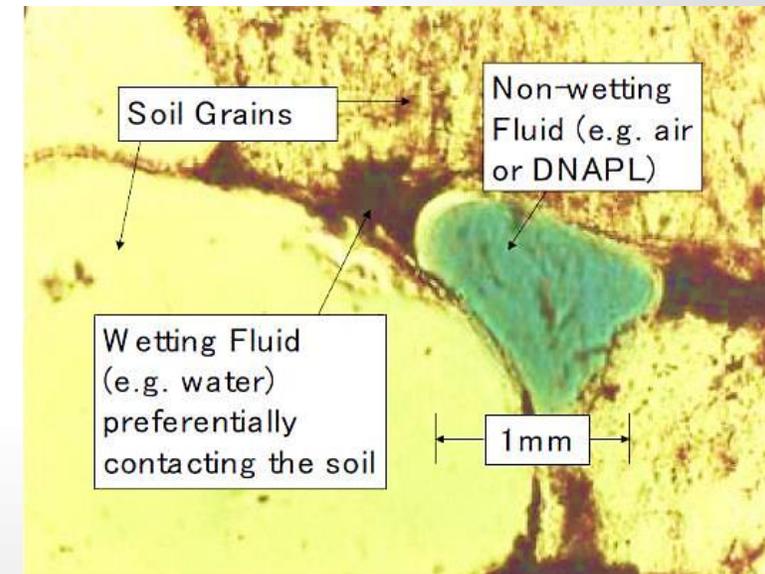
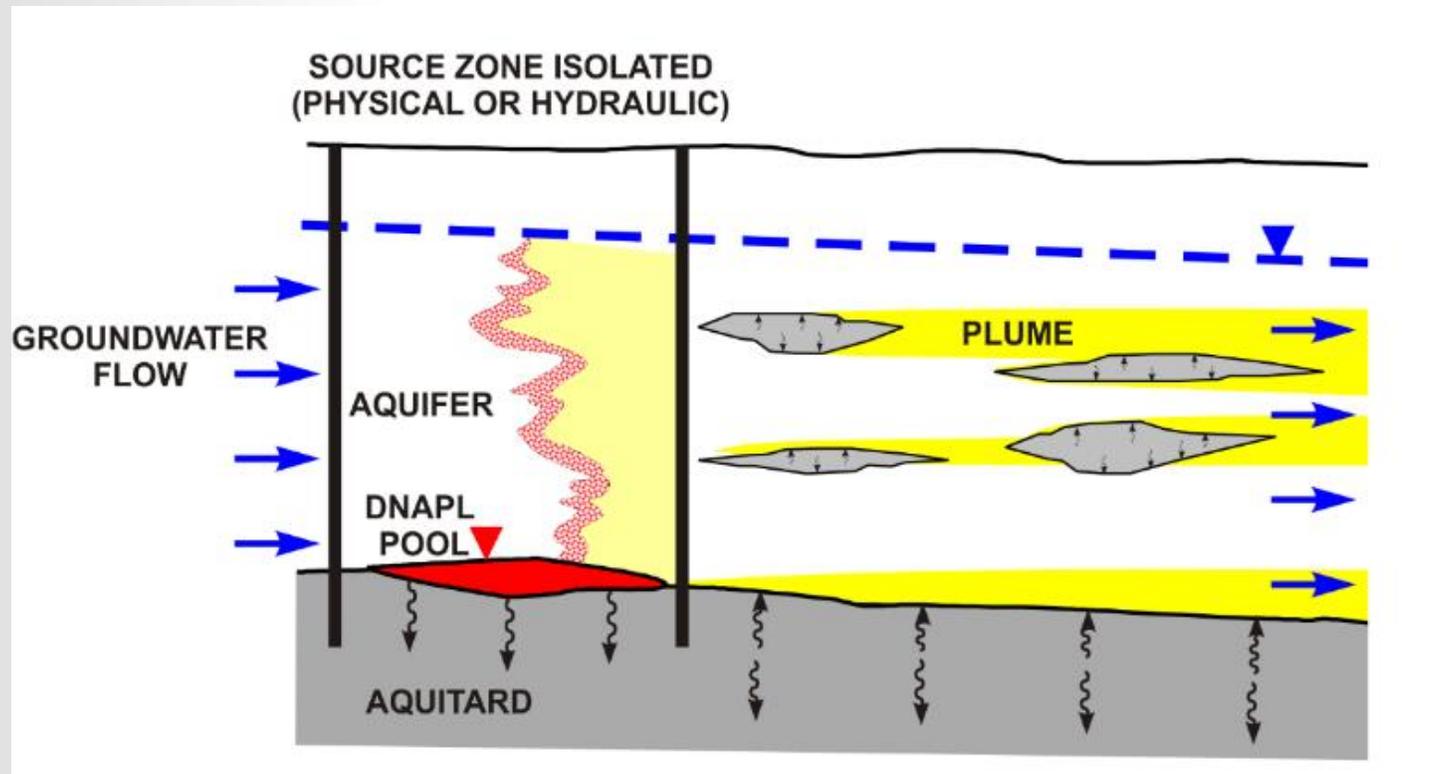
### Representação Gráfica (Detalhada?)



# Por que tantos projetos de remediação falharam?



# “Rebound”? “back diffusion”?

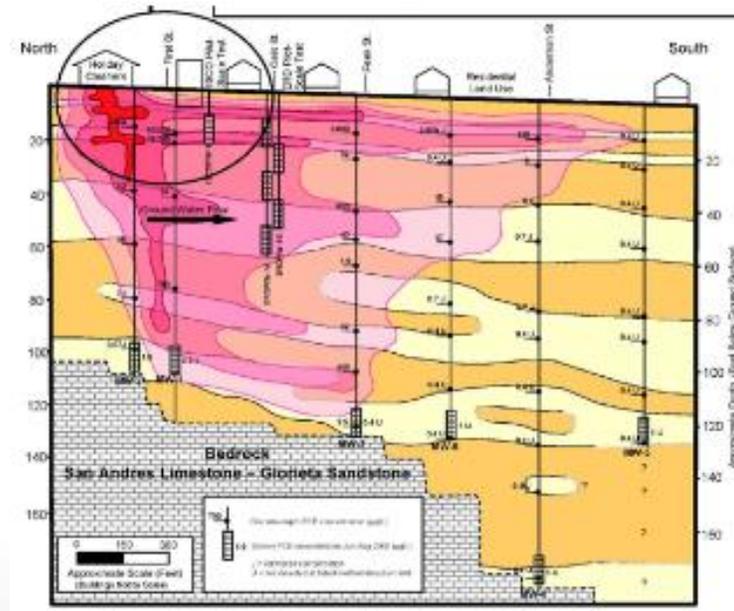


Steve Chapman –University of Guelph

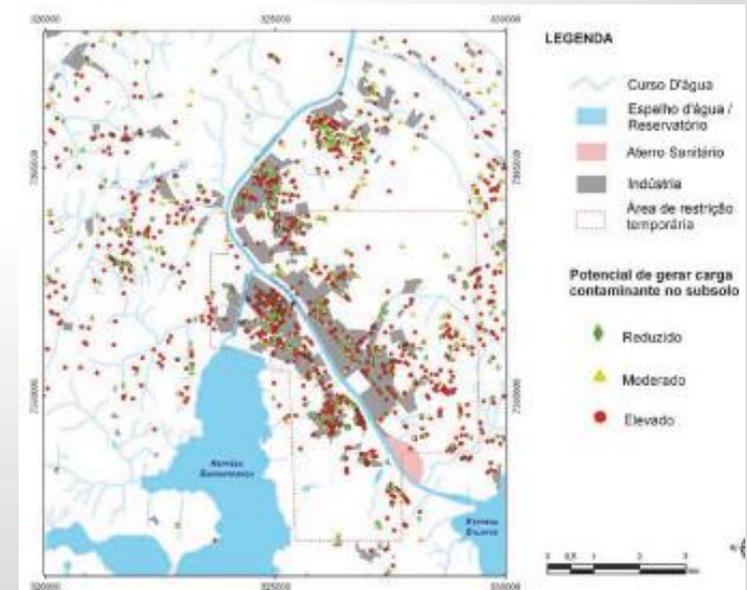
## Heterogeneidades do subsolo



## Contaminações complexas

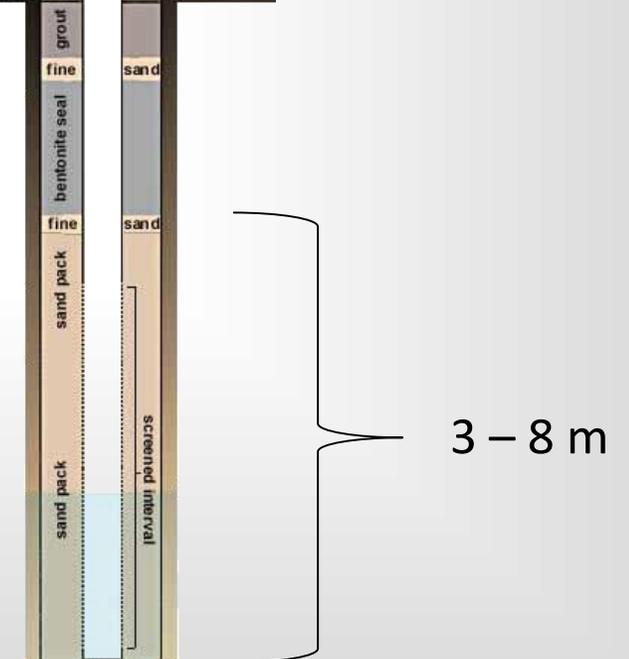
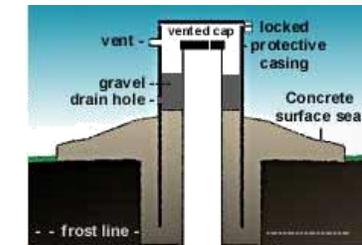
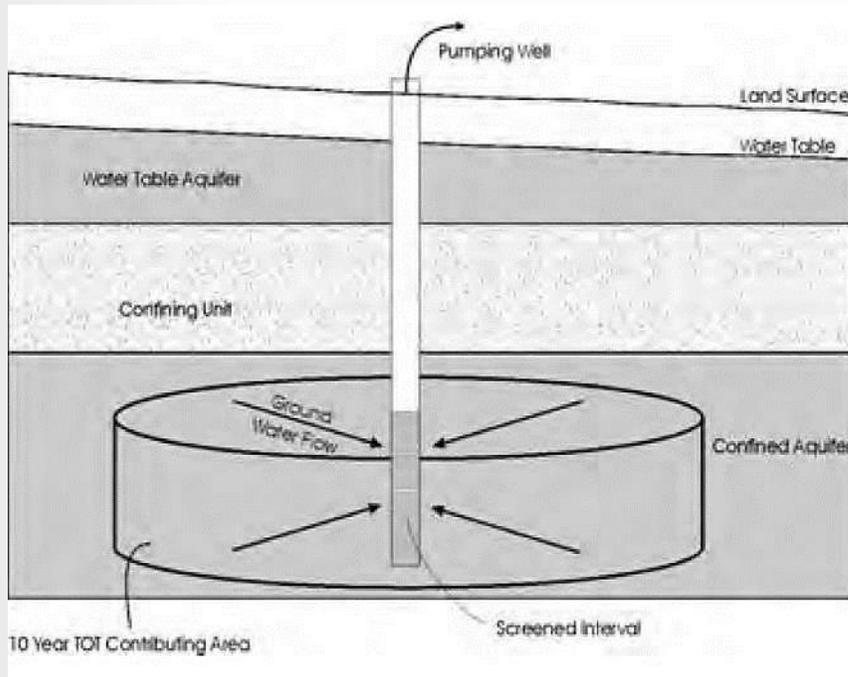


## Fontes de contaminação diversas



# Perspectiva histórica – Técnicas de exploração de águas subterrâneas

Poços de monitoramento com seção filtrante longa

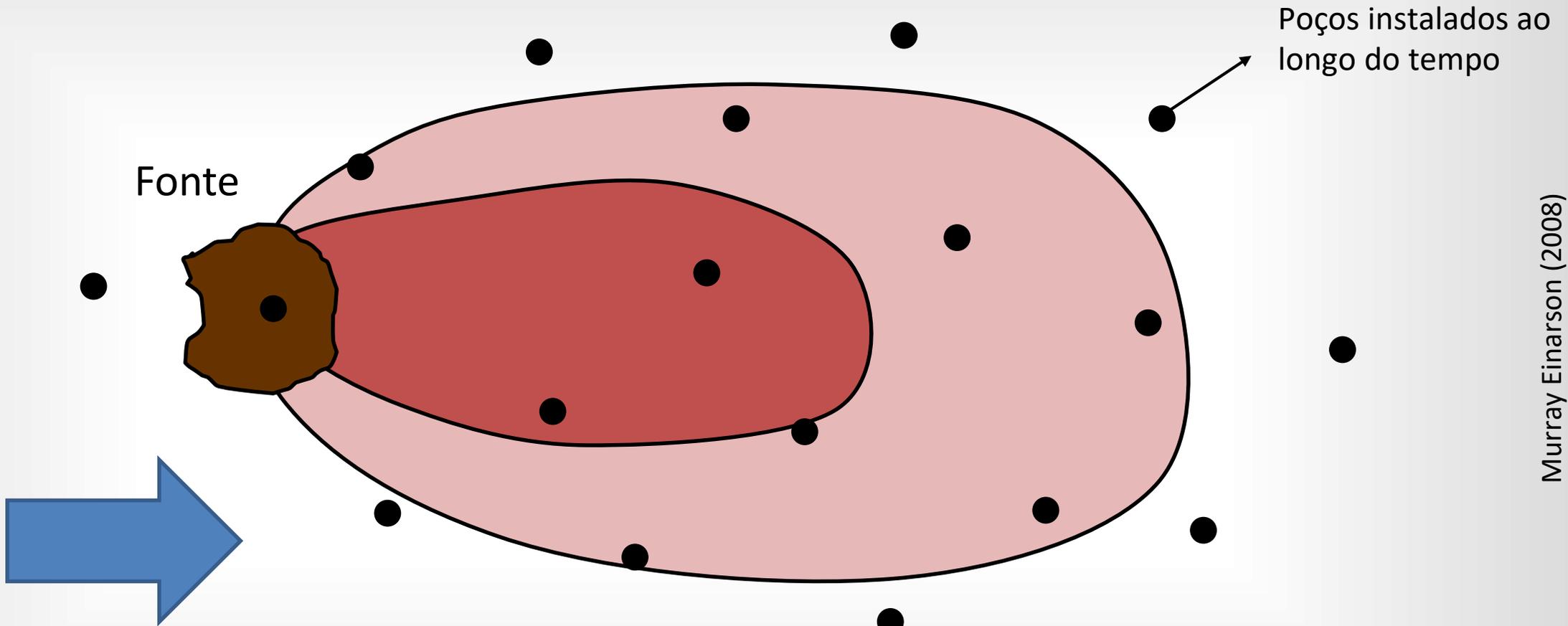


Premissas: aquíferos homogêneos; isotrópico; com extensão infinita;  
Tratada como uma única entidade em massa: Transmissividade ; armazenamento;  
“Quanta água podemos extrair?”





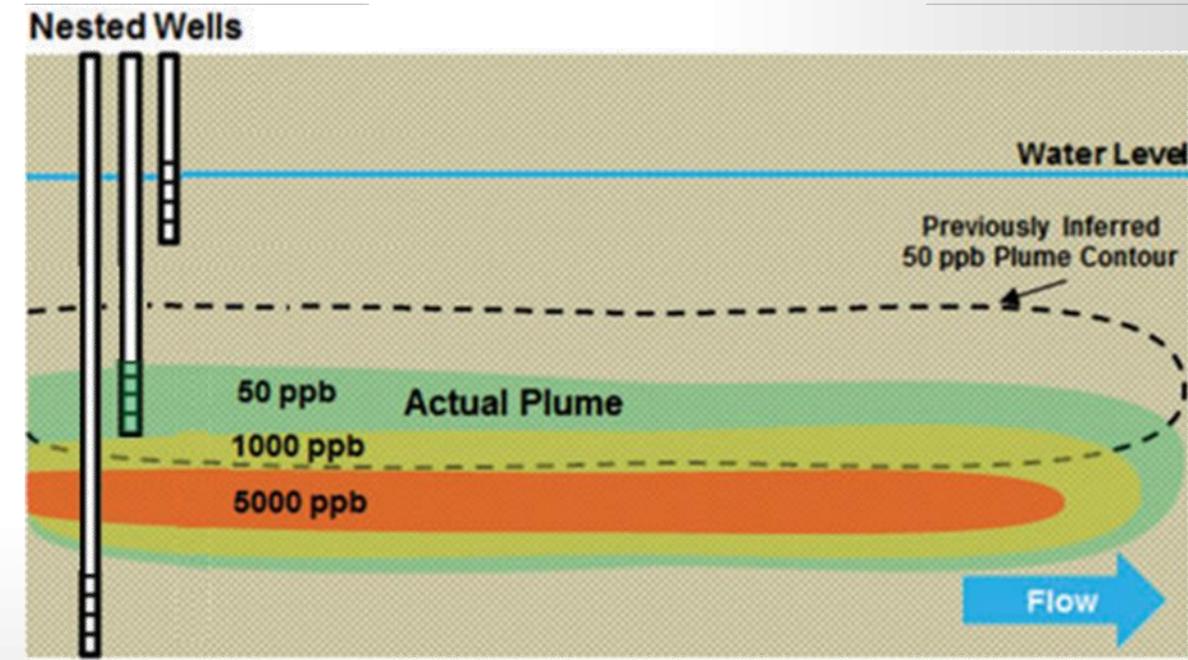
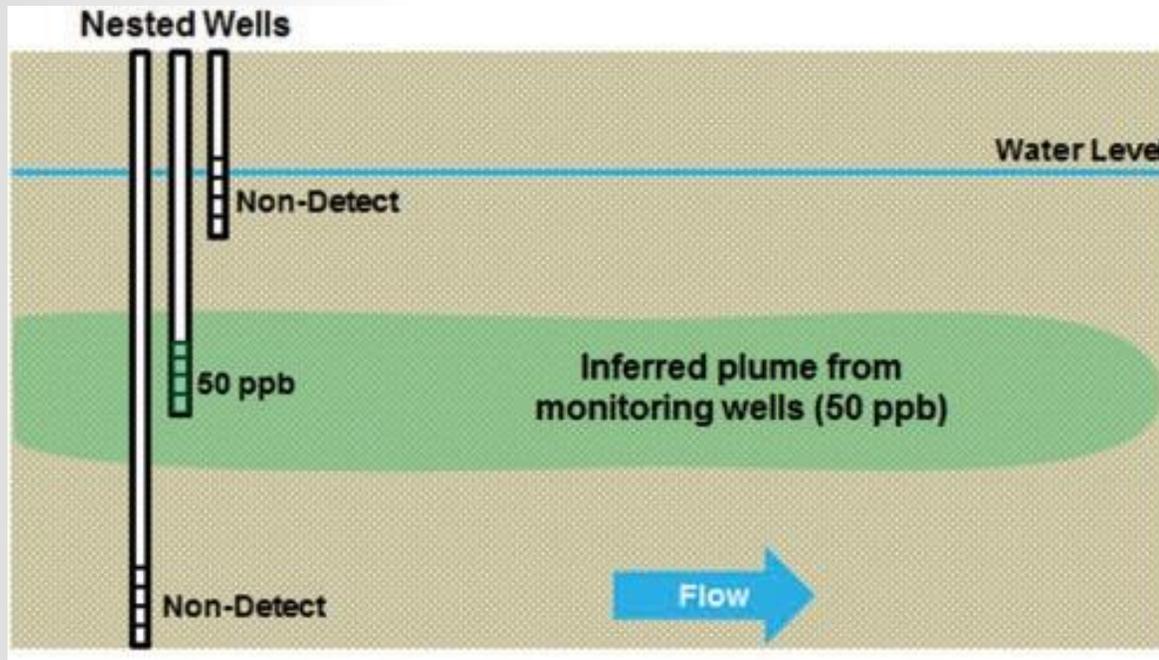
# Abordagem tradicional



Murray Einarson (2008)

- Método tradicional: sondagens para amostragem de solo e instalação de poços de monitoramento de água subterrânea, envio de amostras para análises laboratoriais. A partir dos resultados, mobiliza-se novamente e instala + poços, + poços...

Posicionamento dos poços multinível em profundidades arbitrárias



## Falta de mapeamento e caracterização das áreas fonte

- Falta de caracterização detalhada da fonte – poucas amostras de solo por sondagem;
- Amostragem de solo limitada à zona vadosa, separada da investigação de águas subterrâneas;
- Metodologias de amostragem de solo para voláteis ineficazes, impossibilitando a quantificação real da massa adsorvida;
- Considerar a ABNT NBR 16434-2015: Amostragem de resíduos, solos e sedimentos - Análise de compostos orgânicos voláteis (COV) – Procedimento.



X



- Foco em chegar o mais rápido possível à fase de remediação, às vezes fazendo o mínimo possível para atender a legislação e o órgão ambiental;
- Priorização de amostras para análises laboratoriais certificadas (\$\$\$);
  - ➔ • Dados caros limitando o número de amostras por projeto;
- Consequências: os profissionais muitas vezes foram levados a fazer interpretações baseadas em dados esparsos, com resolução limitada;

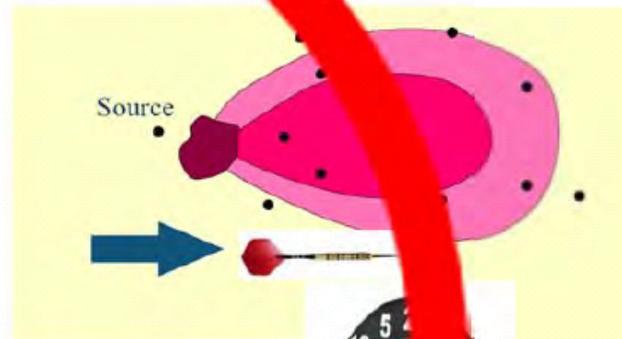


“A dependência dos dados de poços de monitoramento resultou em remediações de baixo desempenho e previsões inaceitavelmente baixas sobre o comportamento das plumas e dos riscos aos receptores”

*“Poços de monitoramento são projetados para monitorar, não para investigar”.*

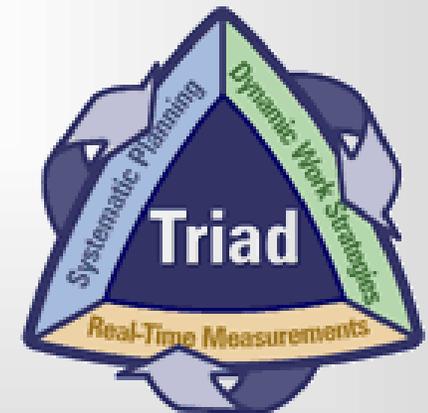


## Conventional Monitoring Well Placement Strategy



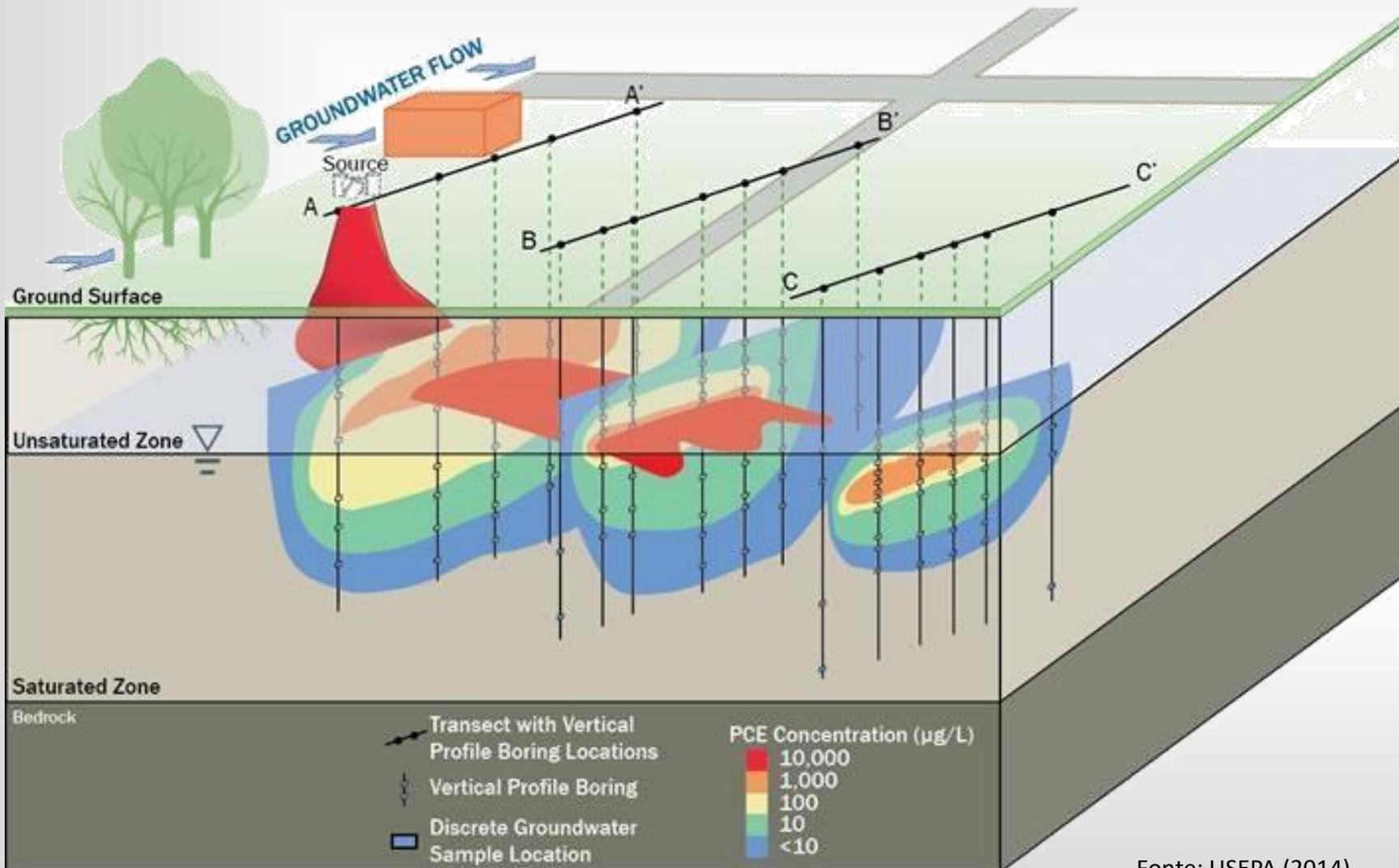
# U.S. Superfund Program Review – Abordagem Triad

- Revisão sistemática das Boas Práticas de Gestão (BMPs) aplicadas GAC;
- “90% da incerteza nos dados ambientais se deve à variabilidade da amostragem como consequência direta da heterogeneidade das matrizes ambientais.”
- “Se a representatividade não puder ser estabelecida, a qualidade das análises químicas é irrelevante para a redução das incertezas” (Crumbling et al., 2001);
- Maior confiabilidade e economias significativas podem ser alcançadas usando uma coleção de BMP conhecida como **abordagem da Tríade**;



# Abordagem Triad



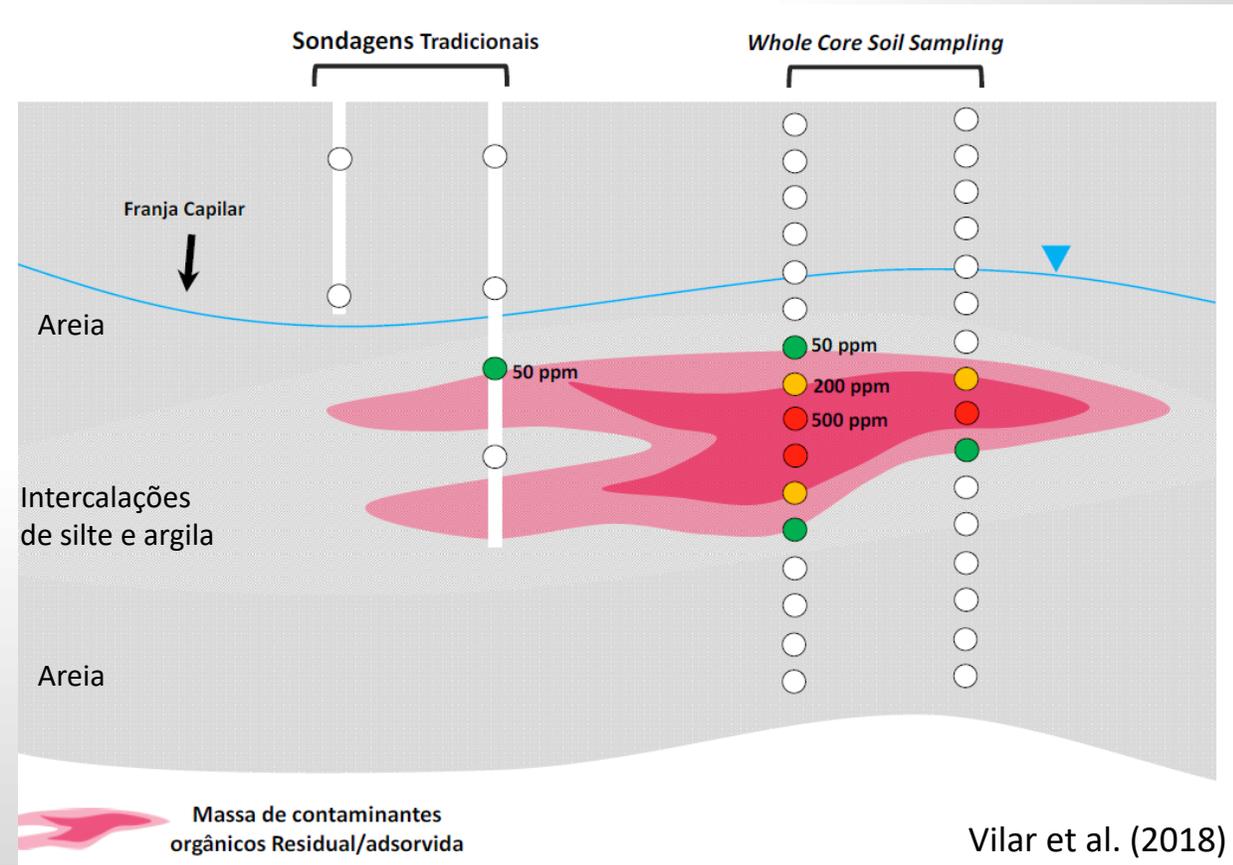
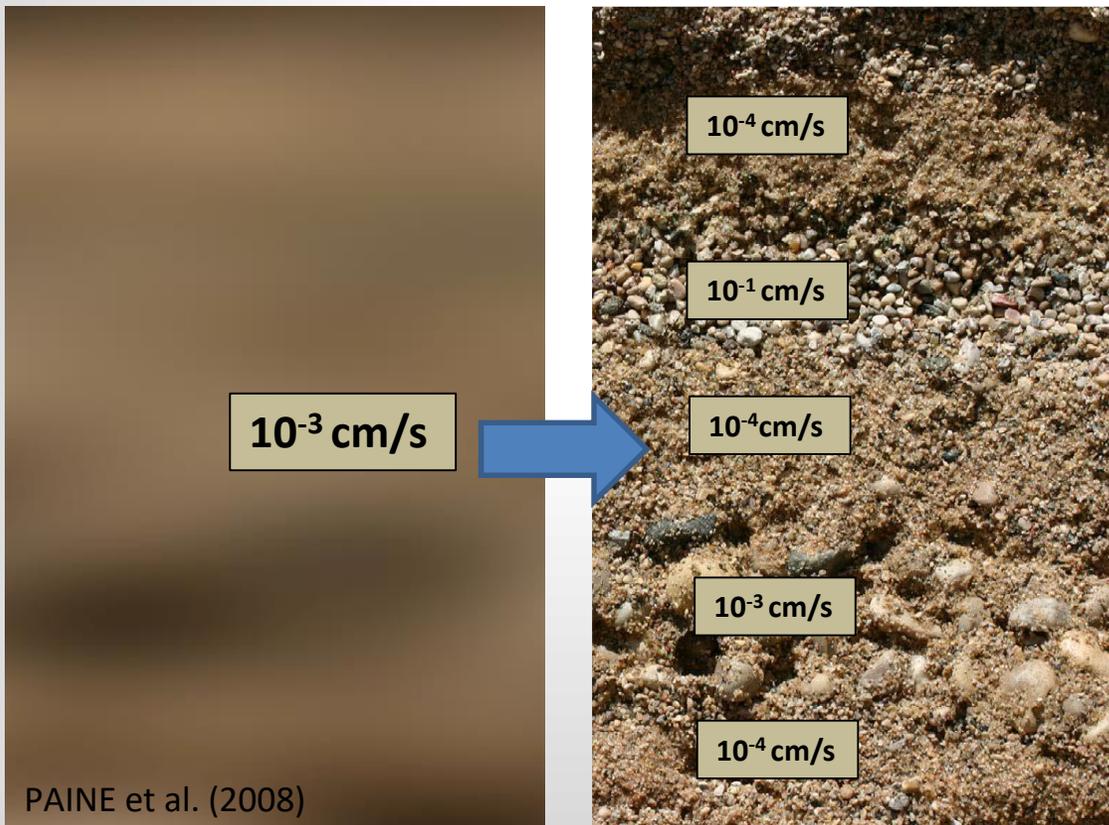


## *High Resolution Site Characterization (HRSC)*

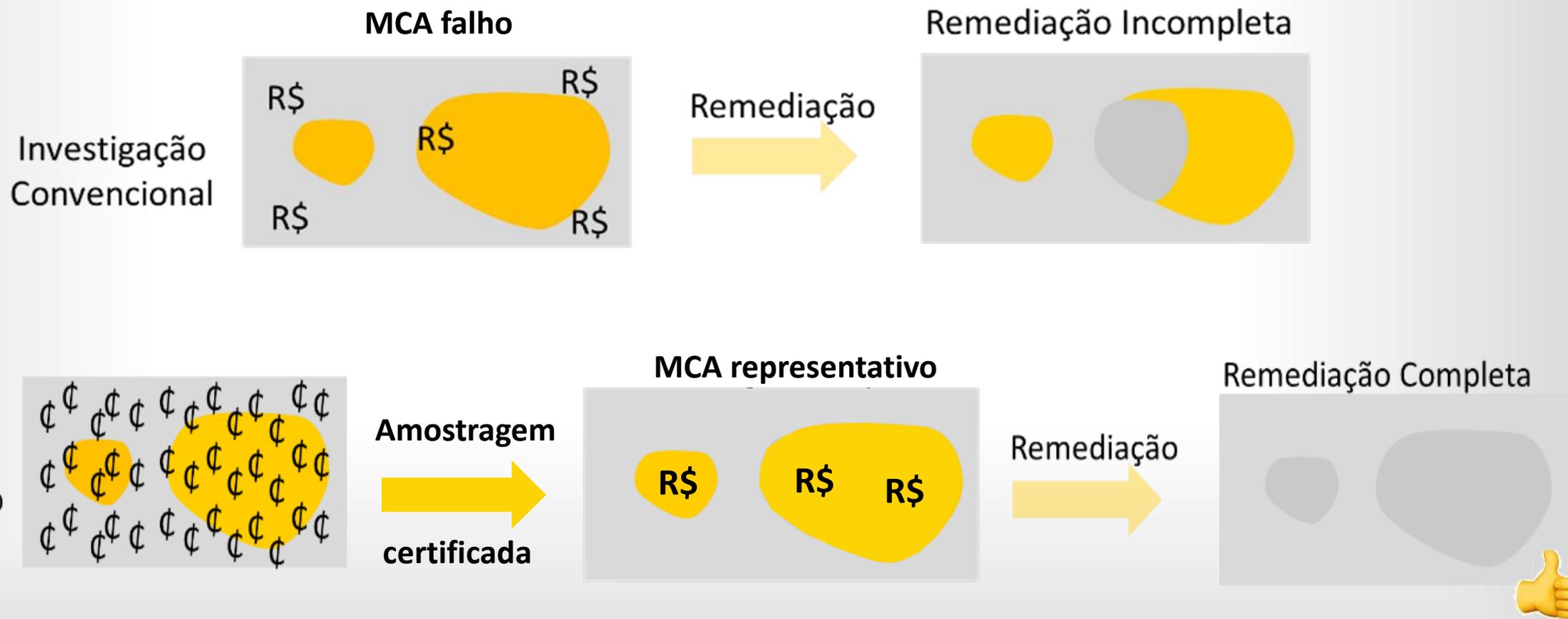
“Estratégias e técnicas que adotam mensurações e densidade de amostras em escala apropriada para definir a distribuição dos contaminantes e o contexto físico em que residem, de forma confiável, para possibilitar uma reabilitação mais rápida e efetiva das áreas contaminadas.”

# Investigação de alta resolução

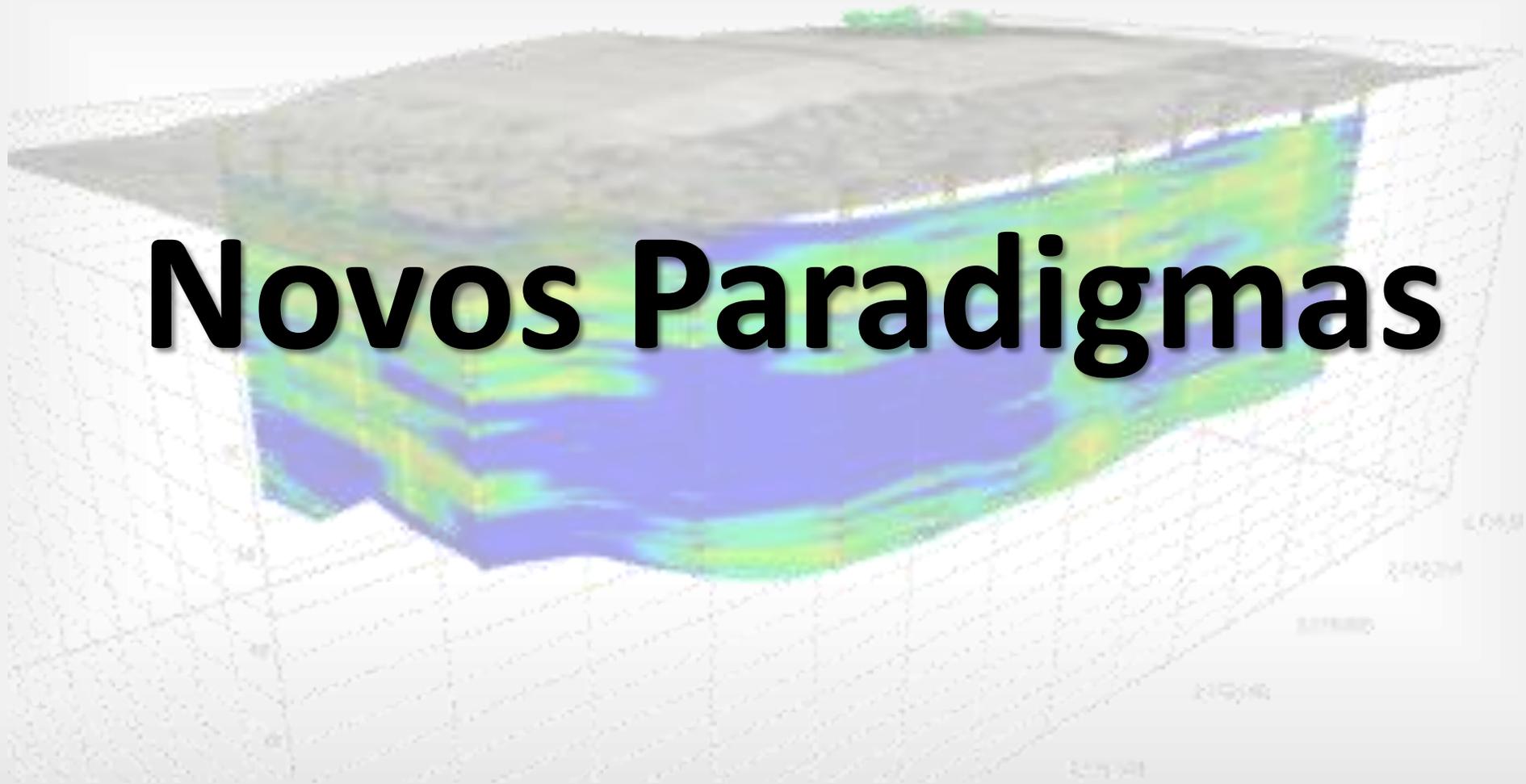
**Aumento da escala de detalhes:** aprimorar a escala de medições conforme a variabilidade das propriedades sendo medidas (dados geológicos / hidrogeológicos / contaminantes)



# Uso de dados colaborativos para reduzir incertezas

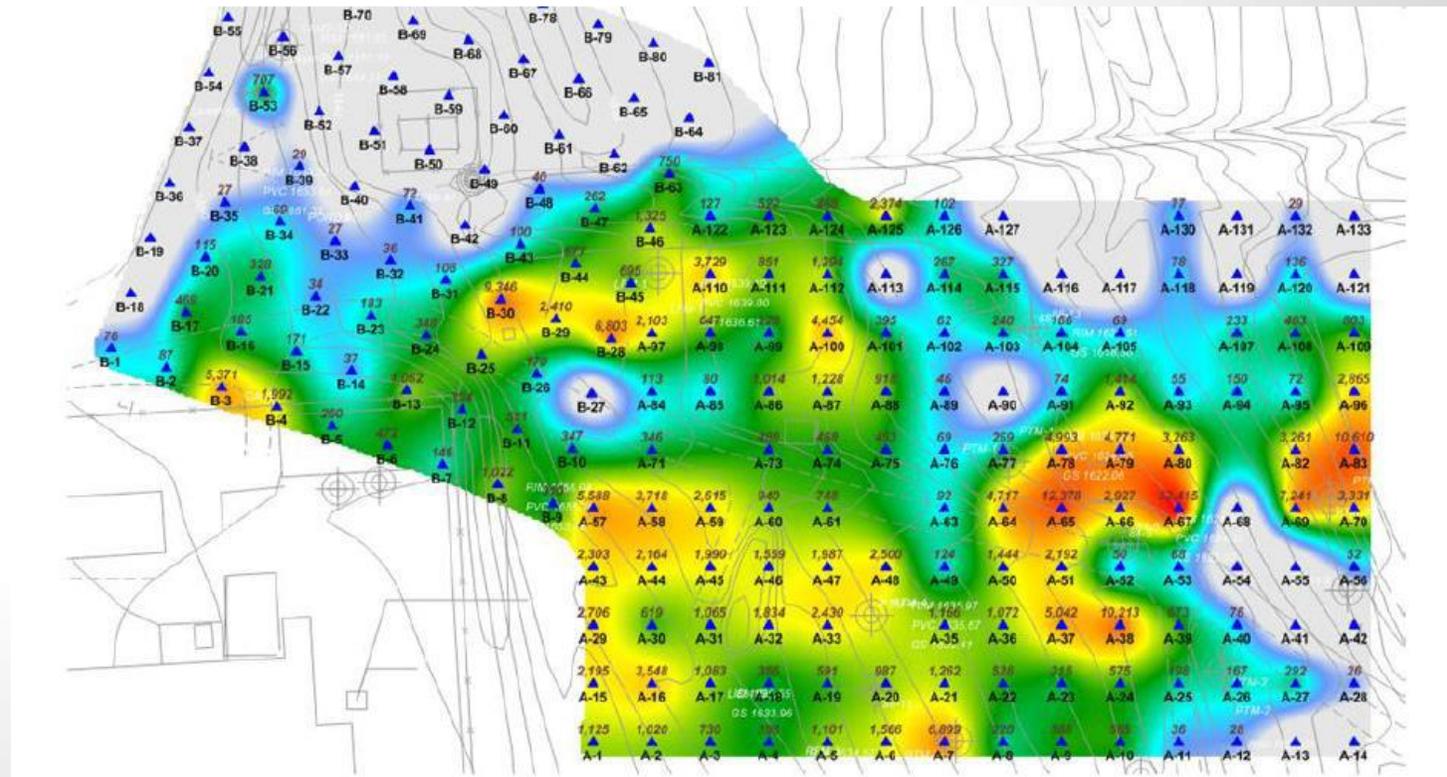






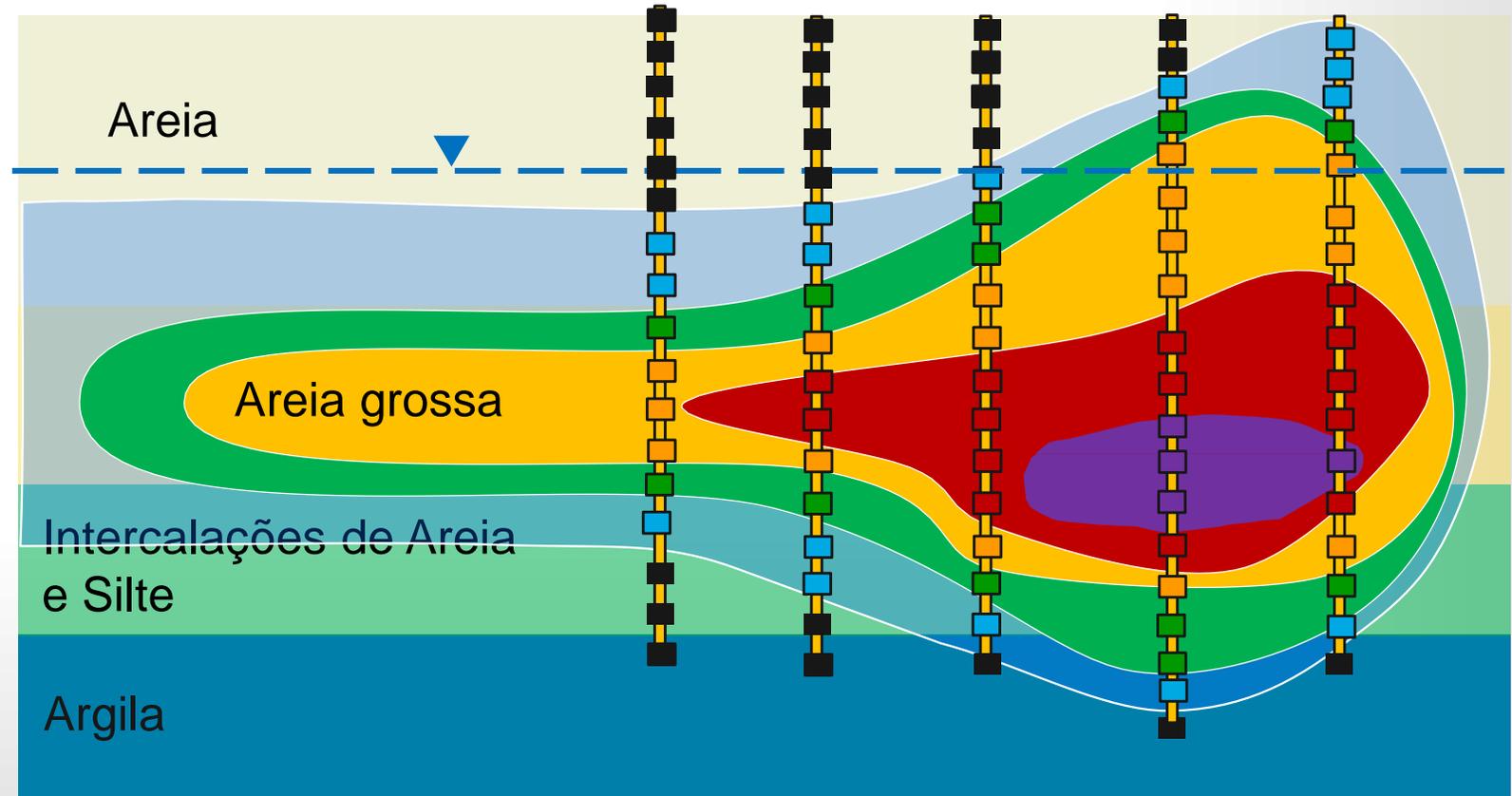
# Novos Paradigmas

## Mapeamento e caracterização das fontes de contaminação



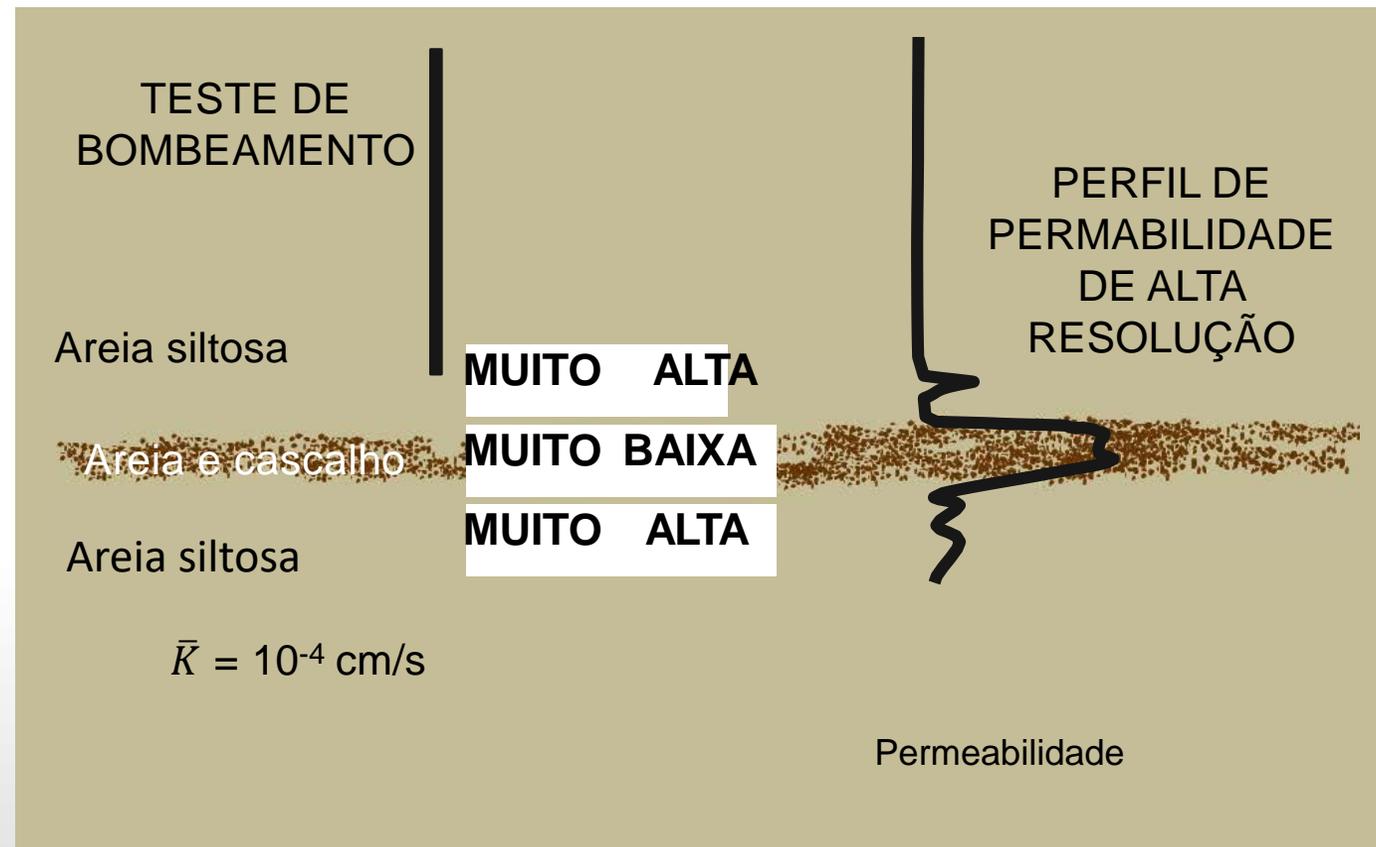
*Técnica de screening de amostragem passiva de vapores*

## Mapeamento e caracterização das fontes de contaminação

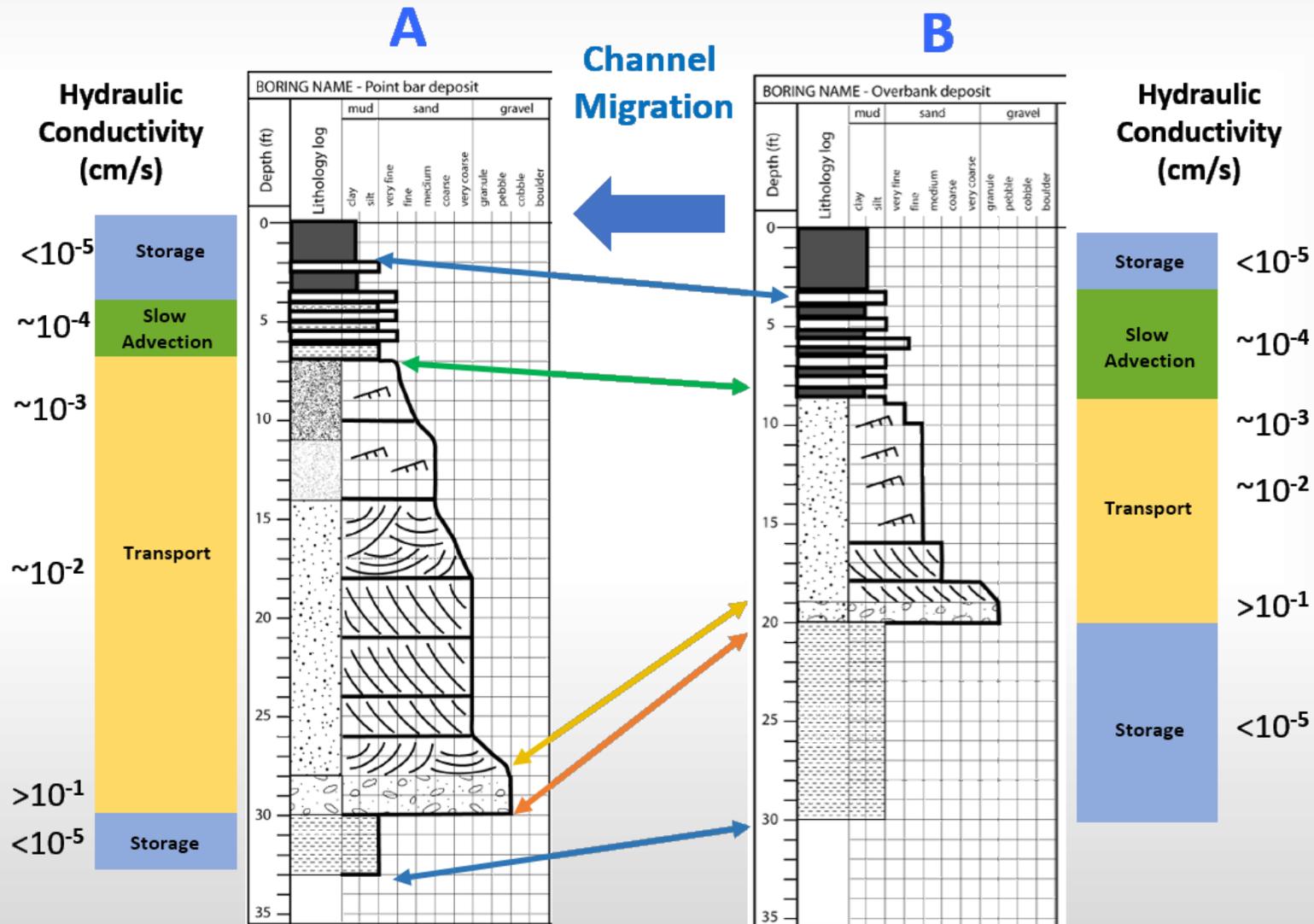


*Técnica de amostragem de solo de perfil completo*

## Mapeamento das camadas hidroestratigráficas

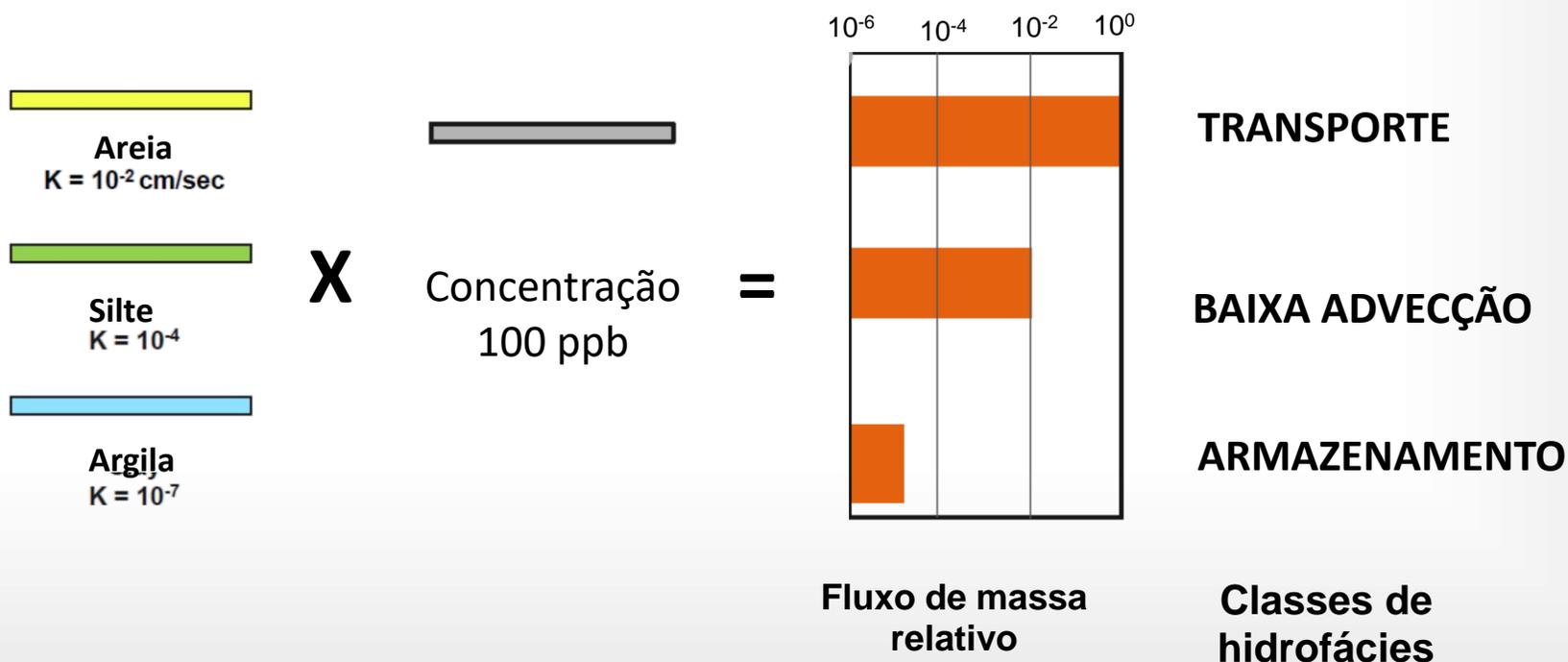


## Mapeamento hidroestratigráfico (zonas de fluxo / armazenamento)



## Mapeamento hidroestratigráfico (zonas de fluxo / armazenamento)

Avaliação do fluxo de massa com base nos tipos de solo e mapeamento hidroestratigráfico do aquífero



“Um elemento-chave é a identificação da distribuição de contaminantes em relação às zonas de baixa permeabilidade versus zonas transmissivas” (ITRC, 2015)

## Fluxo de massa

**Fluxo de massa** – massa que flui através de uma área unitária

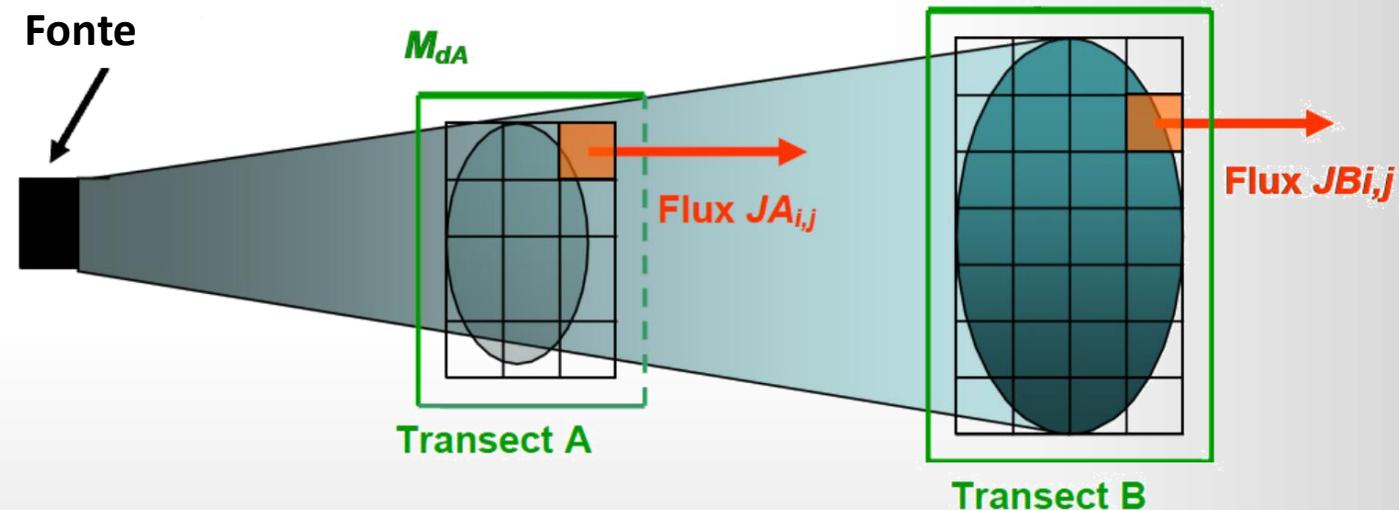
$$\mathbf{J} = \mathbf{K} \mathbf{i} \mathbf{C} \quad (\text{mass/time/area})$$

- K = Condutividade hidráulica (i.e. permeabilidade)
- i = Gradiente hidráulico
- C = Concentração (na água subterrânea)

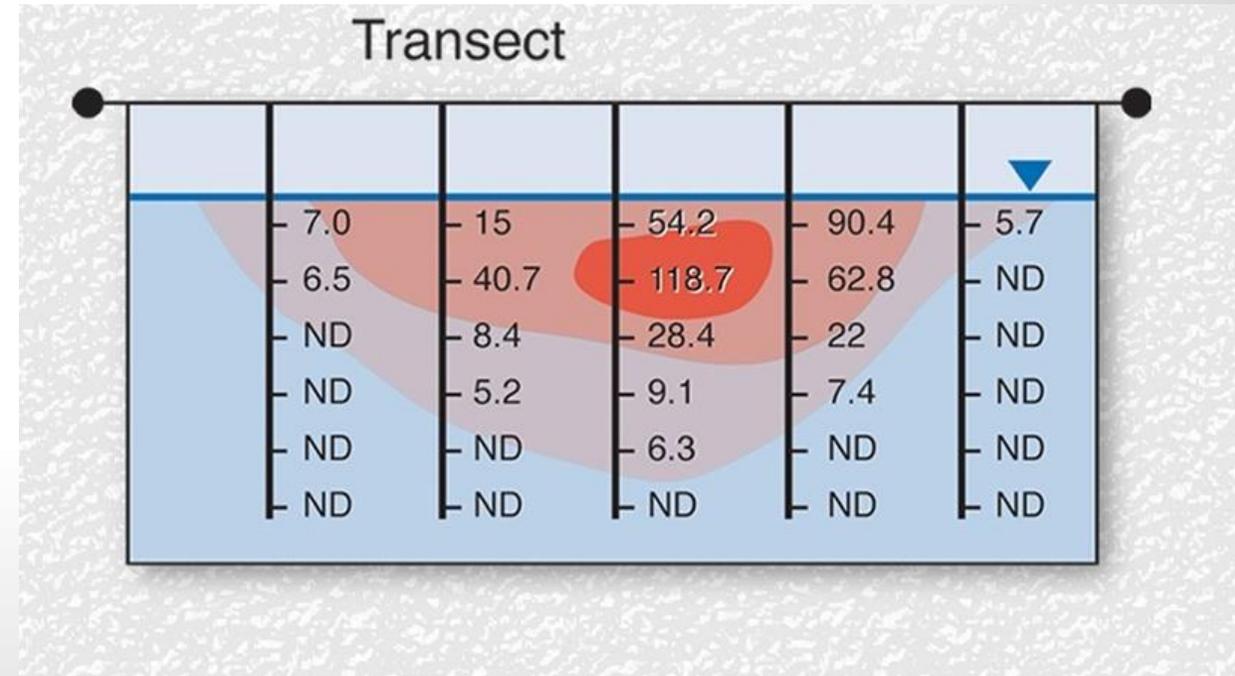
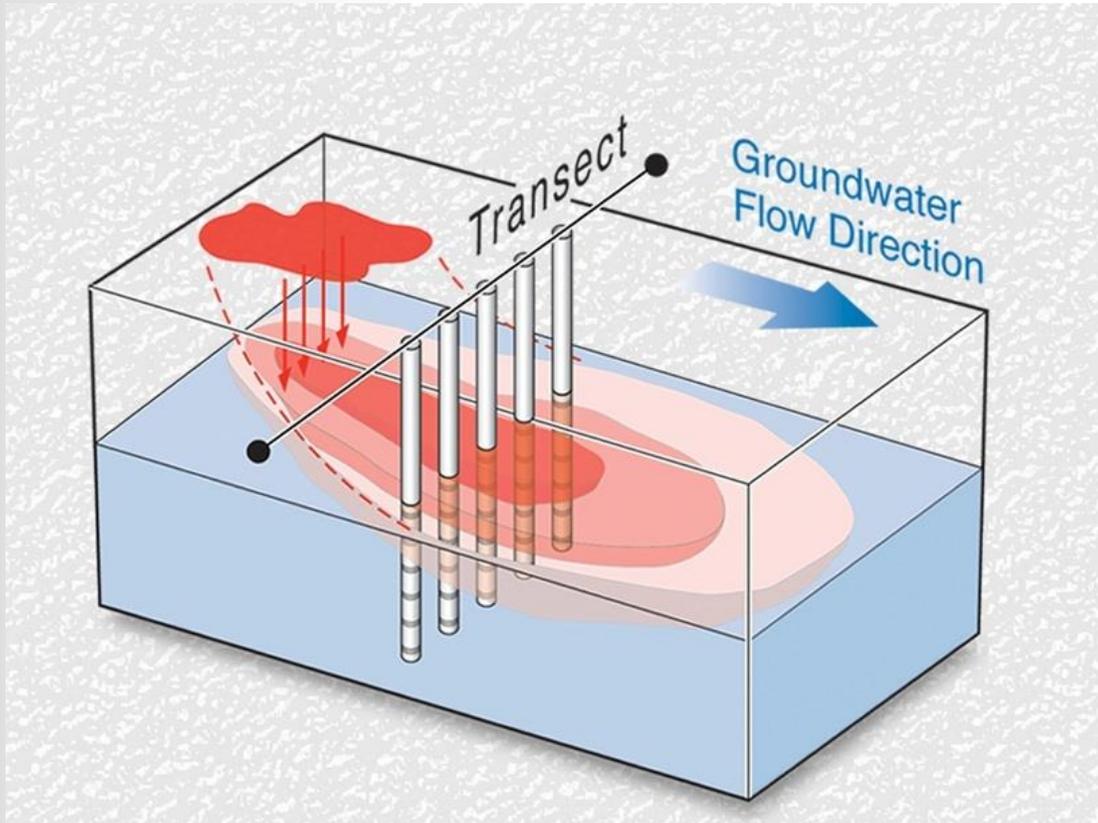
**Descarga de massa** – fluxo de massa integrado

$$M_d = \int_A \mathbf{J} \, dA \quad (\text{massa/tempo})$$

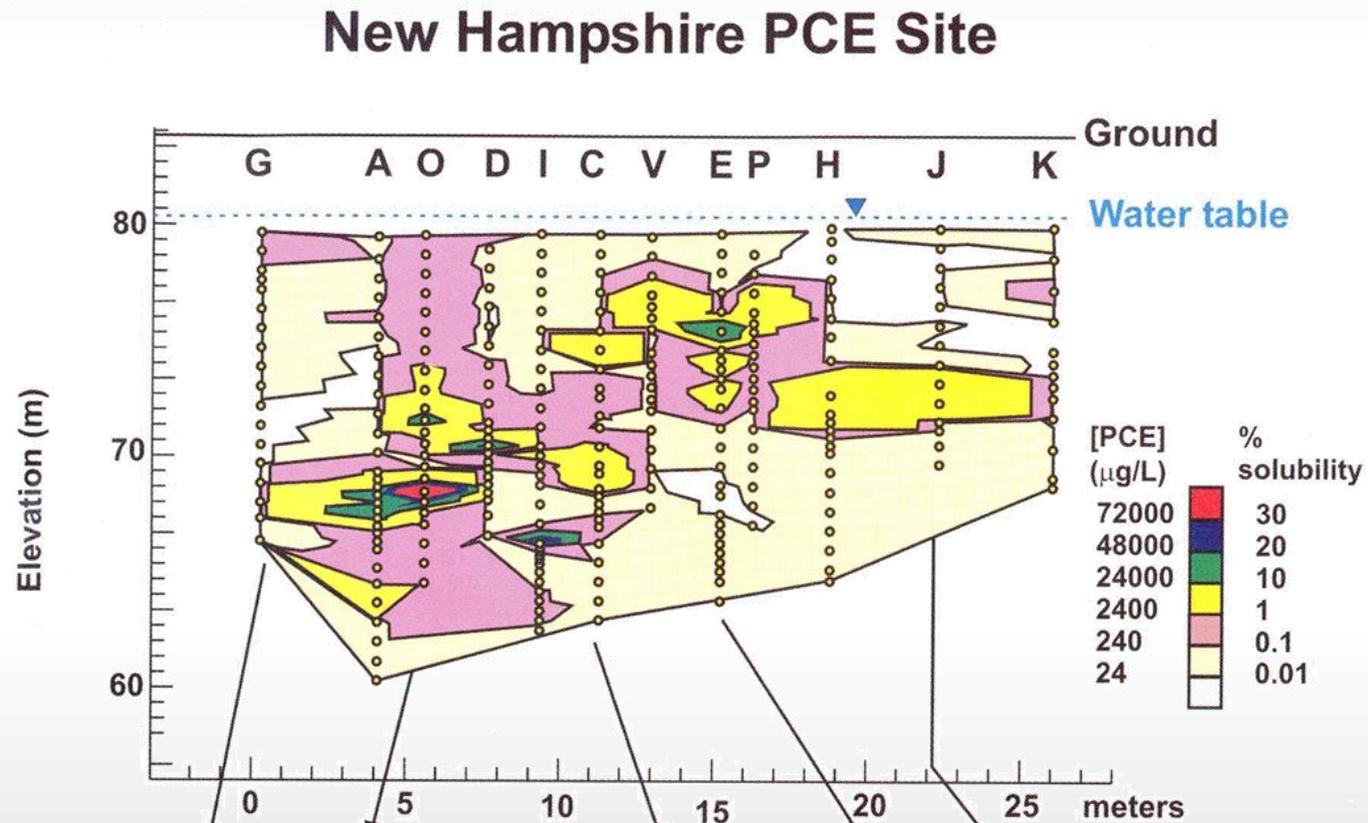
- J = Fluxo de massa
- A = Area total



## Fluxo de massa – técnica dos transectos

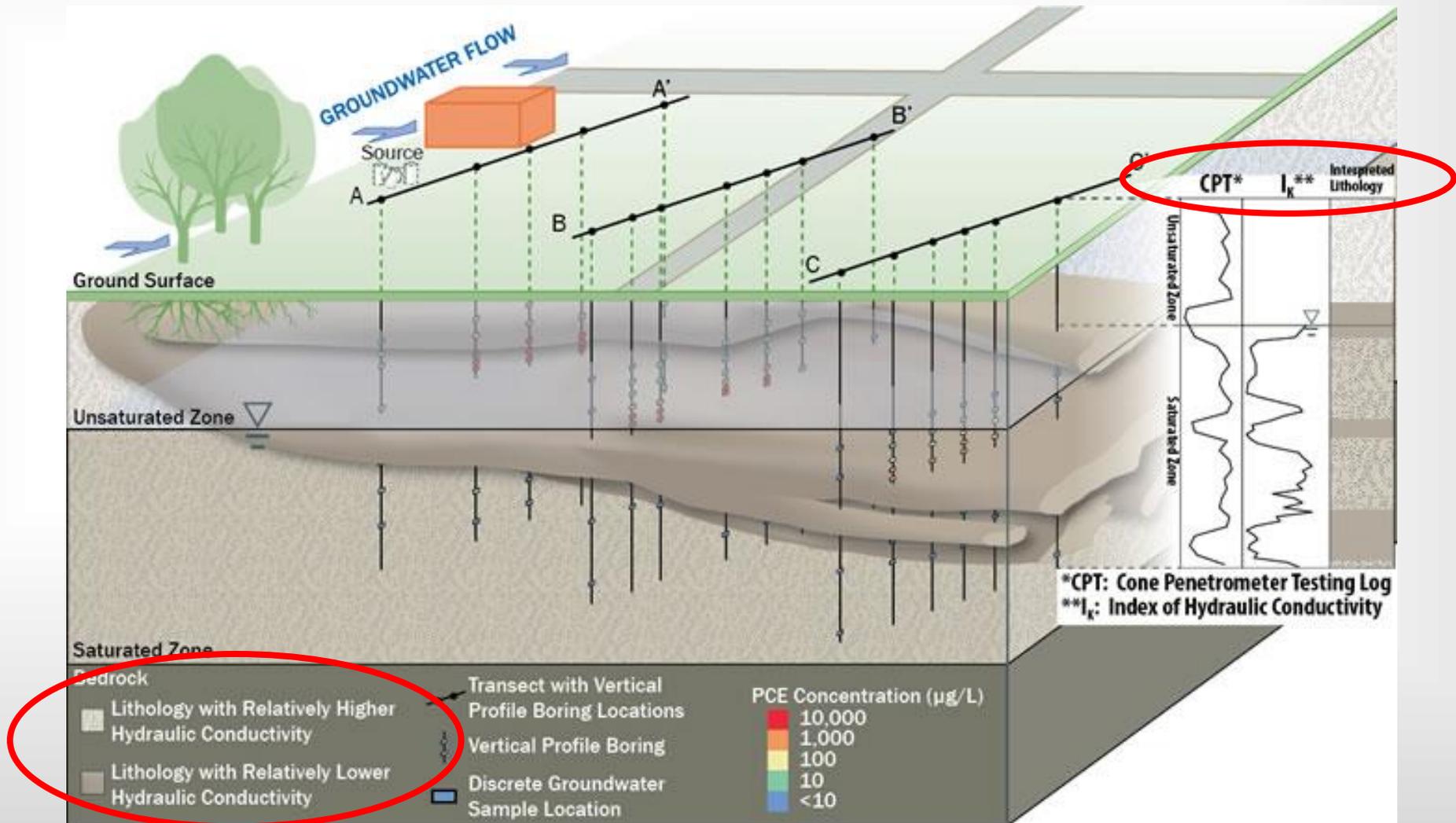


## Fluxo de massa – técnica dos transectos

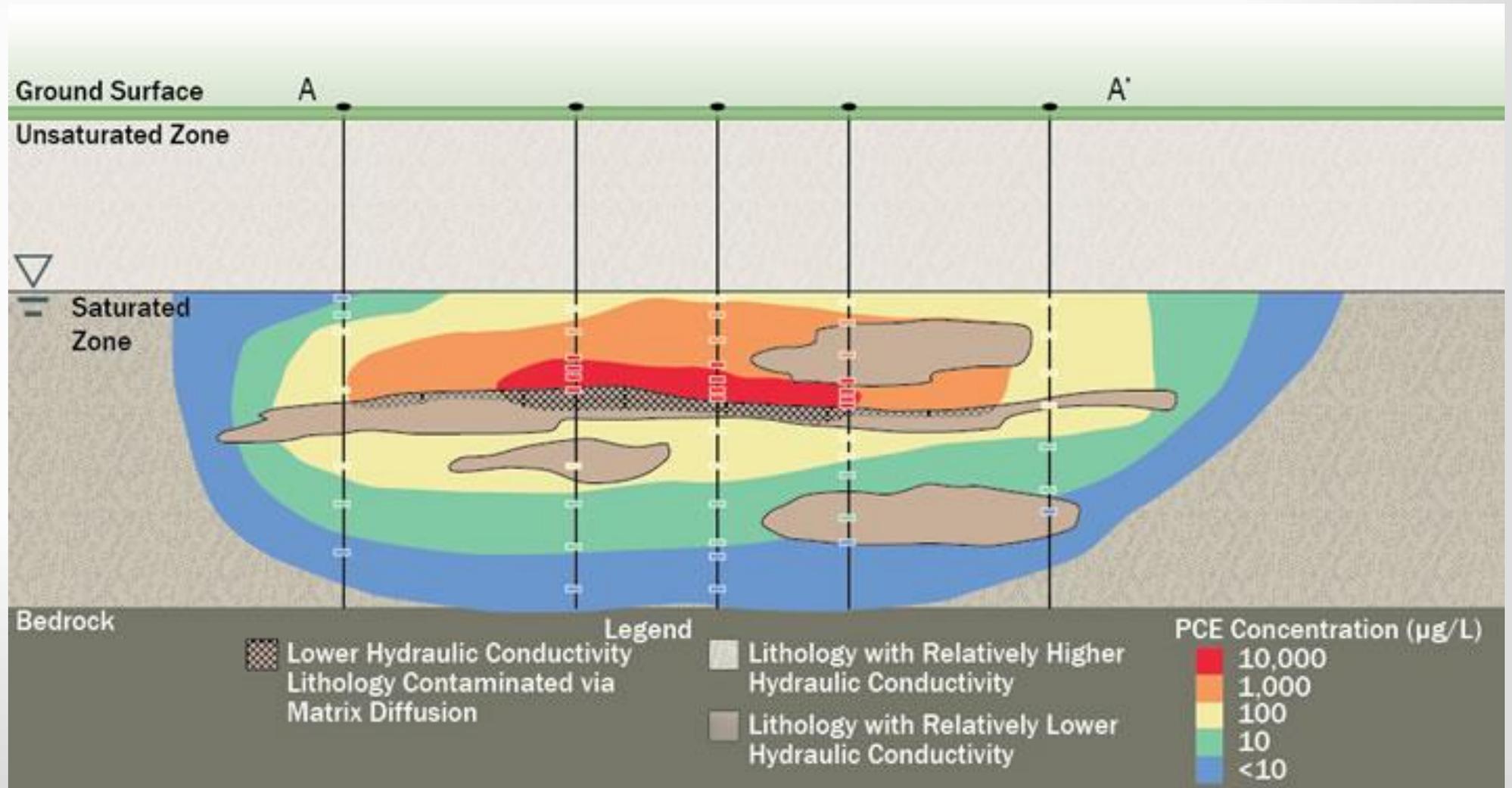


“75% da descarga de massa ocorre através de 5% a 10% da área da seção transversal da pluma” (Guilbeault et. al. 2005)

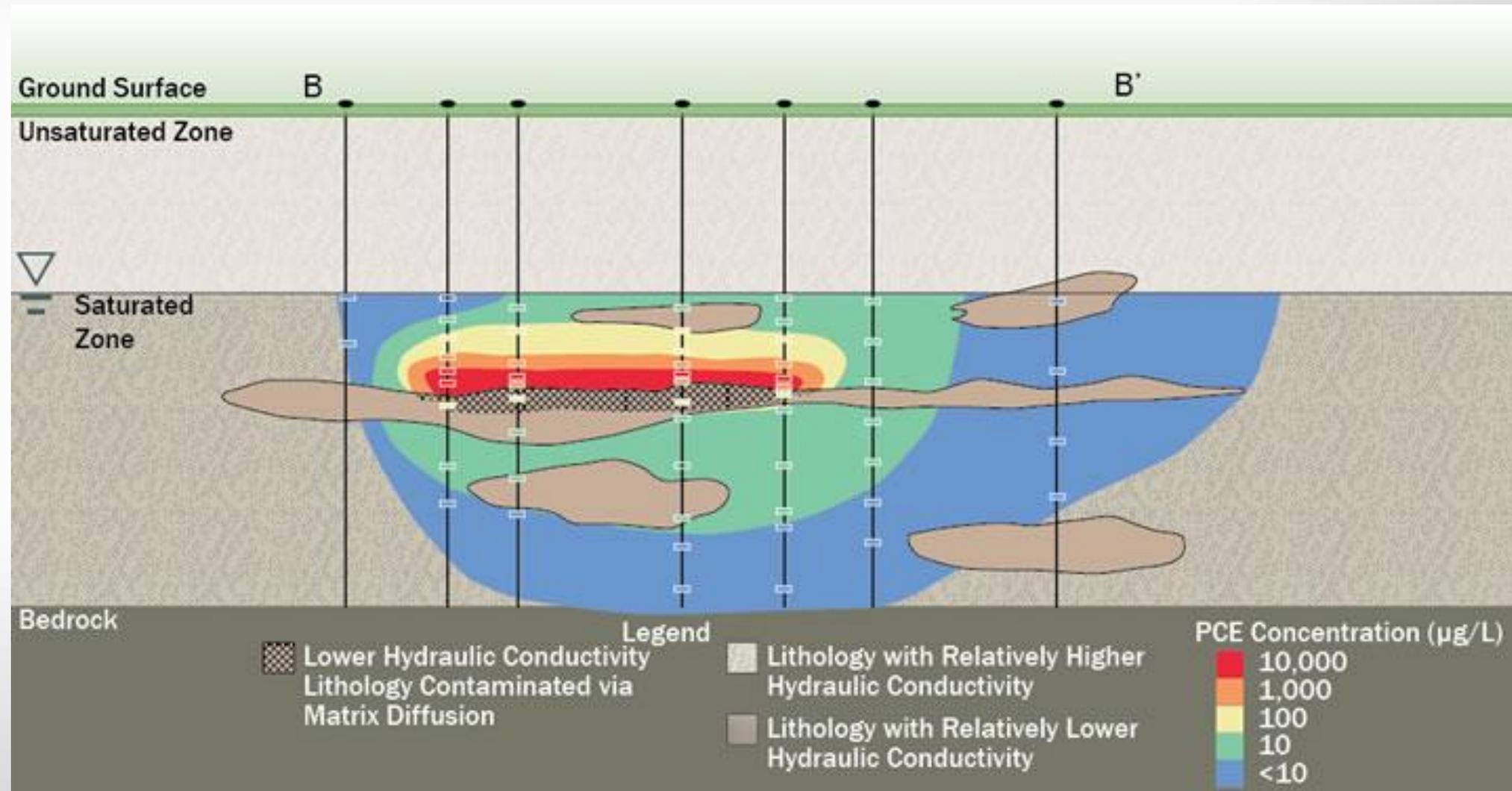
## Estratégia de investigação baseada em transectos



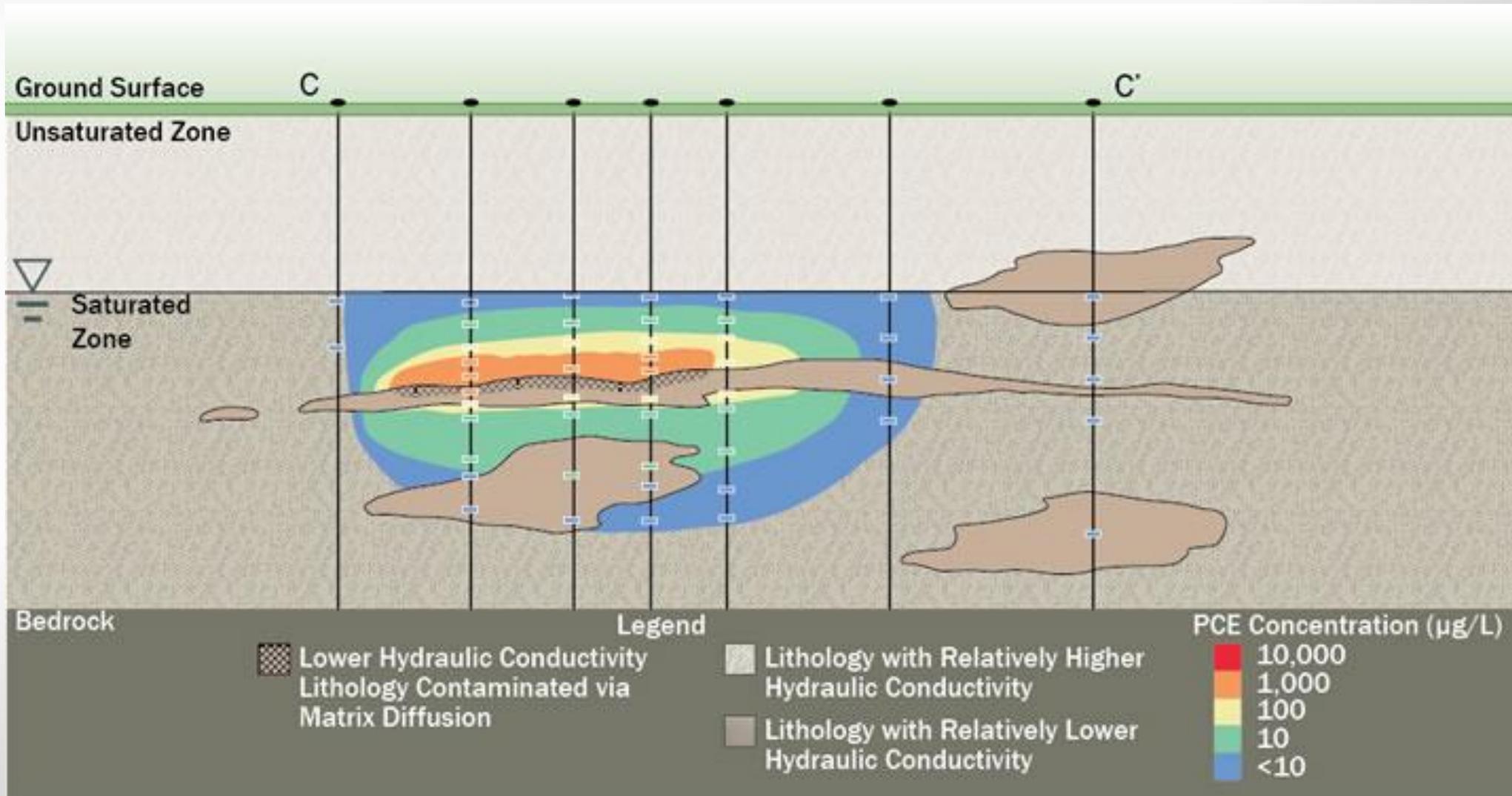
## Estratégia de investigação baseada em transectos



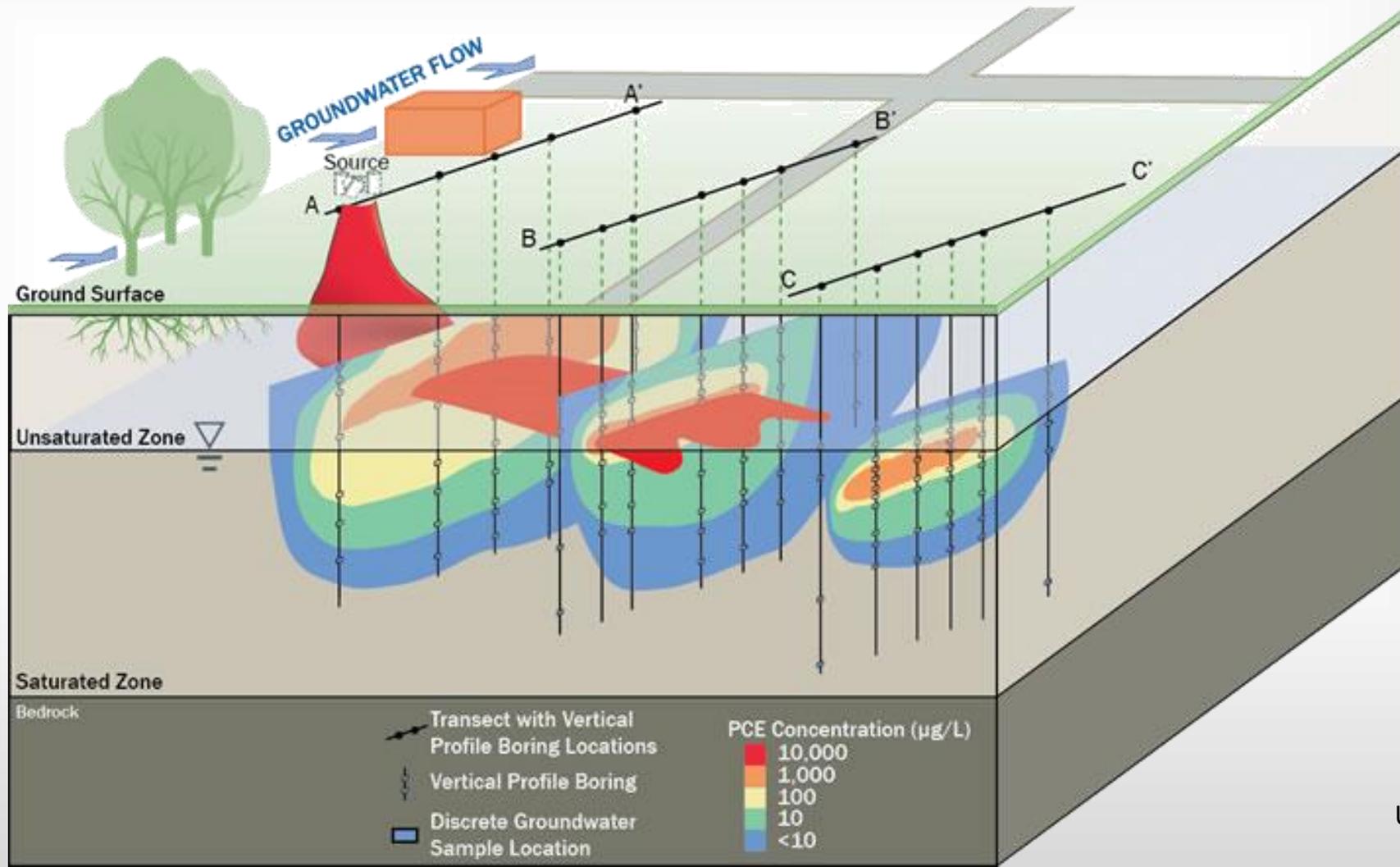
## Estratégia de investigação baseada em transectos



## Estratégia de investigação baseada em transectos

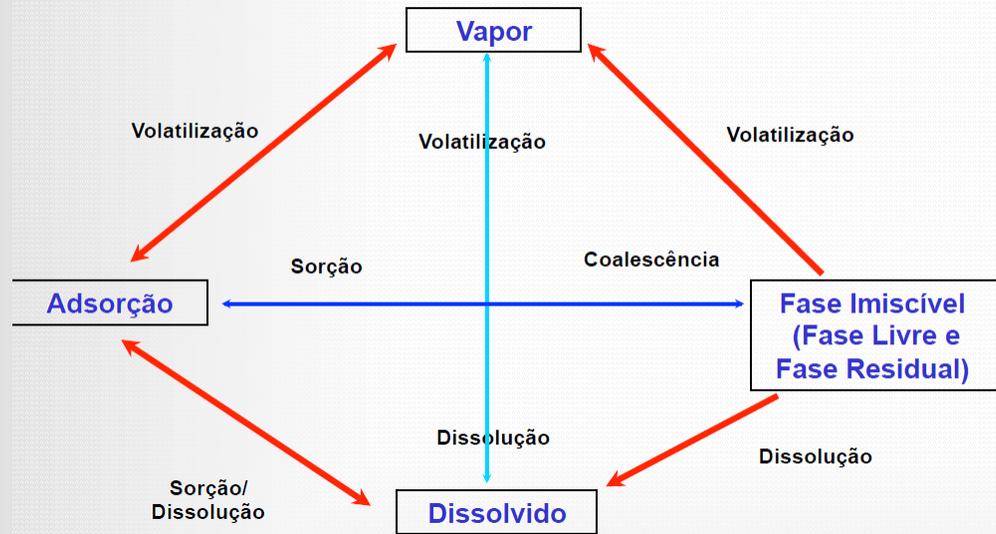


## Estratégia de investigação baseada em transectos



## Mecanismos de distribuição de massa entre compartimentos ambientais

### Mecanismos de Partição

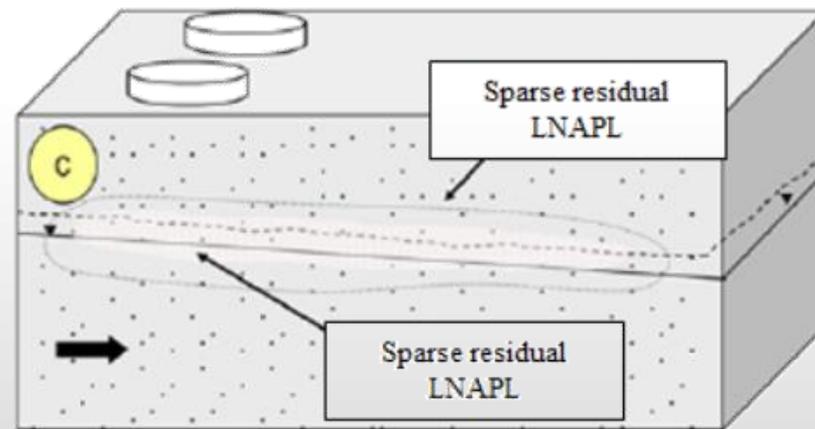
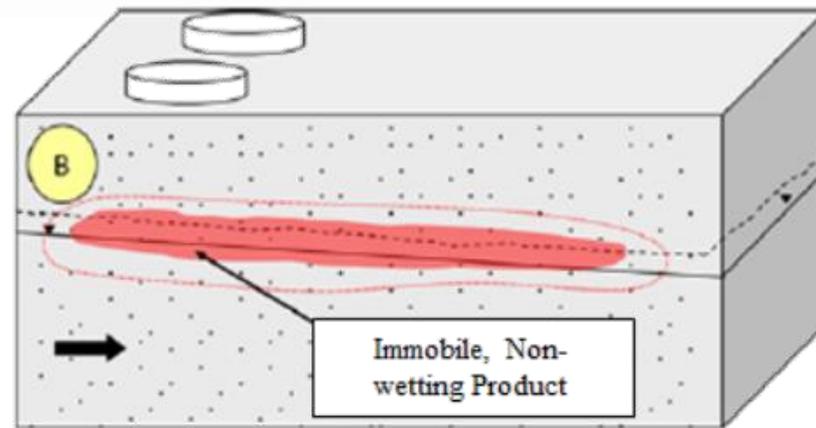
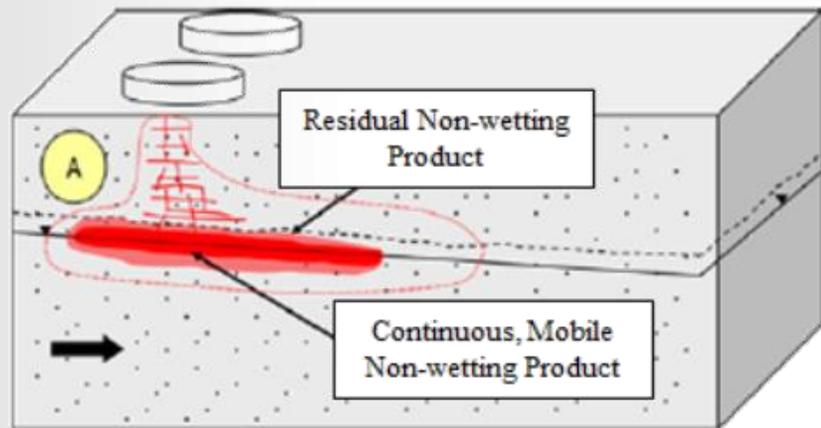


Phase/Zone	Source Zone		Plume	
	Low Perm.	Transmissive	Transmissive	Low Perm.
Vapor		Vapor Intrusion		
DNAPL	Capillary Barrier		NA	NA
Aqueous		Matrix Diffusion		Matrix Diffusion
Sorbed		Sorption		

ITRC IDSS-1, Table 2-2 from Sale and Newell 2011

**Modelo dos 14 Compartimentos:** 14 compartimentos subterrâneos potencialmente contendo solventes clorados. As setas mostram as ligações de transferência de massa potencial entre os compartimentos. Setas tracejadas indicam fluxos irreversíveis.

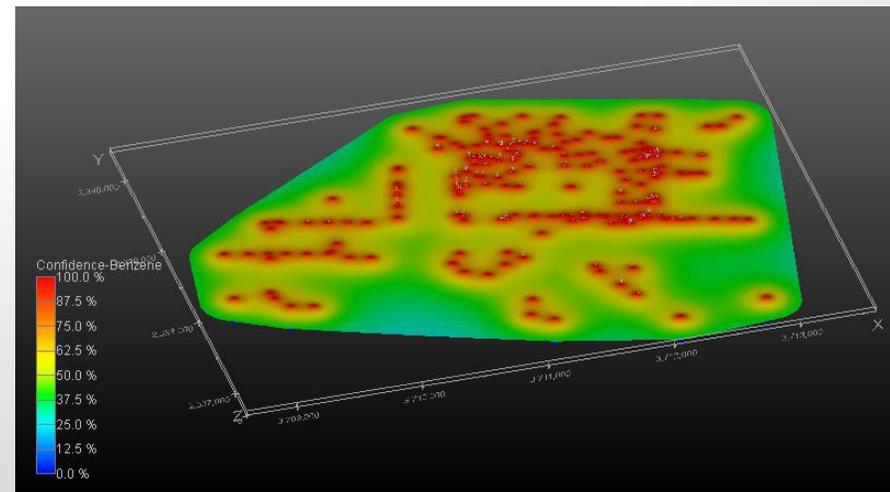
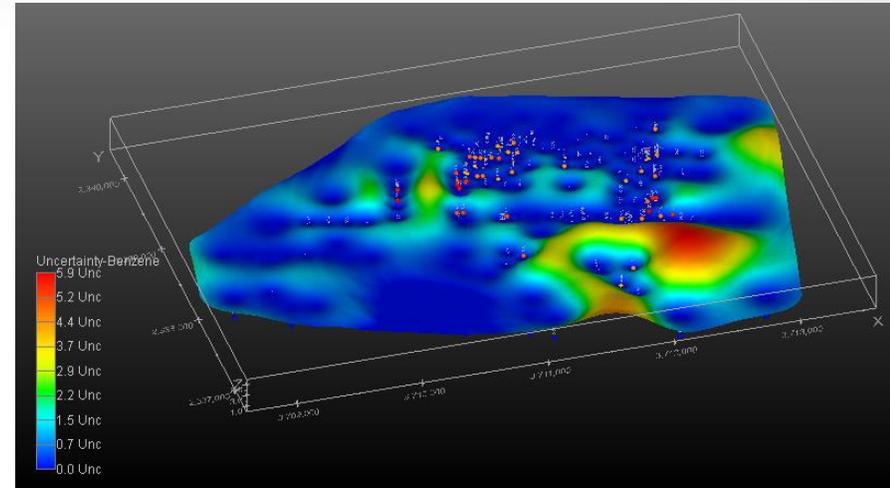
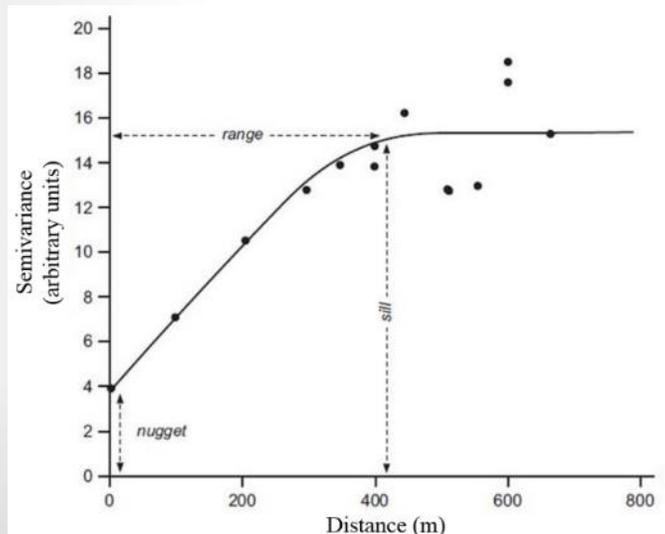
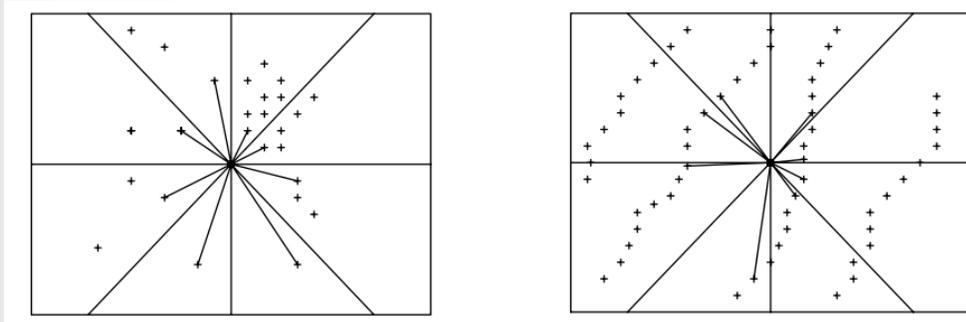
## Entendimento do estágio de maturidade da contaminação (LNAPLs)



Evolução conceitual de um vazamento de LNAPL (elaborado por McCoy, 2012):

- A) Estágio inicial.
- B) Estágio intermediário
- C) Estágio tardio

## Abordagem (geo)estatística e quantificação de incertezas do MCA



# Novos paradigmas do GAC

## Redução da geração de resíduos e efluentes

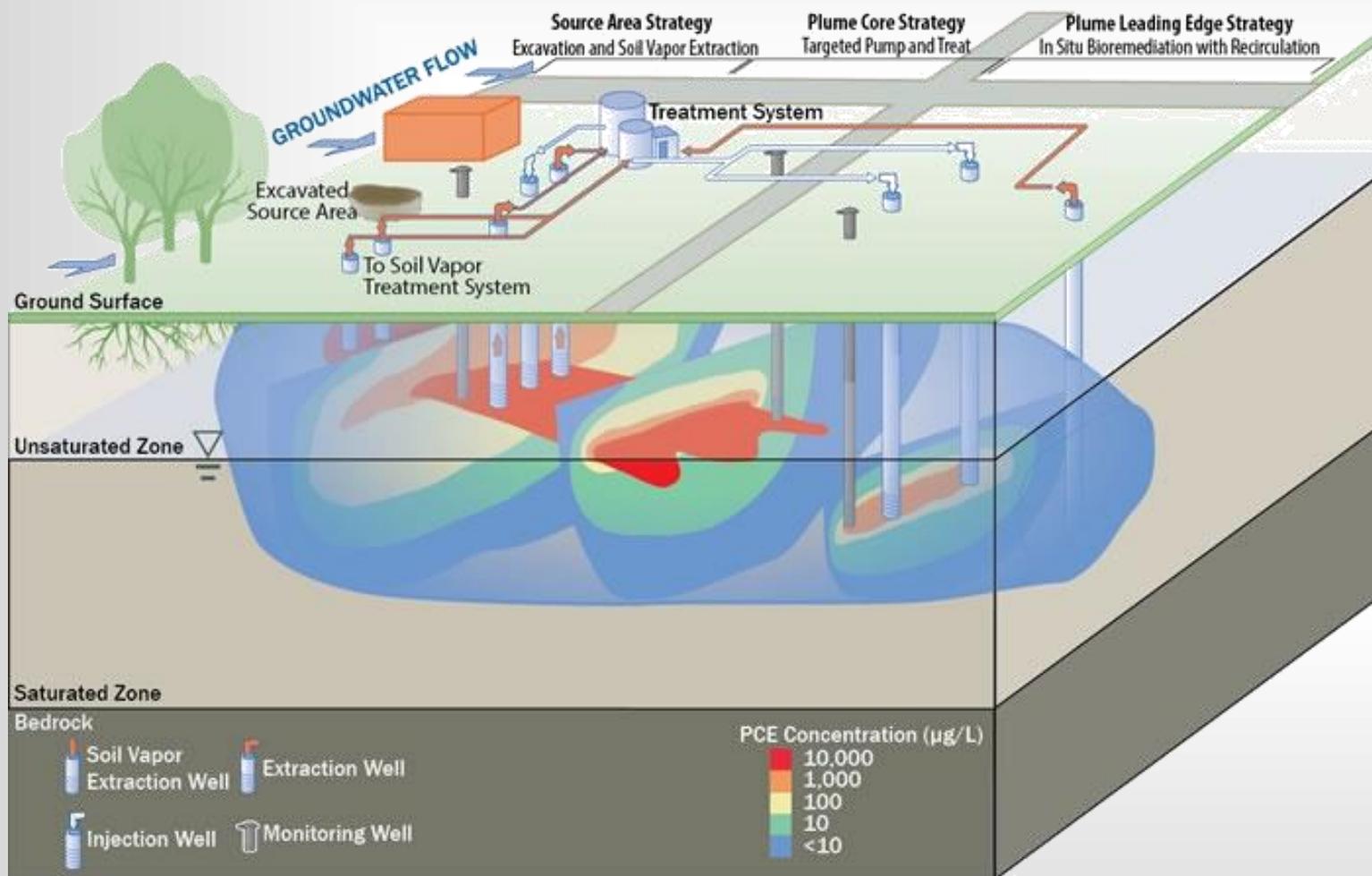


X



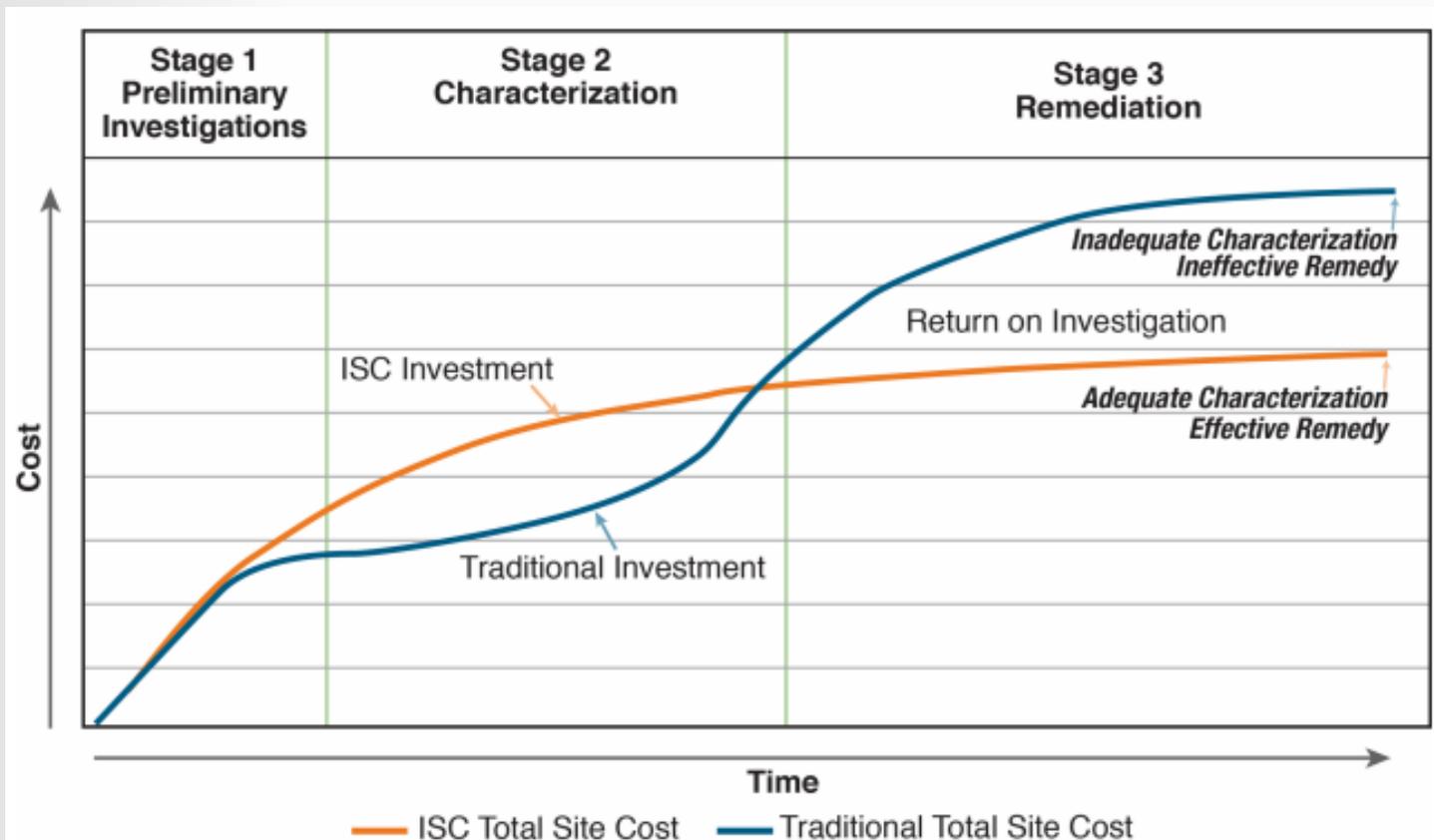
# Benefícios para projetos de remediação

- Melhores MCAs para embasar a tomada de decisão quanto às técnicas, design e projetos de remediação mais eficientes;
- Remediações direcionadas para tratar a área fonte, o corpo da pluma ou as bordas de evolução da pluma;
- Aumento da sustentabilidade dos projetos de remediação:
  - Ganho de eficiência;
  - Redução do tempo de operação;
  - Redução de custos;
  - Economia de recursos (água, energia, materiais, insumos, etc.)
  - Redução na geração de resíduos e efluentes;
  - Controle mais eficiente dos riscos e reabilitação das áreas;



USEPA (2014)

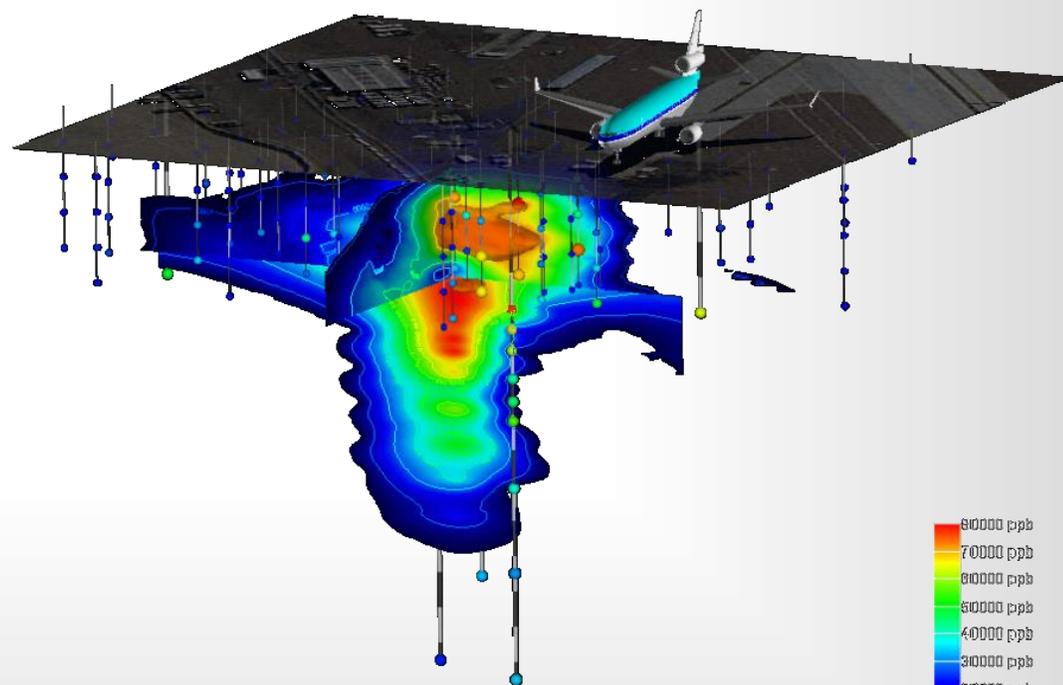
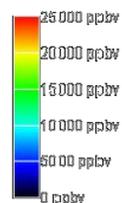
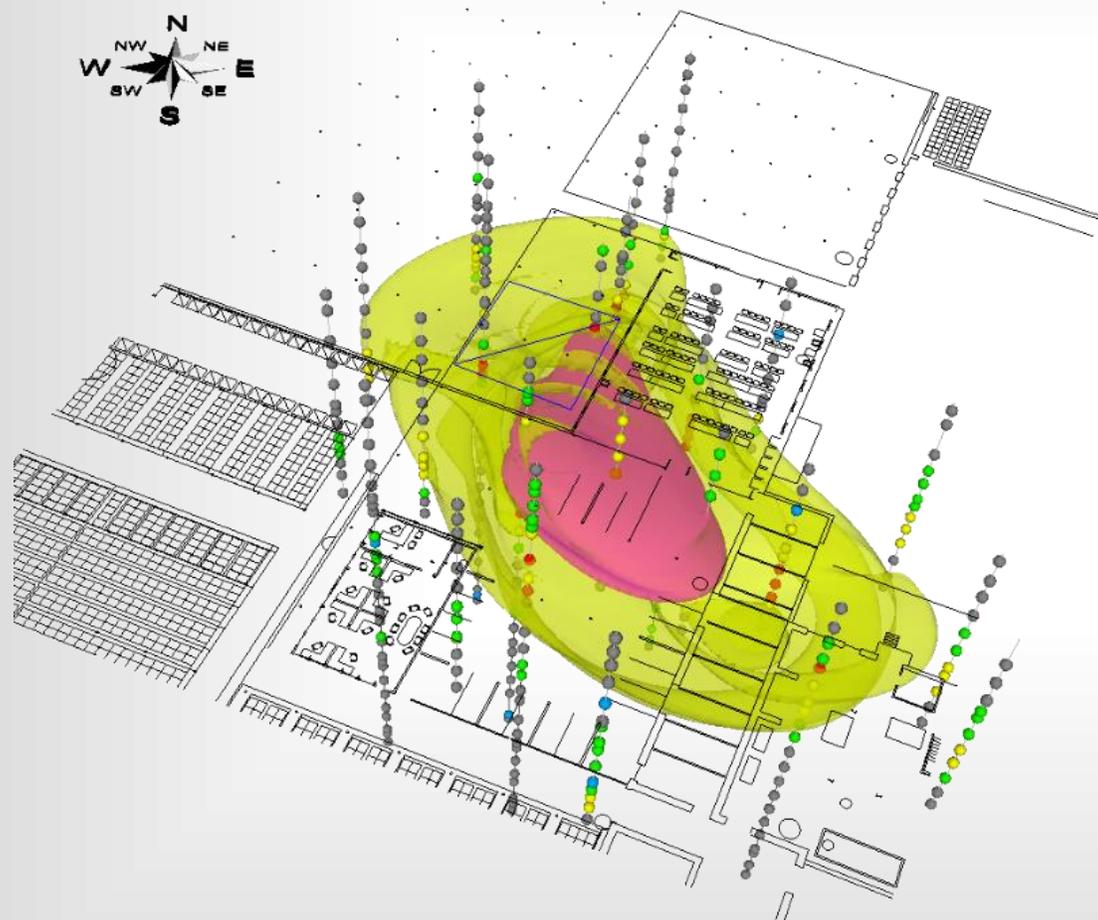
## Ciclo de vida dos projetos & Return On Investigation (ROI)



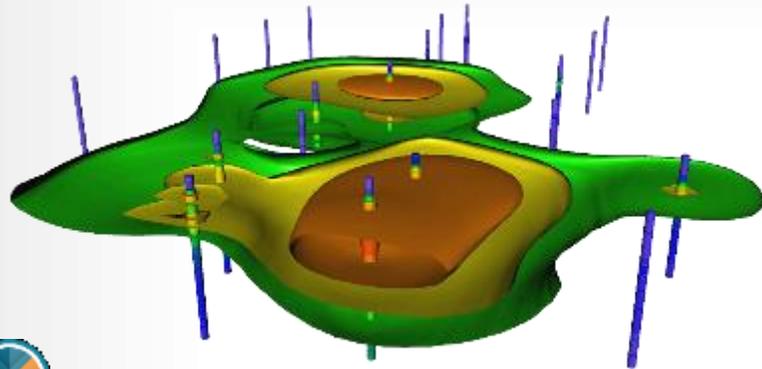
“Em nossa experiência, cada \$ gasto em técnicas de definição de fluxo de massa pode levar a um ROI de 3 a 5 vezes (ou mais) em termos de redução do custo geral de remediação de águas subterrâneas contaminadas” (Suthersan et al, 2015).

**ROI:** Abordagem Traditional vs. Estratégias integradas com Investigação de Alta Resolução, em termos de custos ao longo do ciclo de vida dos projetos (ITRC, 2015).

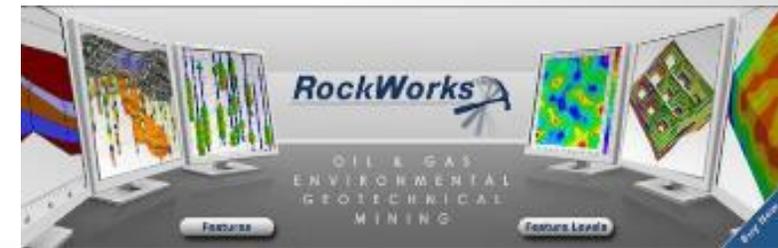
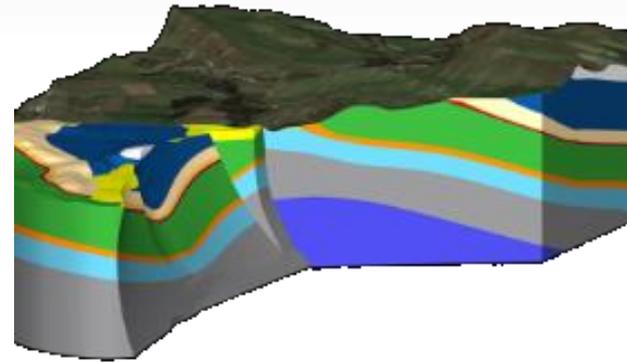
## Novos sistemas de gerenciamento e visualização de dados



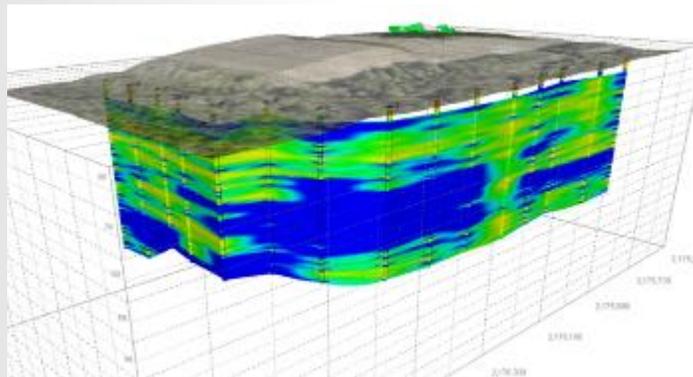
# Representação gráfica 3D e 4D - Softwares



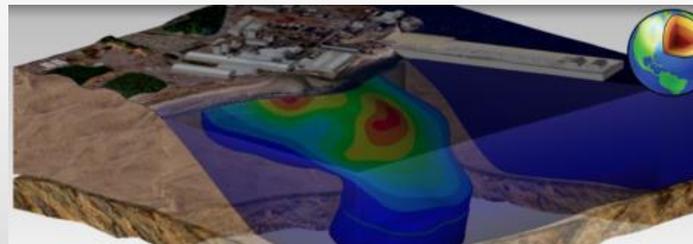
Voxler



Waterloo  
HYDROGEOLOGIC

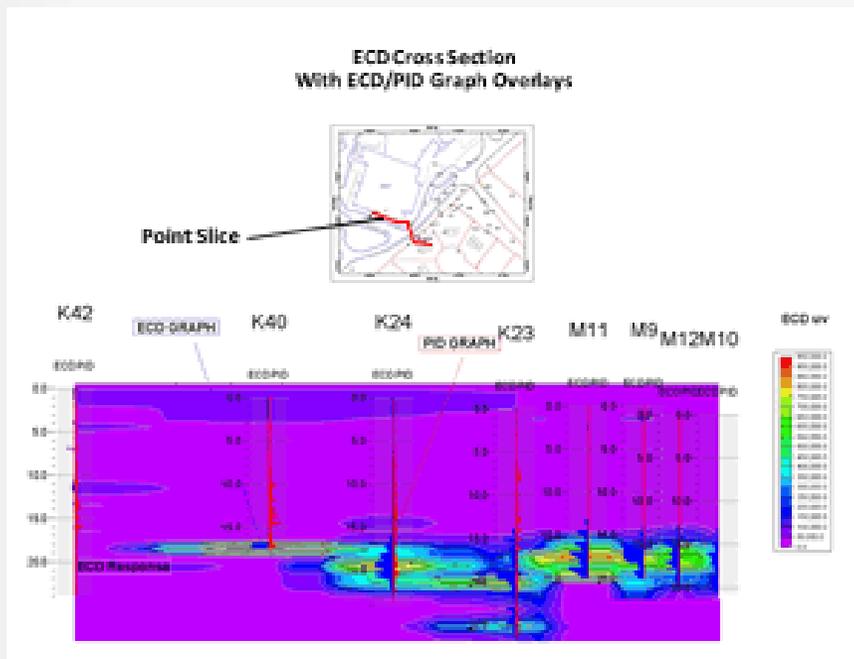


Geovariances  
Where no one has gone before

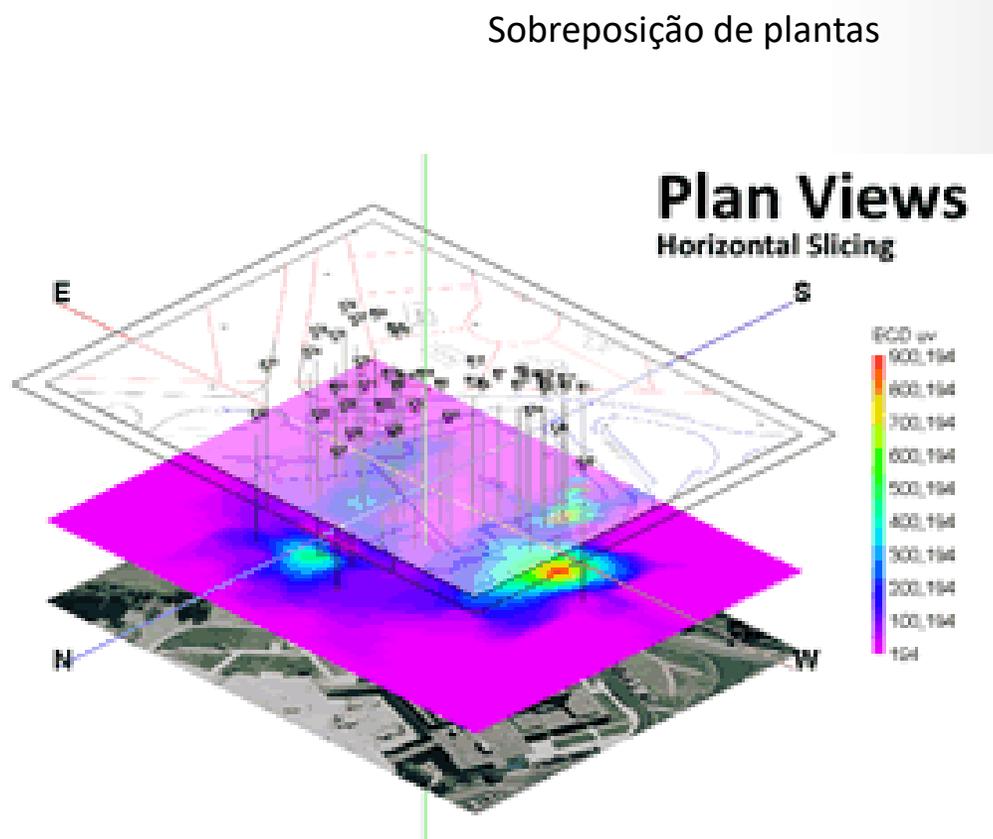


Earth  
Volumetric  
Studio™

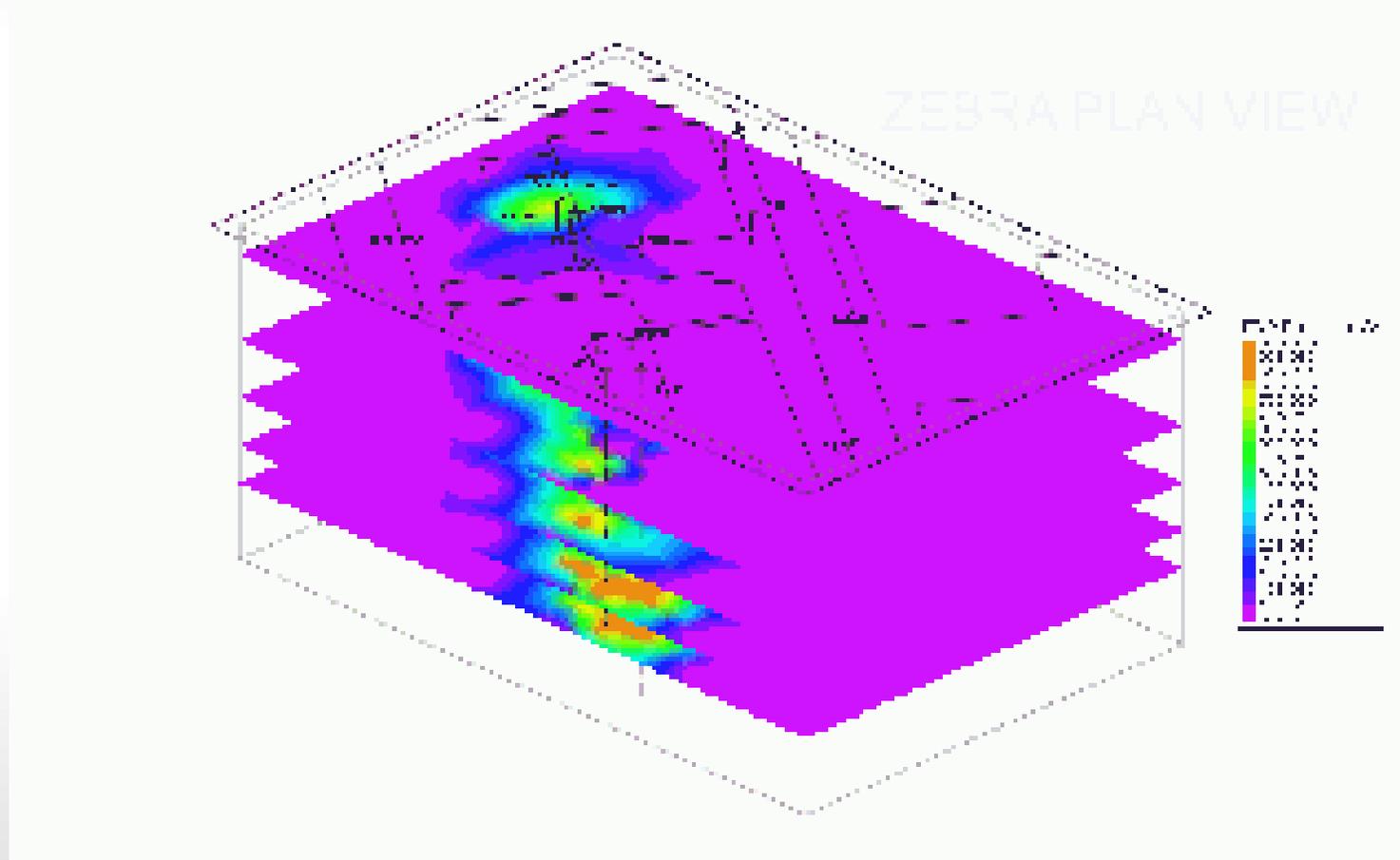
## Representação gráfica em seção e em corte (2D)



Seção de leituras por ECD

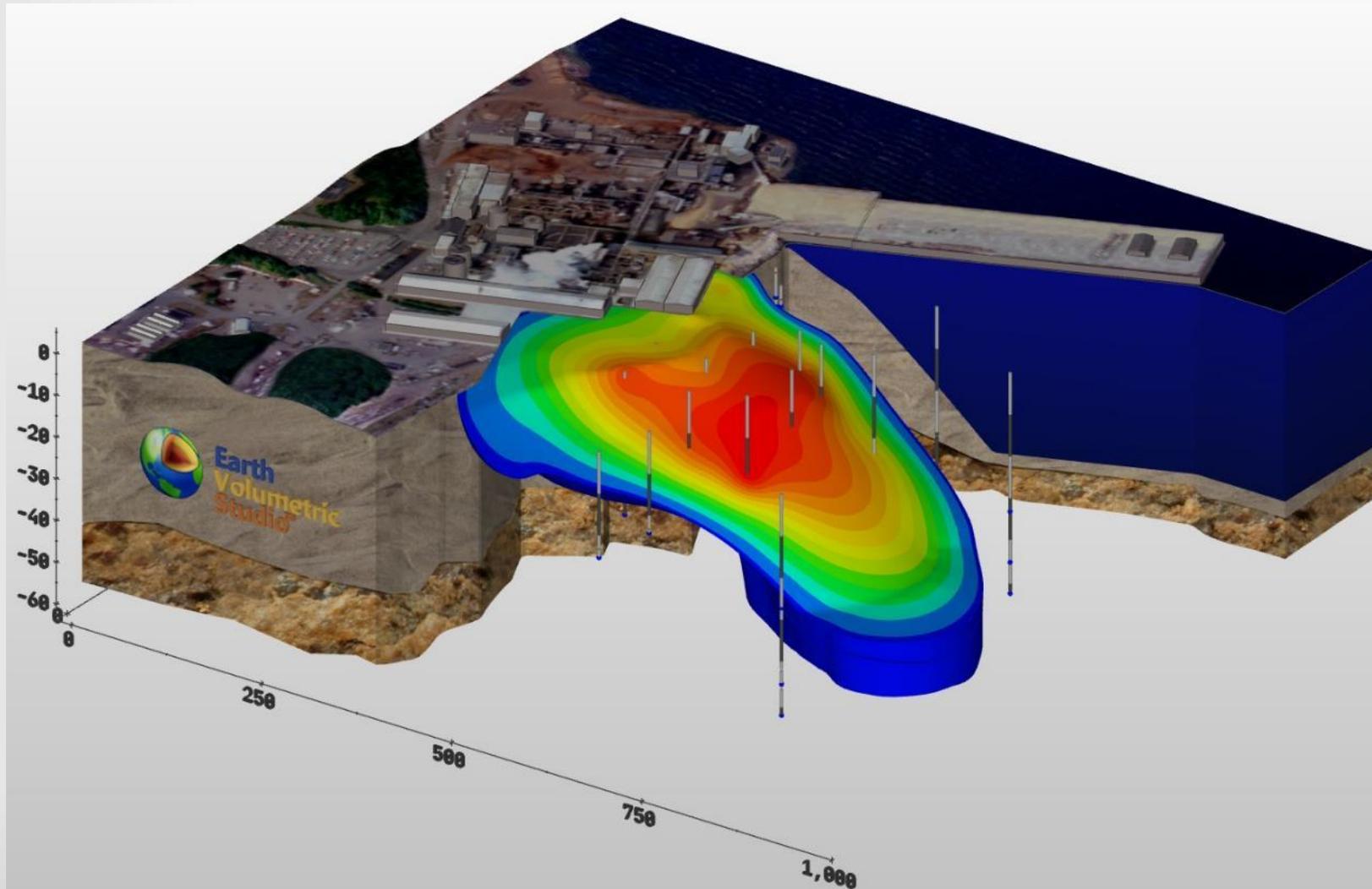


## Representação gráfica em seção e em cortes (2D)



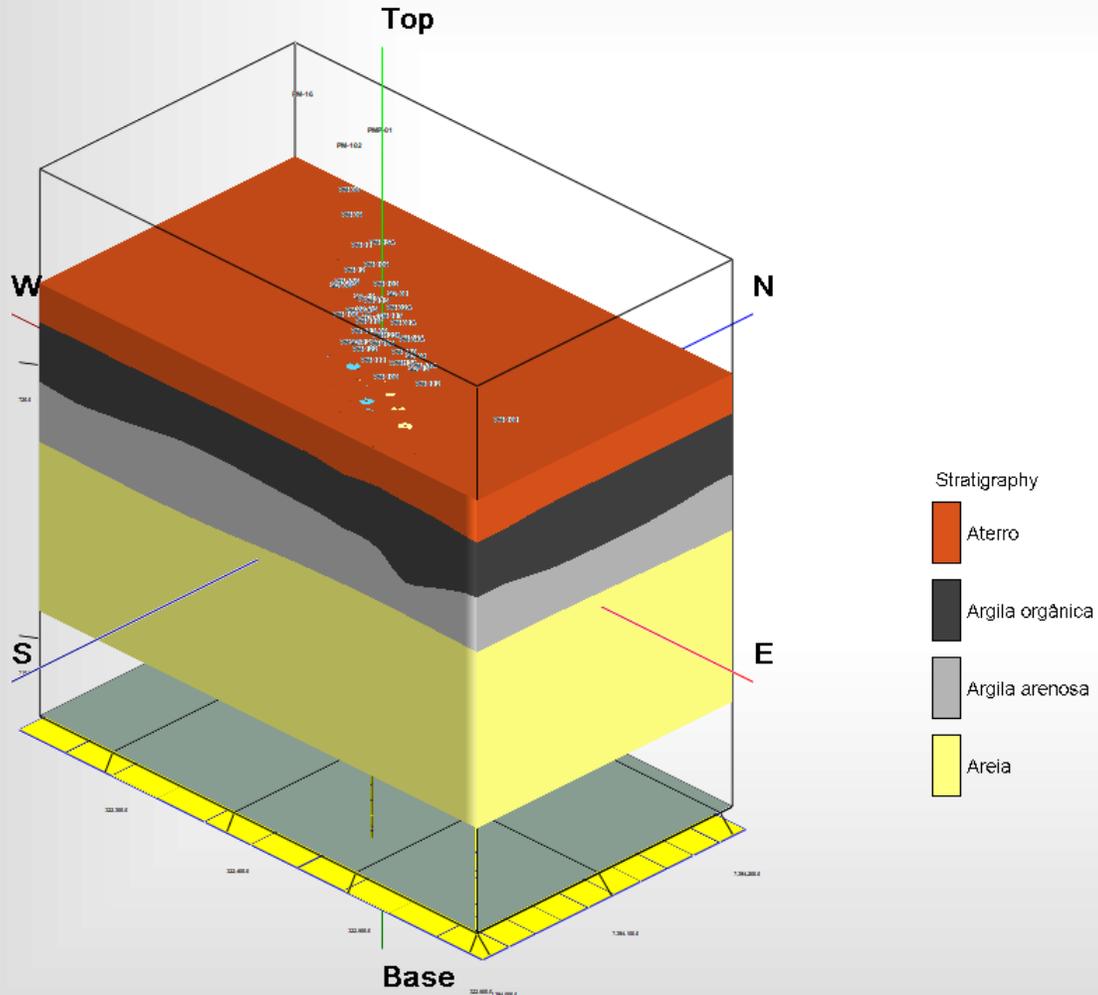
Sobreposição de planos de interpolação com resultados de ECD (ZEBRA, 2014)

## Novos sistemas de gerenciamento e visualização de dados



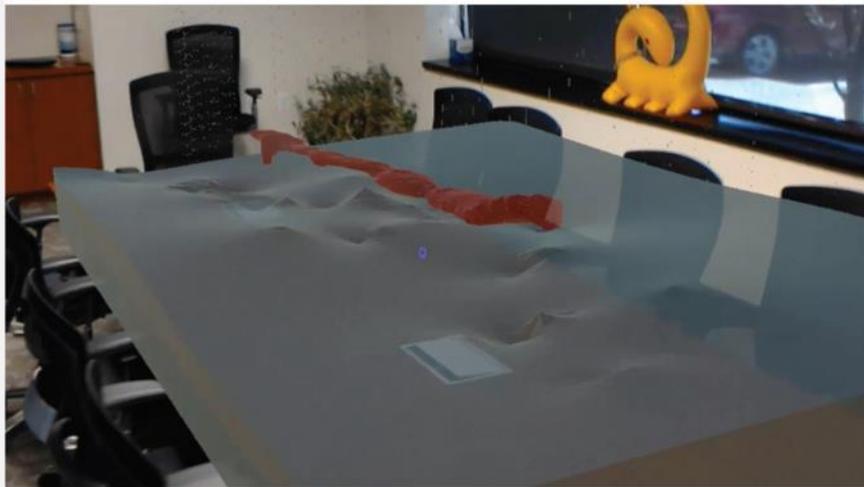
Modelos 3D

## Novos sistemas de gerenciamento e visualização de dados

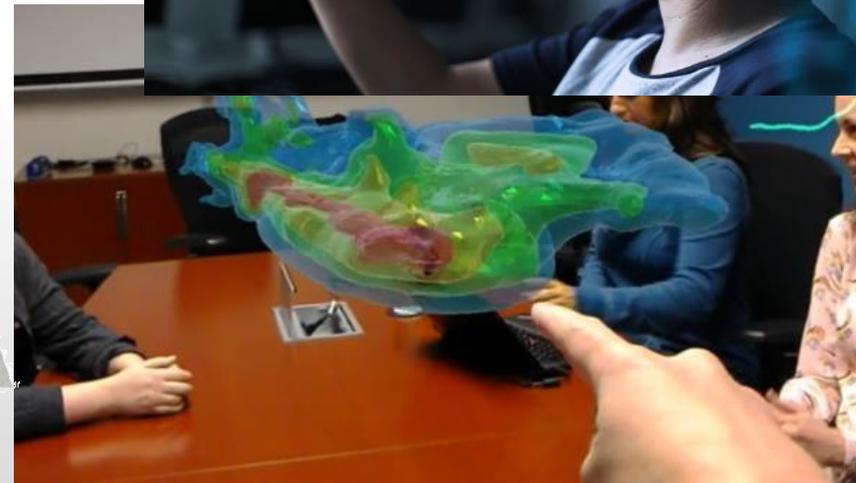
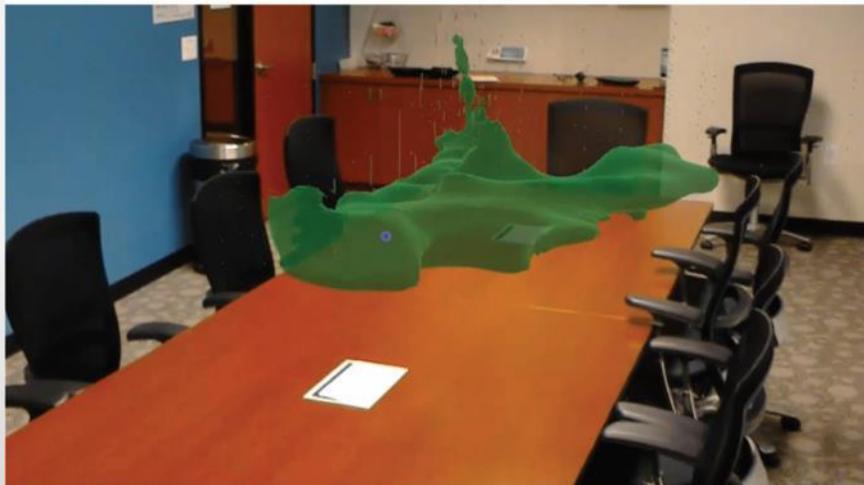


## Representação gráfica com Realidade Aumentada (AR)

(a)



(b)



# Principais considerações

- As abordagens tradicionais de investigação, muito baseadas em PMs, forneciam dados ambientais de baixa resolução e MCAs incertos, fazendo com que muitos projetos de remediação perdessem o alvo;
- Coletar muitos dados de 2ª classe para reduzir a incerteza do MCA, otimizando as amostragens certificadas, é uma estratégia de investigação ideal;
- Mapear a descarga de massa, usando transectos, ajuda a superar os desafios das heterogeneidades do subsolo;
- A descarga em massa ocorre em uma pequena proporção do aquífero – por isso é preciso encontrá-las para focar a remediação, de forma mais rápida e barata.

# Principais considerações

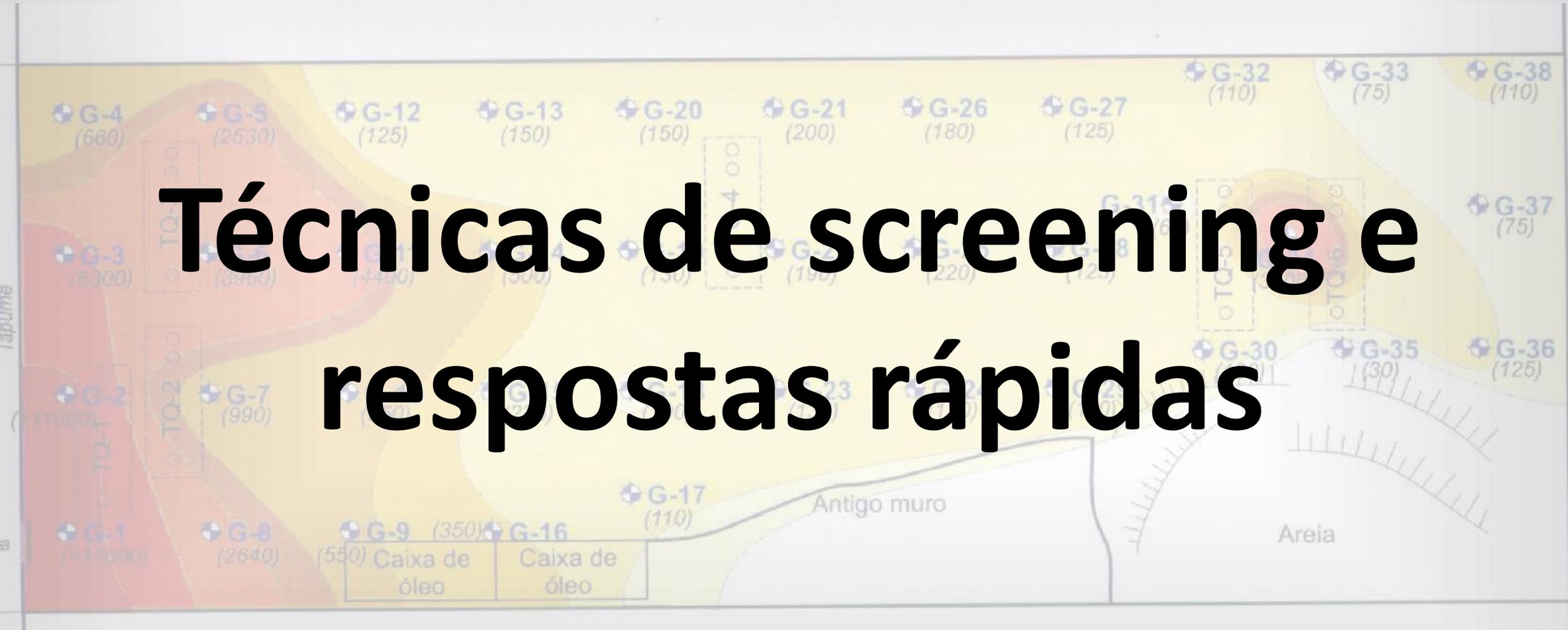
- A aplicação da HRSC, com estratégias dinâmicas de investigação, fornece um MCA detalhado, suportando a implementação de remediações direcionadas, eficientes e mais rápidas e sustentáveis;
- Ver insights de subsuperfície em 3D e 4D traz maior clareza e confiança às partes interessadas;
- HRSC é cara?
  - Caro é projetar remediações (com incertezas) com base em dados fracos;
  - Deve-se considerar o ciclo de vida dos projetos e o Retorno dos Investimentos da Investigação (ROI)



Dúvidas?

The background features a 3D geological model with a topographic map overlay. The map shows contour lines and elevation values such as 780, 740, 803.5, 70, and 903.700. A compass rose is visible in the bottom left corner, and a scale bar with values 126.100 and 126.200 is at the bottom. The text 'Dúvidas?' is prominently displayed in the center.

# Técnicas de screening e respostas rápidas



# Técnicas da Varredura (*Screening*)

Onde amostras? Quantas amostras?

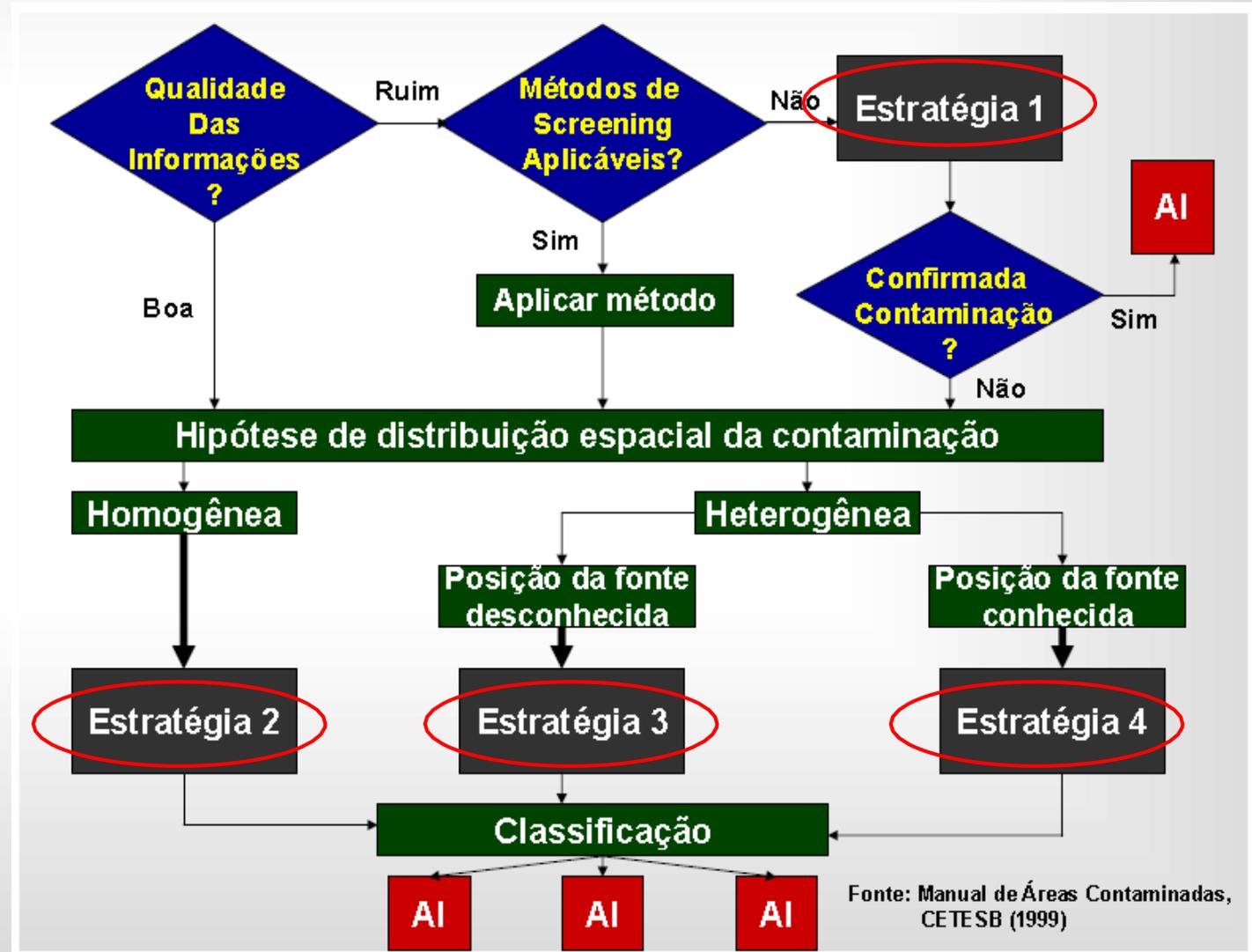


Ex: Pátio de depósito de sucatas



Ex: Pátio de depósito de dormentes

Estratégia de Amostragem para Investigação Confirmatória



# Quando usar técnicas de varredura (screening)?

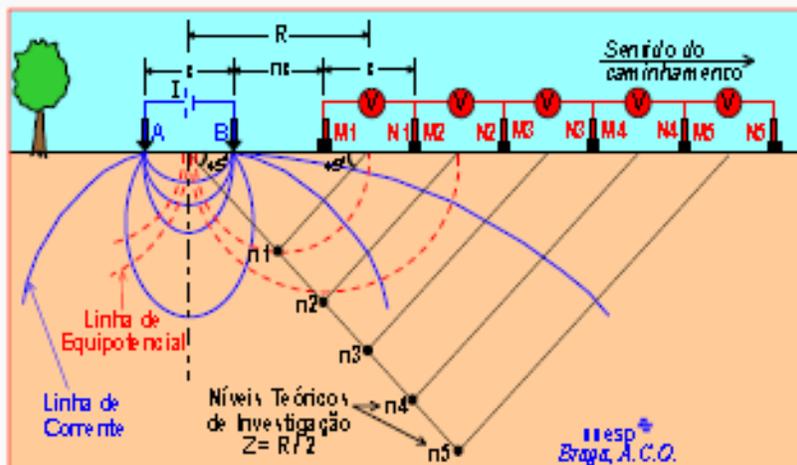
## Segundo a DD-38-2017-C (CETESB):

“Item 4.1.3 – Avaliação Preliminar

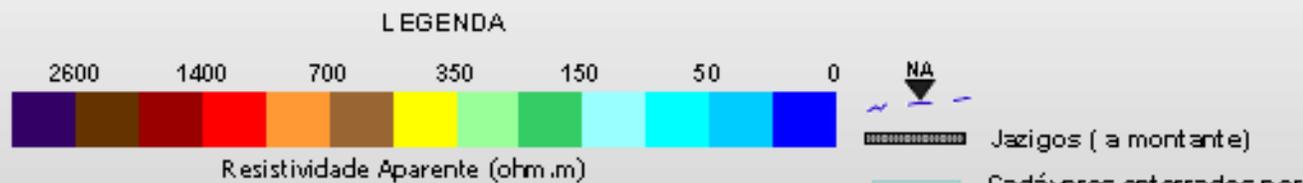
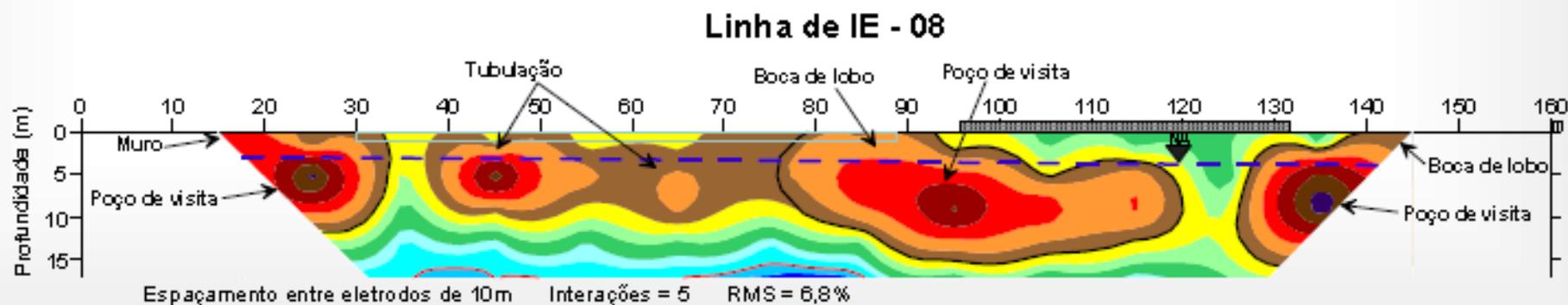
k) Plano de Investigação Confirmatória.

...MCA1 B ou MCA1 C: “aplicável quando foram determinadas incertezas quanto à identificação, caracterização e localização de áreas fonte e/ou das fontes potenciais de contaminação ... Para essa situação o Plano de Investigação Confirmatória deverá ser elaborado com base na Estratégia 2, que se caracteriza pelo emprego de métodos de investigação que proporcionem informações sobre o meio físico ou sobre a natureza e a distribuição das SQIs (como por exemplo, **métodos de screening e geofísicos**), ou que o plano de amostragem adote abordagem probabilística, de modo a possibilitar o direcionamento, ou o posicionamento adequado das amostragens.”

## Métodos geofísicos



Ex: Imageamento Elétrico



## Métodos de *Screening* – *Soil Gas Survey*



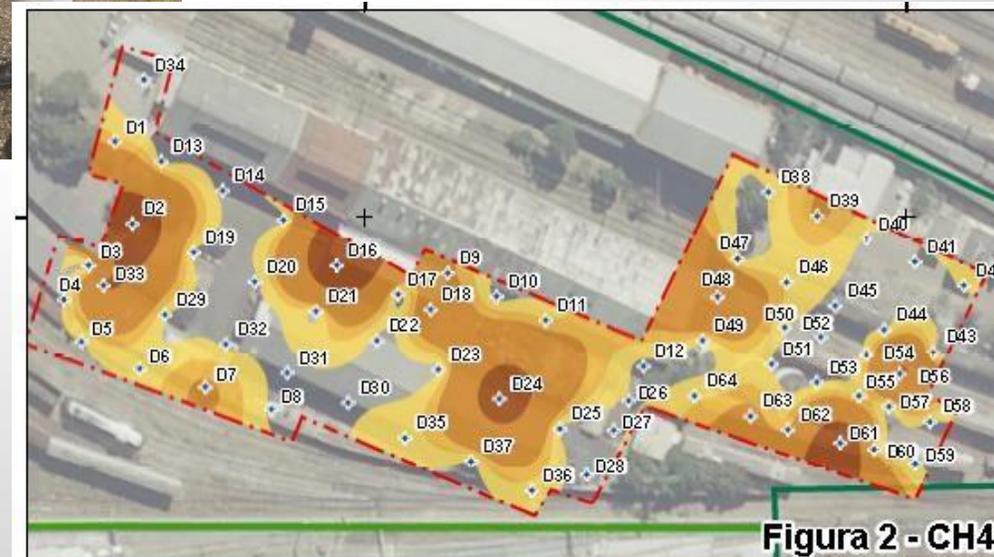
IPT (2015)

### **ASTM D7648-12**

Standard Practice for Active Soil Gas Sampling for Direct Push or Manual-Driven Hand-Sampling Equipment

### **ASTM D5314-92e1**

Standard Guide for Soil Gas Monitoring in the Vadose Zone



## Medições de gases e vapores com analisadores portáteis de campo



**LANDTEC GEM**

NDIR e Eletroquímico  
CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> (%) e %LEL  
Pressão diferencial e estática  
CO e H<sub>2</sub>S (ppm) opcional



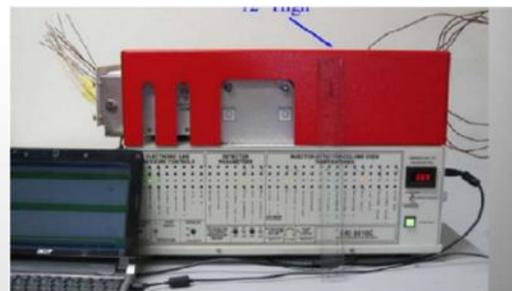
**GAS ALERT MICRO**

Sensores variáveis  
VOC (ppm), O<sub>2</sub> (%), CO (ppm), H<sub>2</sub>S  
(ppm), LEL (%)



**MiniRAE e PHOTOCHECK TIGER**

Fotoionização  
VOC (ppm)



**GC PORTÁTIL SRI**

GC com sensores variáveis



**FROG 4000**

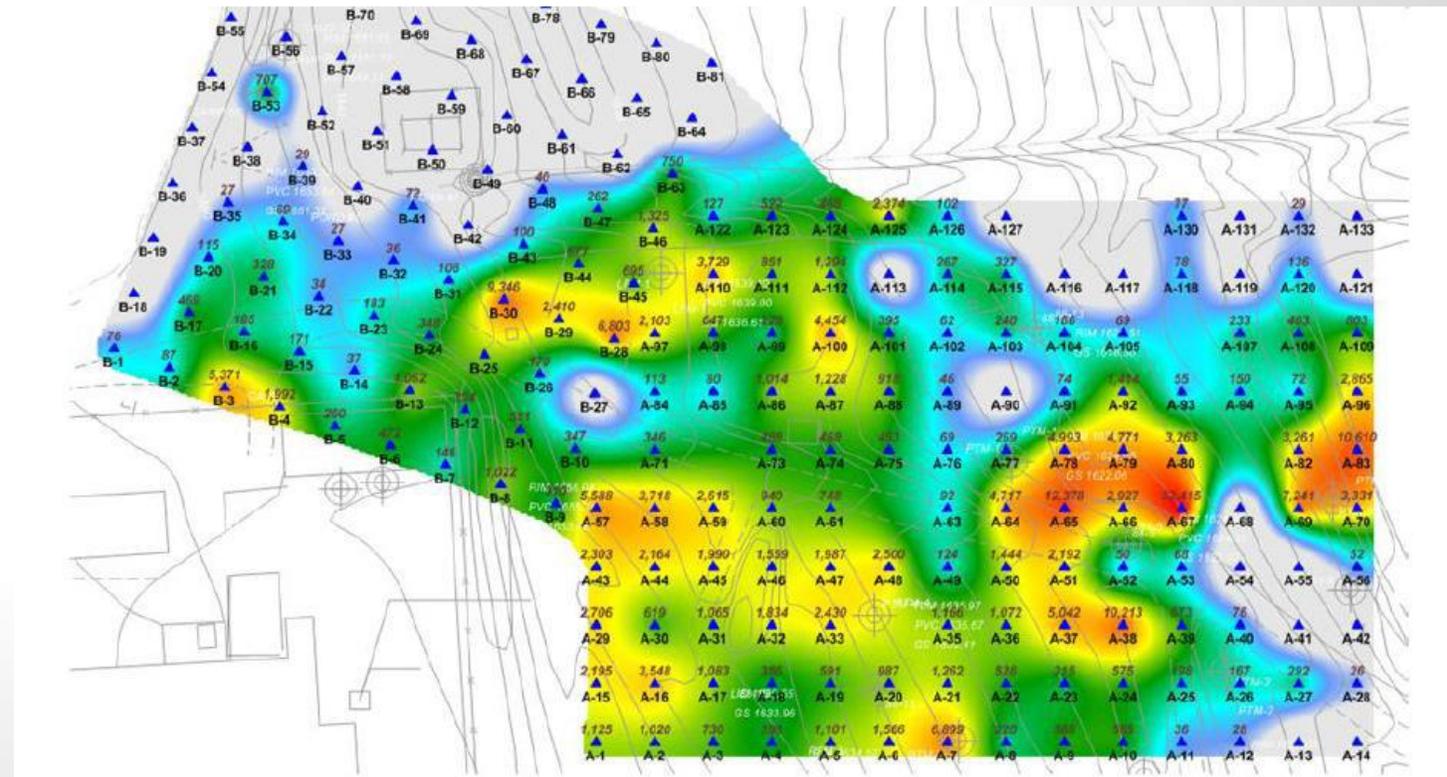
GC/PID  
VOC



**HAPSITE**

GC/MS  
VOC

## Métodos de *Screening* – Amostragem passiva de vapores



*Técnica de screening de amostragem passiva de vapores*

## Malha de análise de metais totais no solo com Fluorescência de Raio-X (XRF)

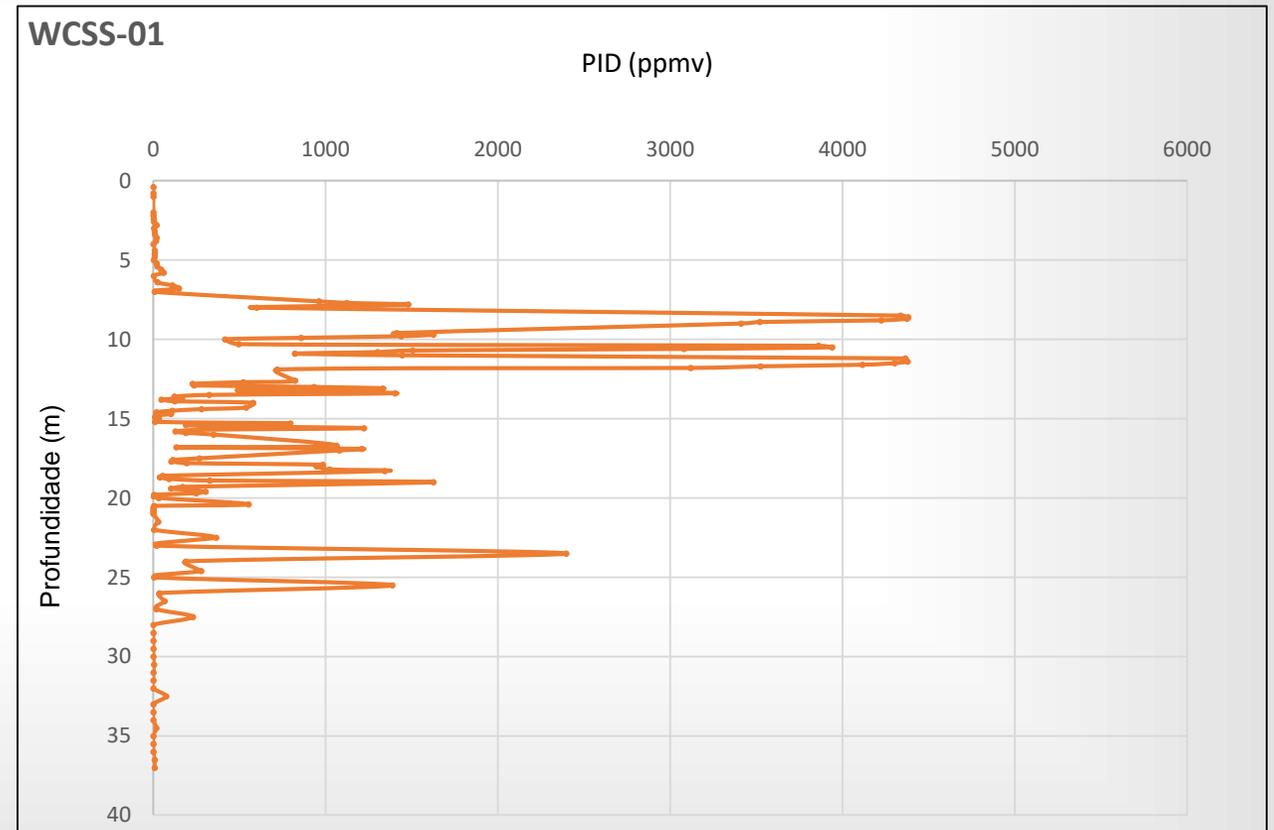


<https://www.olympus-ims.com/en/>



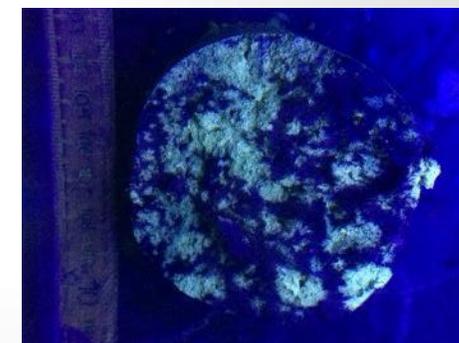
- Localização Dos Quadrantes
- Pontos de Coleta

## Varredura de compostos orgânicos voláteis (VOCs) em amostras de solo



## Varredura de LNAPL em amostras de solo com radiação ultravioleta

- O método que consiste em aplicar luz ultravioleta (UV-A – 380 a 420 nm), sobre as amostras de solo contaminadas por hidrocarbonetos de petróleo;
- Os elétrons dos compostos aromáticos presentes nos hidrocarbonetos absorvem energia em um determinado comprimento de onda e emitem essa energia recebida na forma de fluorescência, que pode ser detectada por algum instrumento, ou a olho nu;
- Permite a seleção de amostras com maiores indícios de contaminação, para uma amostragem mais assertivas.



RIYIS et al, 2019



## Shake Test<sup>®</sup> - testes de campo para detecção de fase residual de LNAPL ou DNAPL

- Teste colorimétrico com corante (Sudan IV)

<https://www.clean.com.br/Produto/Detalhe/121>

<https://youtu.be/INaJL1R1VzY>



RemScan: analisador portátil de Hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH) + Textura do solo



## Laboratórios móveis para análises em campo (gases e vapores)



Rapid Screening Plus Monitoring

VaporSe

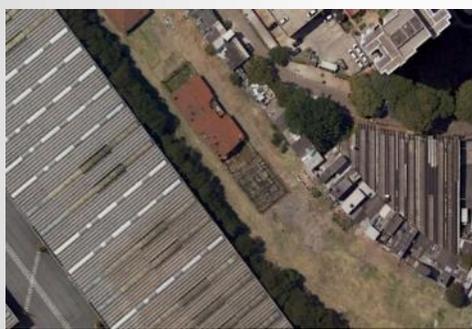
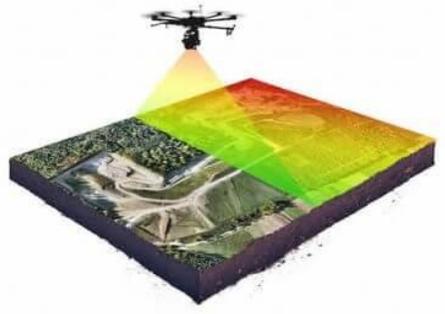


<https://www.clean.com.br/Servico/Index/laboratorio-movel-para-hrsc-vapor-safe-remediacao-vapores-clean>

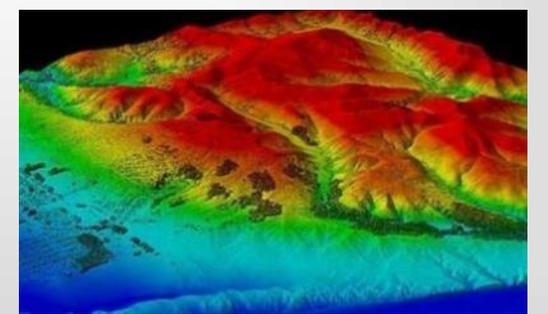
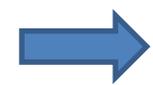
<https://vaporsolutions.com.br/service/vfast/>

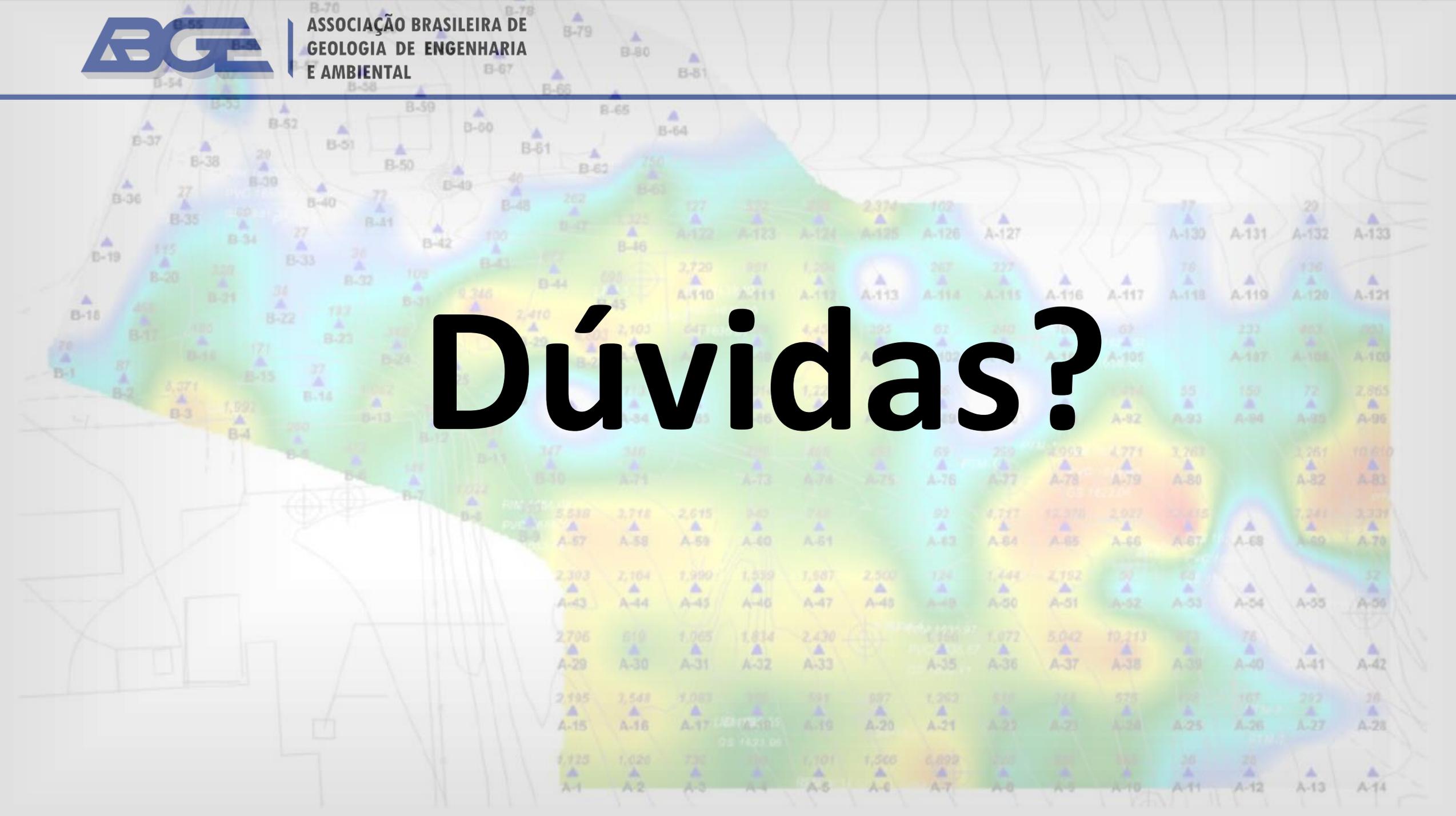
# Técnicas Inovadoras para mapeamento em alta resolução

## Drones (UAV)



## LIDAR – Light Detection and Ranging



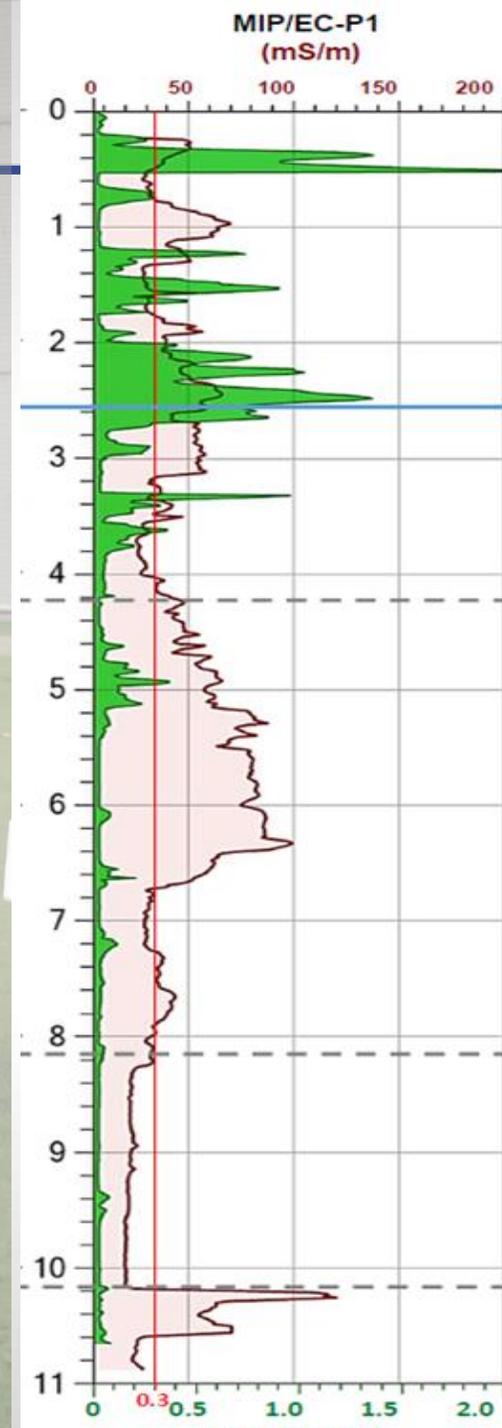


# Dúvidas?

# INTERVALO



# Técnicas de investigação de alta resolução (HRSC)



# Quando usar investigação de alta resolução?

Segundo a DD-38-2017-C (CETESB):

“Item 4.1.5.

...Observação 1: Recomenda-se a utilização de **métodos de investigação de alta resolução** na investigação de áreas com complexidades associadas ao meio físico e à distribuição das substâncias químicas de interesse, além da localização de fontes primárias de contaminação não identificadas nas etapas de Avaliação Preliminar e Investigação Confirmatória.”



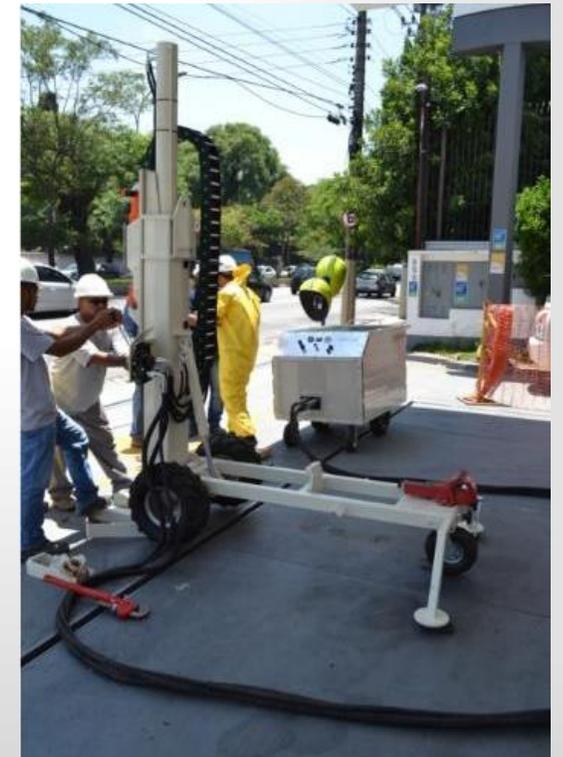
# Principais técnicas de HRSC para caracterização litológica e hidrogeológica

- Amostragem discreta e/ou contínua do perfil do solo pelos métodos *Direct Push (Whole Core Soil Sampling - WCSS)*;
- Amostragem contínua de meios consolidados e/ou fraturados (ex. Sondagem sônica);
- Técnicas geofísicas (em superfície, em poços ou sondagens);
- CPTu (Piezocone) e o RCPTu (Piezocone de Resistividade);
- Ponteiros com sensores de condutividade elétrica (EC);
- *Soil Colour Optical Screening Tool (SCOST)*;
- *Hydraulic Pressure Test (HPT)*;
- Medidores de fluxo em poços e/ou sondagens (e.g. *Vertical Flowmeter Logging, Point Velocity Probes*)
- Equipamentos para ensaios pontuais de condutividade hidráulica (*Direct Push Slug Test, Pneumatic Slug Testing*)

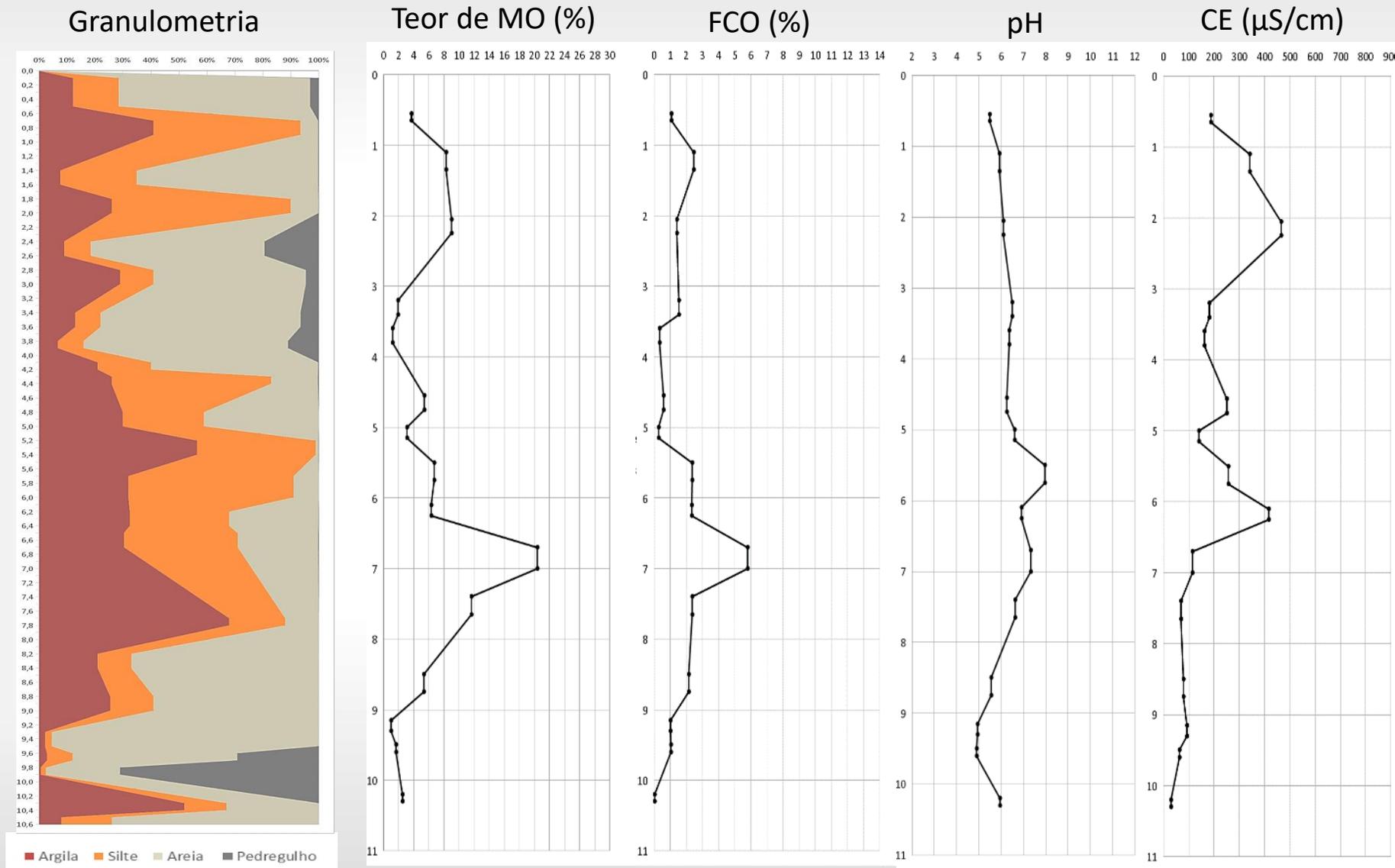


## Martelo Hidráulico – Geohammer – *Direct Push*

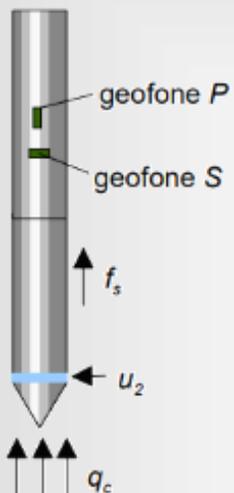
- Martetele fixado no sistema hidráulico ou montado sobre uma base;
- Equipamento para amostragem de solo ou realização de ensaios de HRSC pela técnica *direct push*;
- Cravação estática ou percussiva.







Perfis dos resultados de caracterização geotécnica em alta resolução.



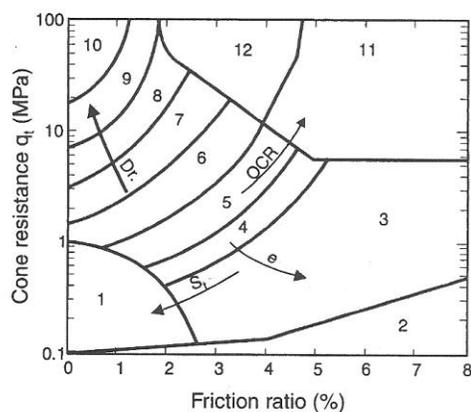
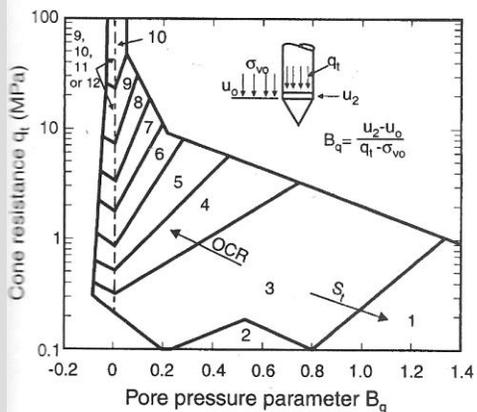
$q_t$  = resistência de ponta corrigida (Mpa)

Rf = razão de atrito (lateral) (%)

u = poro pressão (kPa)

Velocidade de cravação (estática) = 2 cm/s

Figura 1 Piezocone

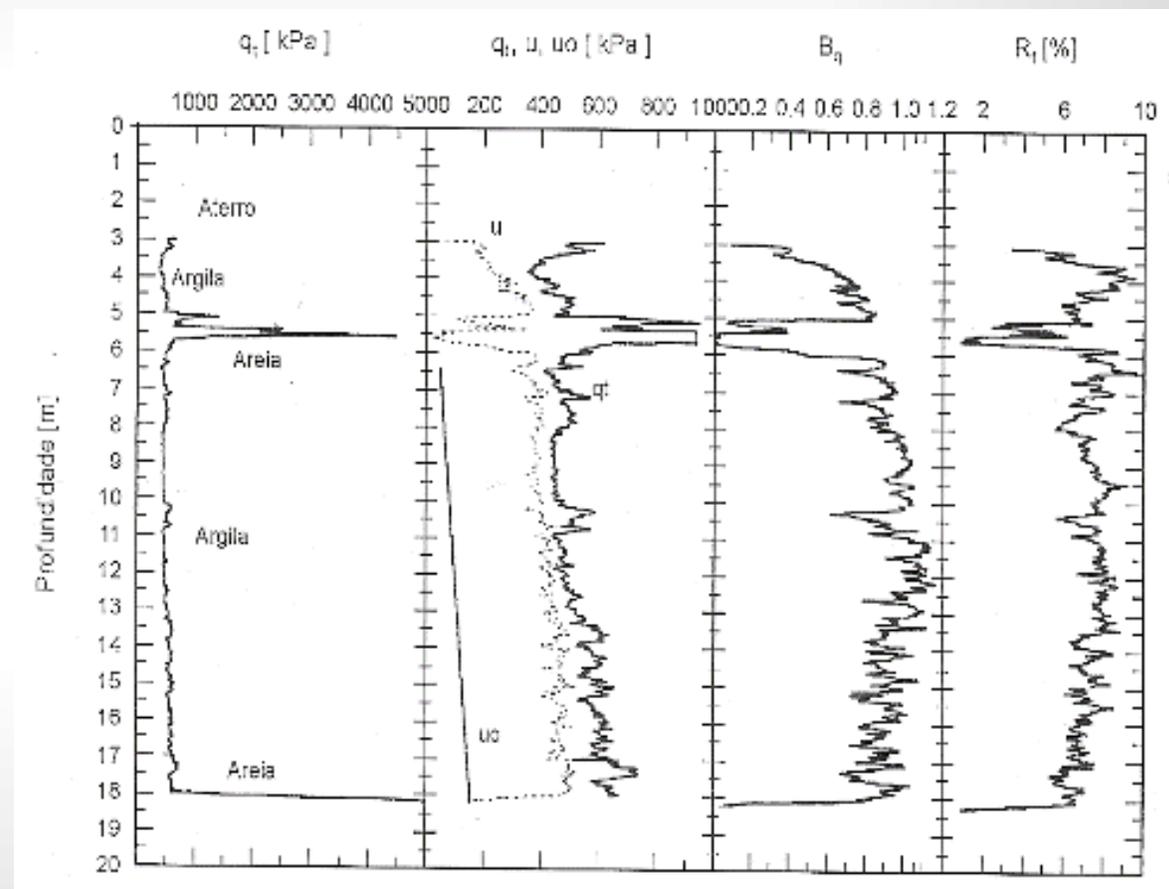


Zone: Soil Behaviour Type:

- |                           |                              |                              |
|---------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 5. Clayey silt to silty clay | 9. Sand                      |
| 2. Organic material       | 6. Sandy silt to clayey silt | 10. Gravelly sand to sand    |
| 3. Clay                   | 7. Silty sand to sandy silt  | 11. Very stiff fine grained* |
| 4. Silty clay to clay     | 8. Sand to silty sand        | 12. Sand to clayey sand*     |

\* Overconsolidated or cemented.

# CPTu e Piezocone



ASTM D5778–20 - Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils

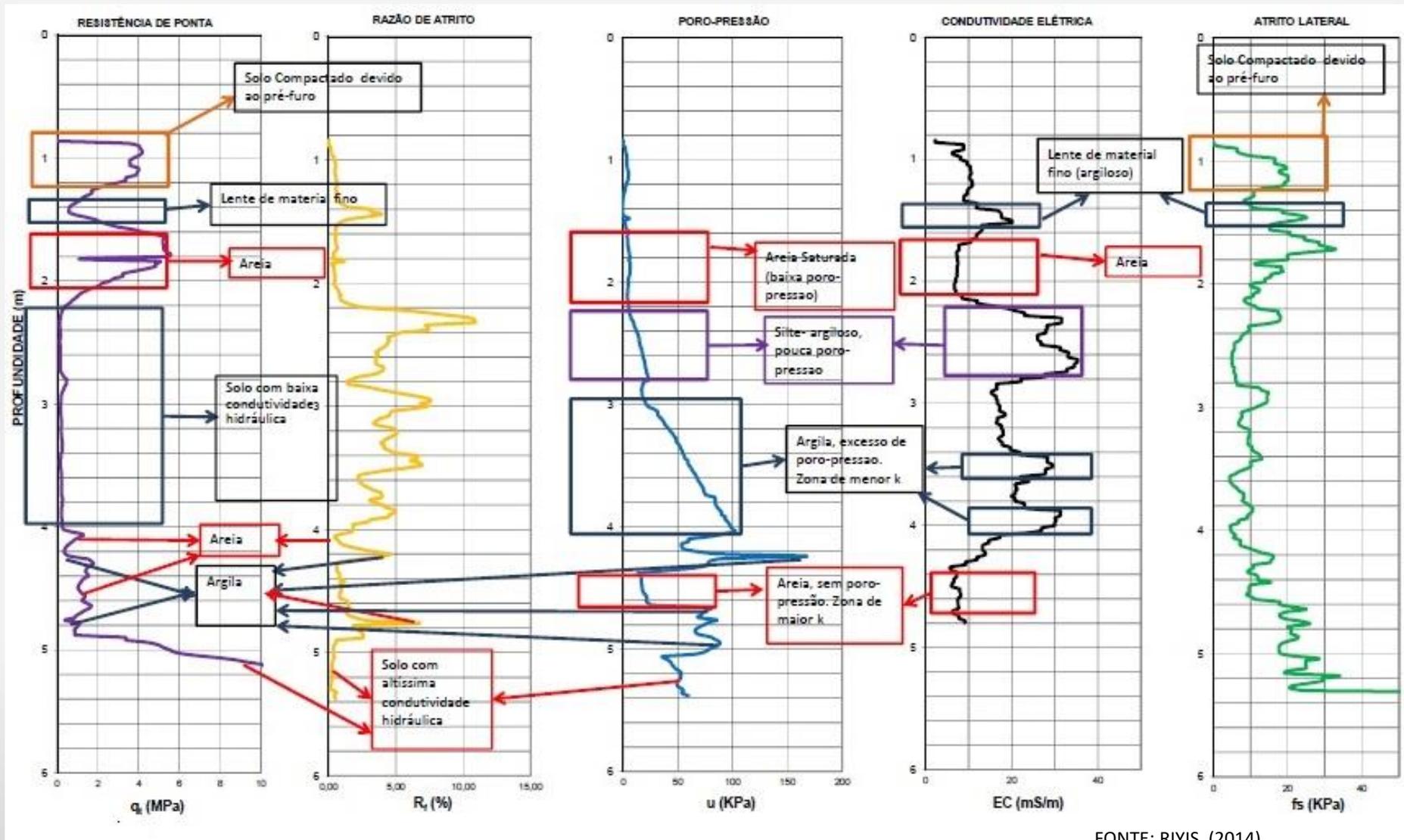
## Ensaios de Piezocone (CPTU) - Detalhes do ensaio



[https://youtu.be/h3HKuvFg\\_U0](https://youtu.be/h3HKuvFg_U0)

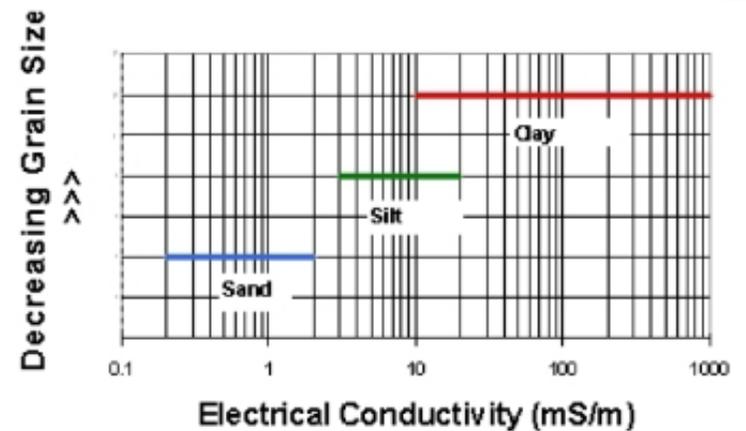
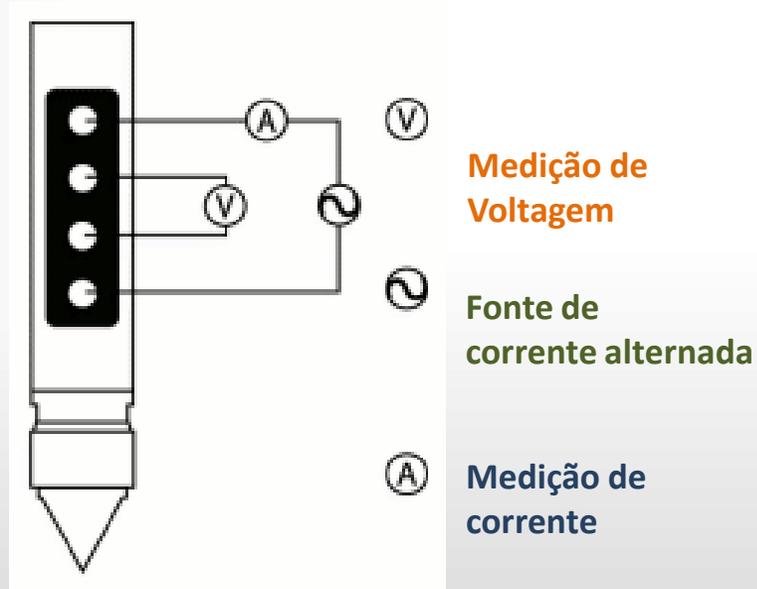
Fonte: Damasco Penna (2021)

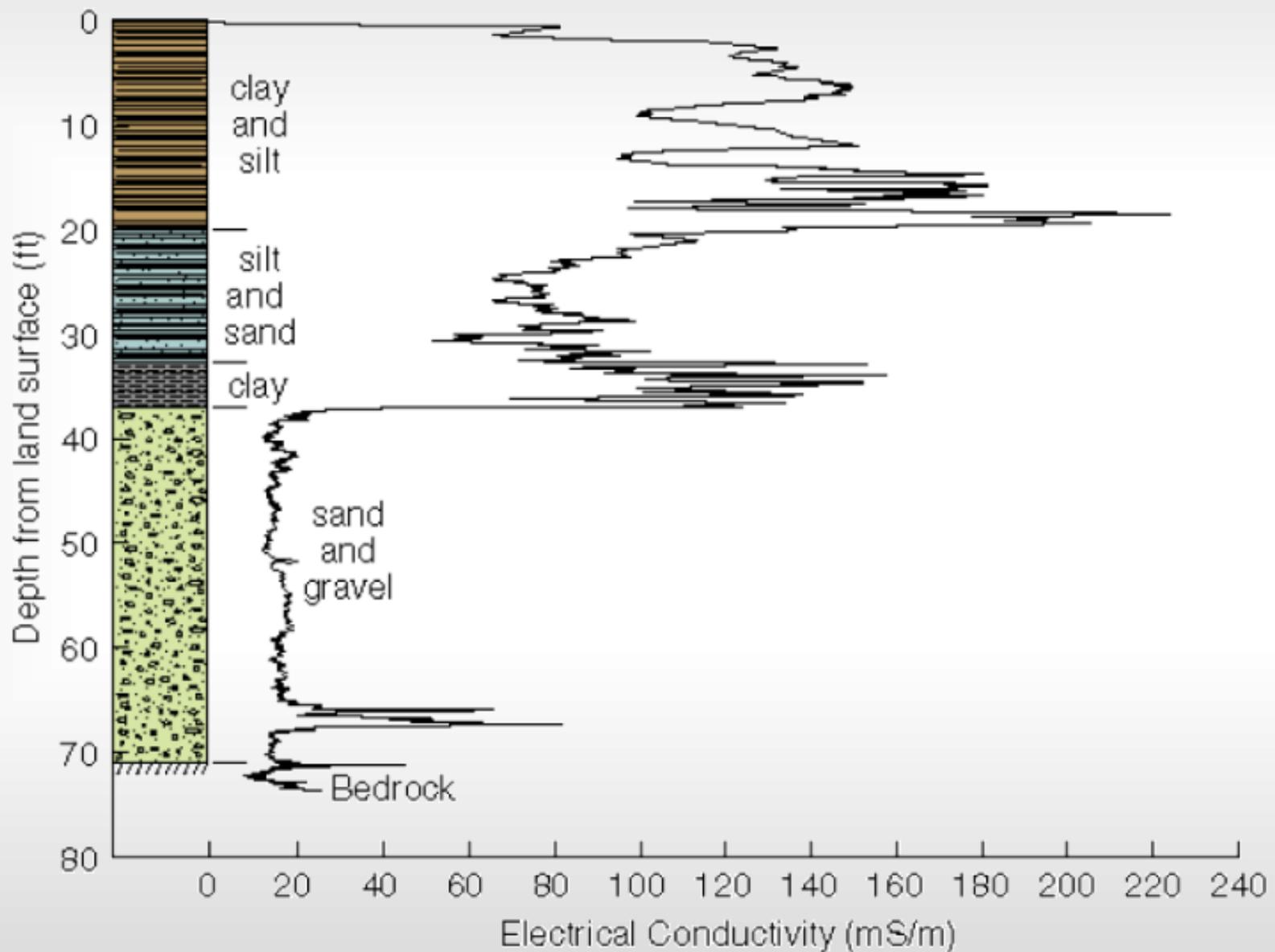
## Log de Piezocone de Resistividade (RCPTu)



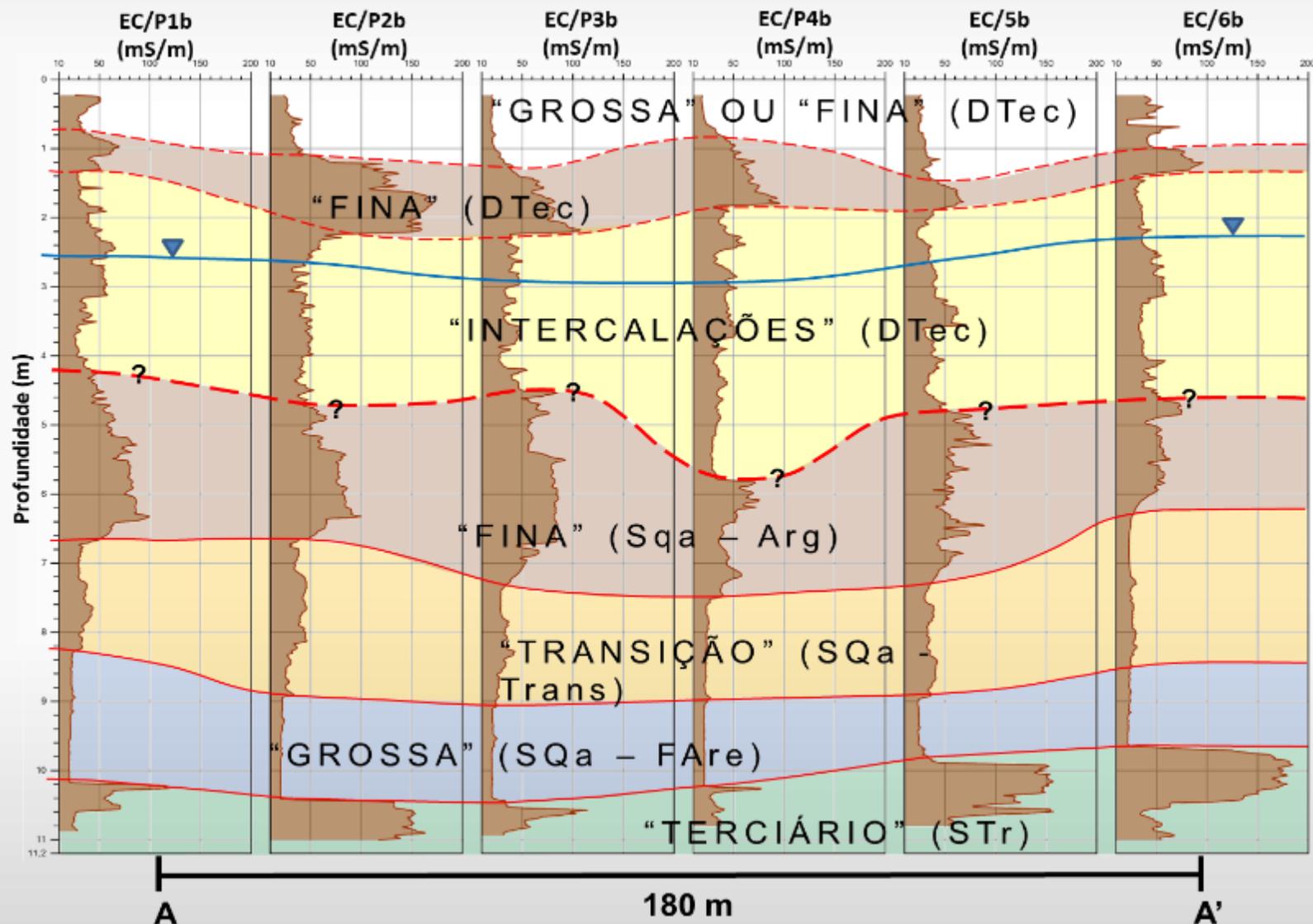
## Sonda de condutividade elétrica EC - (*Electrical Conductivity*)

- Utiliza as características de condutividade e resistividade dos solos como forma de classificação;
- Em geral, argilas exibem condutividade elétrica mais elevada do que areias e cascalhos;





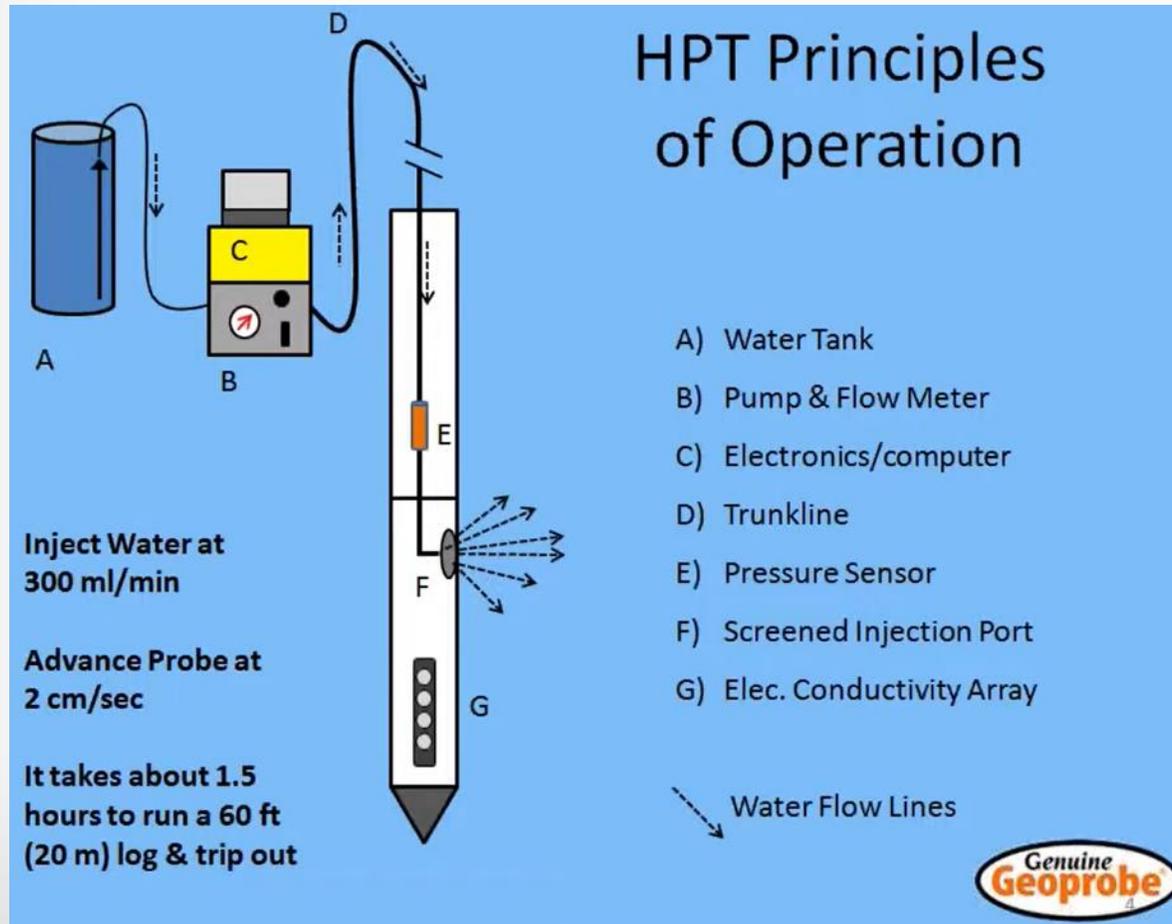
## Estratigrafia da área de várzea do Rio Tietê



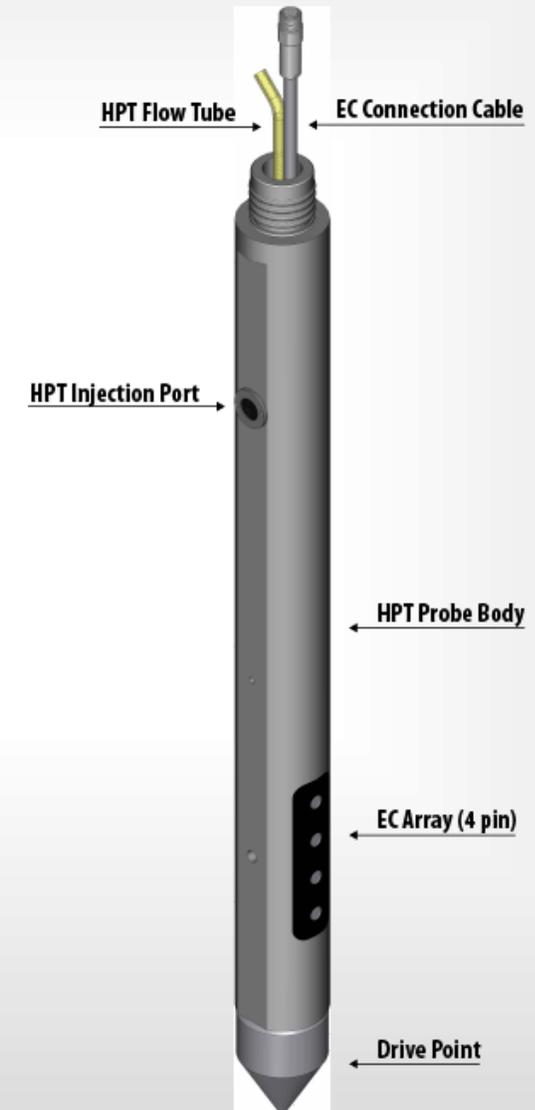
## HPT (*Hydraulic Profiling Tool*)

- Ferramenta para delineamento hidroestratigráfico em alta resolução;
- Indicador da permeabilidade da formação;
- Mede a pressão necessária para injetar um fluxo de água para o solo através de uma sonda;
- Determinação das camadas de fluxo e armazenamento;
- Também pode ser utilizado para medir a pressão hidrostática sob a condição de fluxo zero – determinação do N.A.
- Sonda geralmente equipada com sensor EC para correlação dos perfis e auxílio na interpretação hidroestratigráfica;

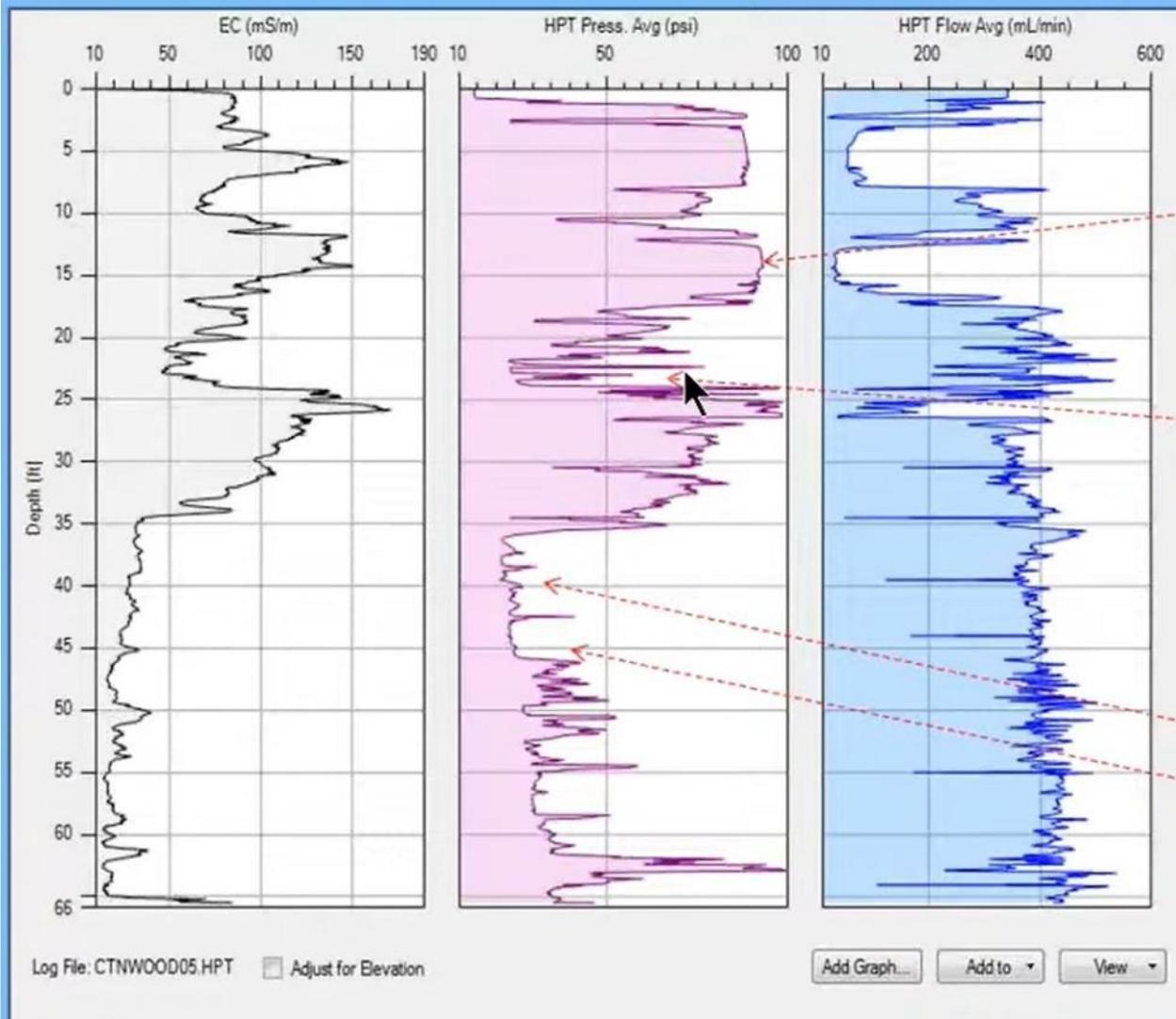
# HPT (*Hydraulic Profiling Tool*)



(GEOPROBE, 2013)



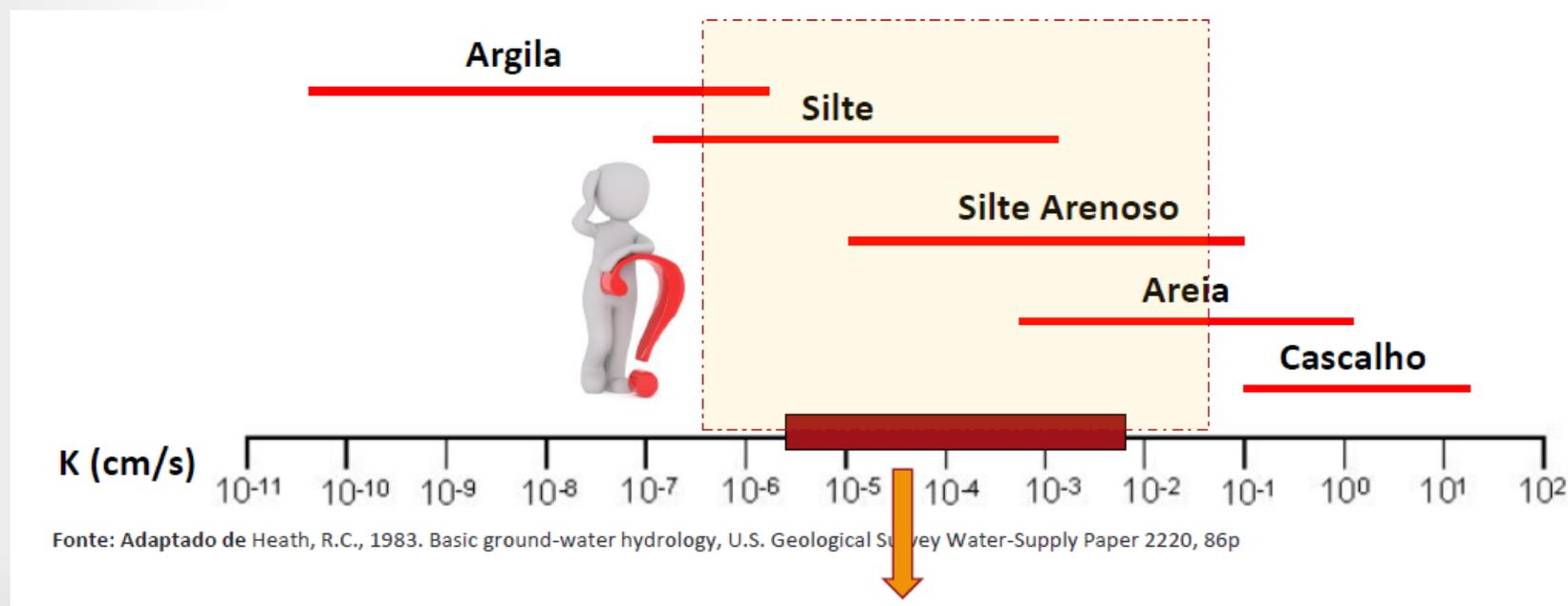
## A Basic HPT Log & Interpretation



## Estimativa da condutividade hidráulica da formação (zona saturada)

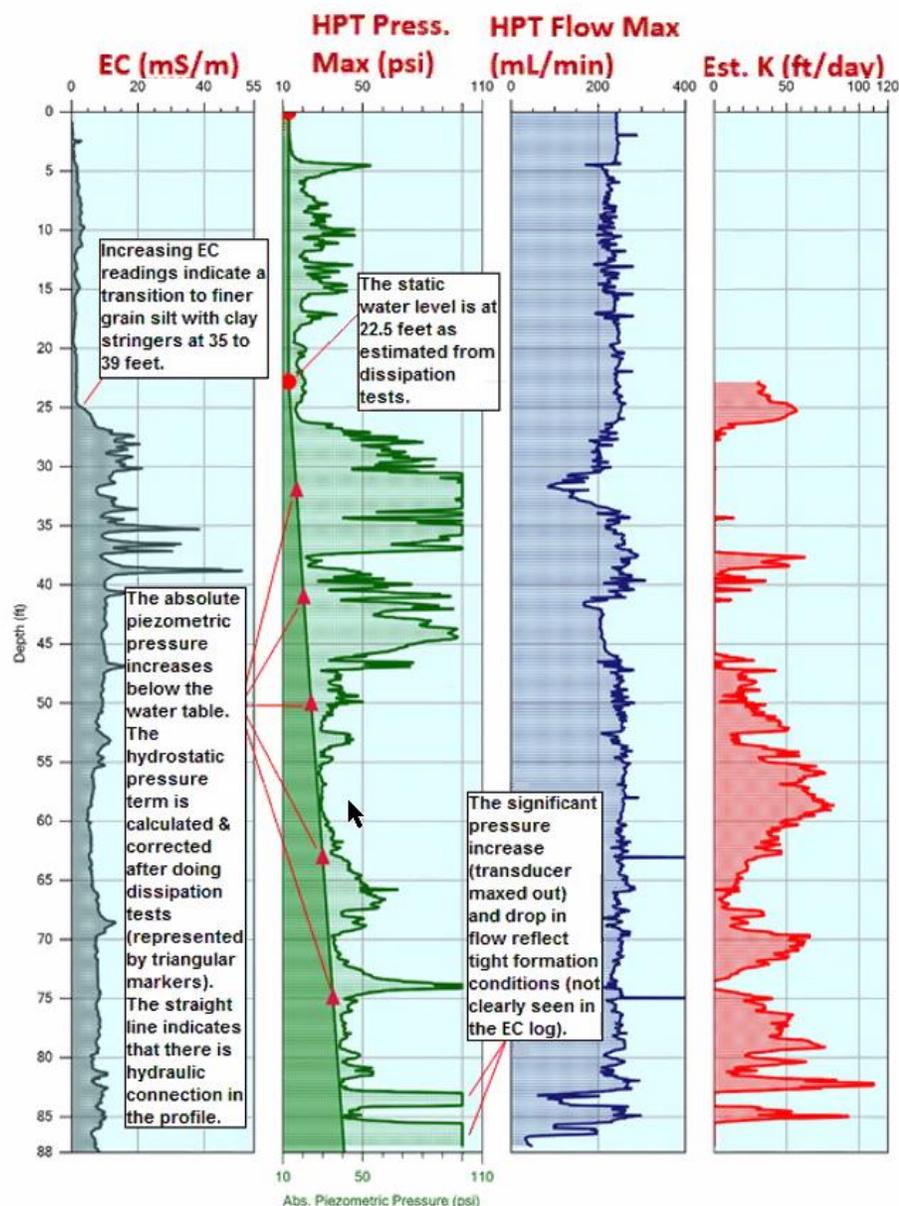
- Função do fluxo (Q) e da pressão de injeção corrigida ( $P_c$ ):

$$\text{"K"} \text{ estimado} = f(Q/P_c)$$



Estimativas razoáveis na faixa: 0,03 a 25 m/dia

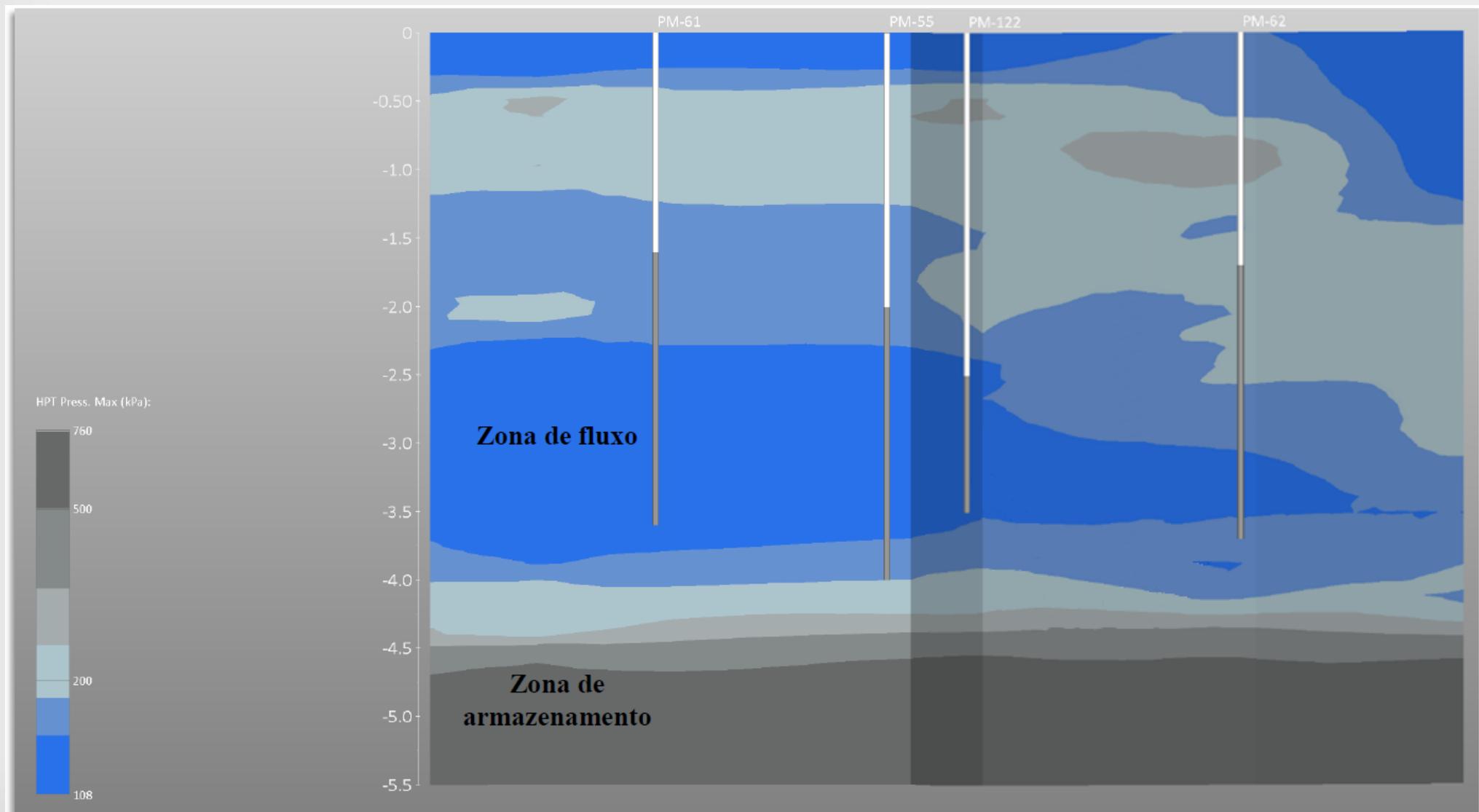
Geoprobe (2010)



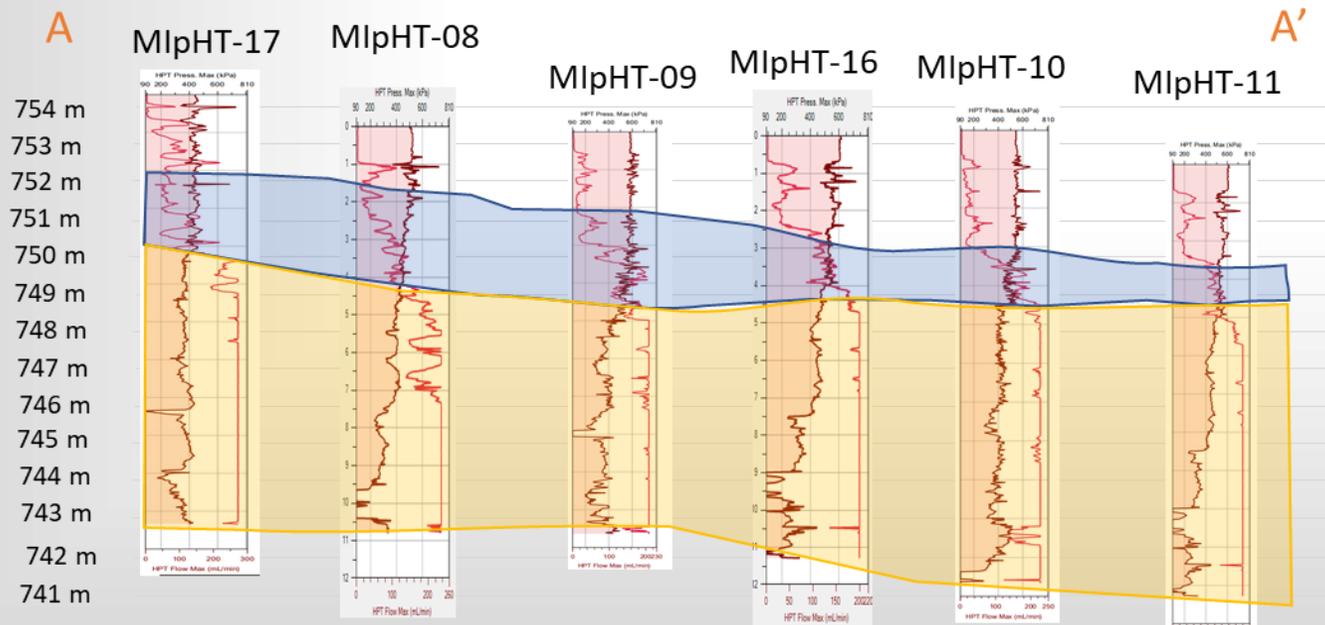
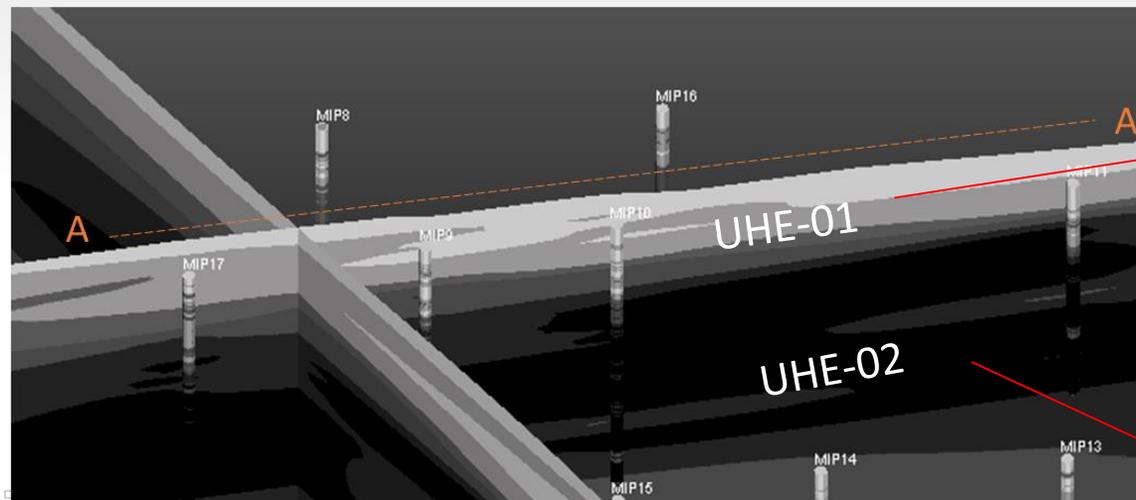
## Em geral:

- Fluxos baixos & altas pressões de injeção = materiais de baixa permeabilidade;
- Fluxos altos & baixas pressões de injeção = materiais de alta permeabilidade;
- Altos valores de EC indicam materiais de textura fina, particularmente sedimentos ricos em argila (tipicamente acima de 50 mS/m);
- O EC também pode responder a líquidos lixiviados (ex. chorume); intrusão salina; fluidos de remediação (ex. oxidantes químicos); plumas ácidas; etc.

# HPT (*Hydraulic Profiling Tool*)



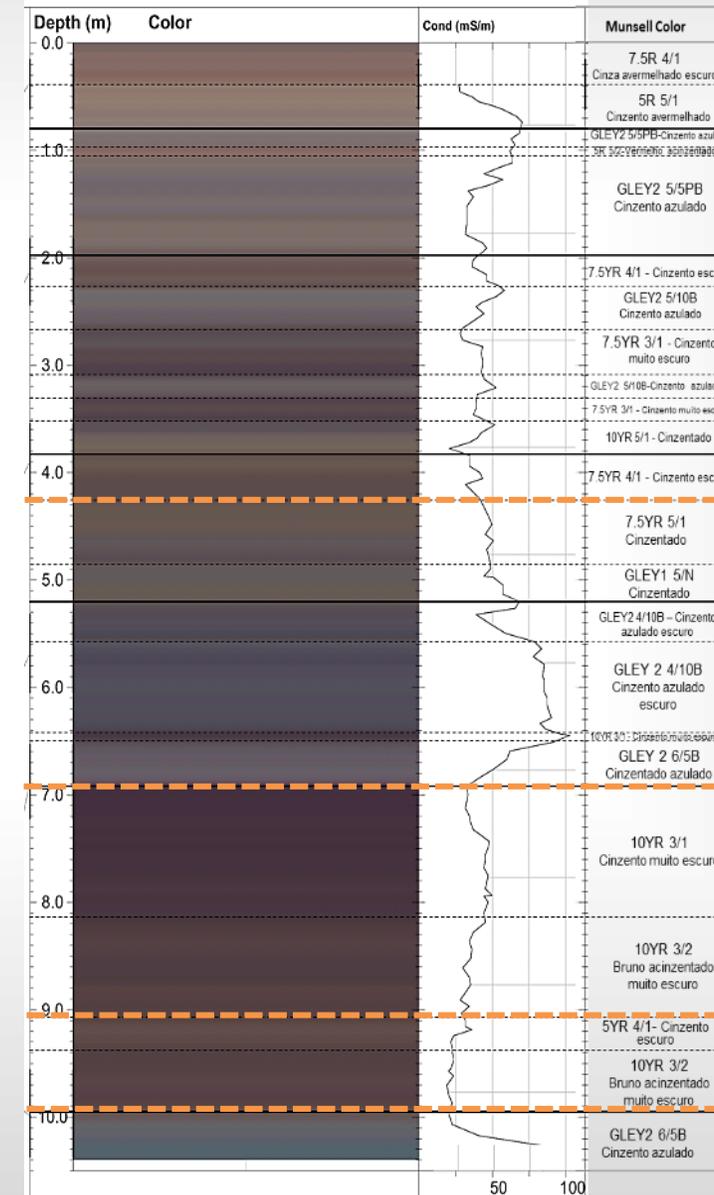
Logs dos ensaios de HPT, com interpretação das unidades hidroestratigráficas



- UHE-01 Zonas de Adveção / Baixa Adveção:  $k \cdot 10^{-4}$  a  $10^{-6}$  cm/s
- UHE-02 Zonas de Armazenamento:  $k \cdot 10^{-6}$  a  $10^{-8}$  cm/s
- Pressão de Injeção HPT
- Vazão de Injeção HPT

## Soil Colour Optical Screening Tool (SCOST)

- O perfil de cores do subsolo pode ser utilizado na diferenciação e identificação litoestratigráfica, identificação pedológica e aferições do estado de oxirredução;
- Identificação das cores com base na Carta de Munsell;
- Sonda acoplada com sensor EC: Correlação das camadas com as feições elétricas;
- Inferências sobre as condições de drenagem e estado de oxirredução, bem como identificar camadas ricas em matéria orgânica, potenciais fontes geradoras de biogás (CA-EPA, 2012);



Interpretação  
Litoestratigráfica

**DTec**

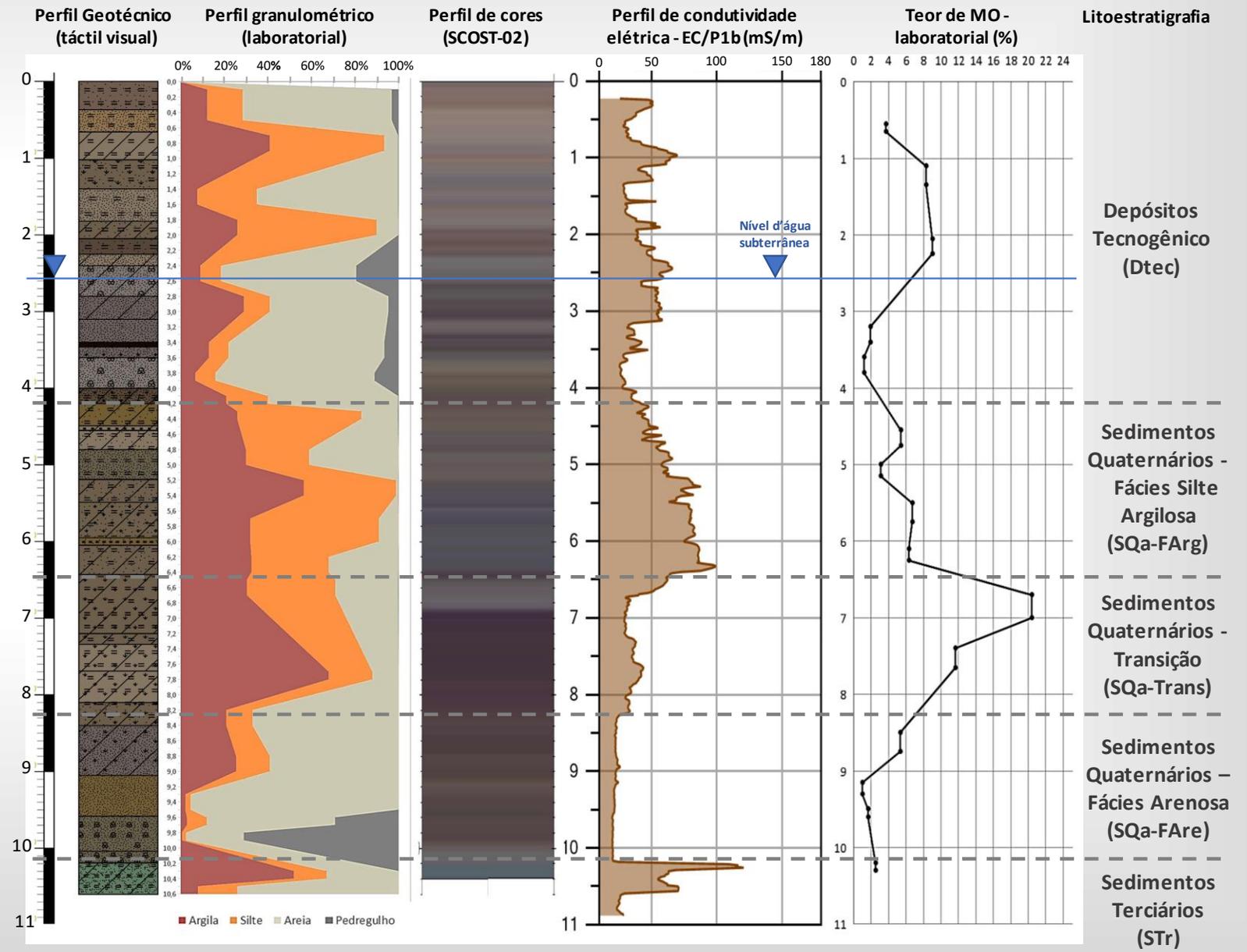
**SQa-Arg**

**SQa-Arg**

**Sqa-Are**

**STr**

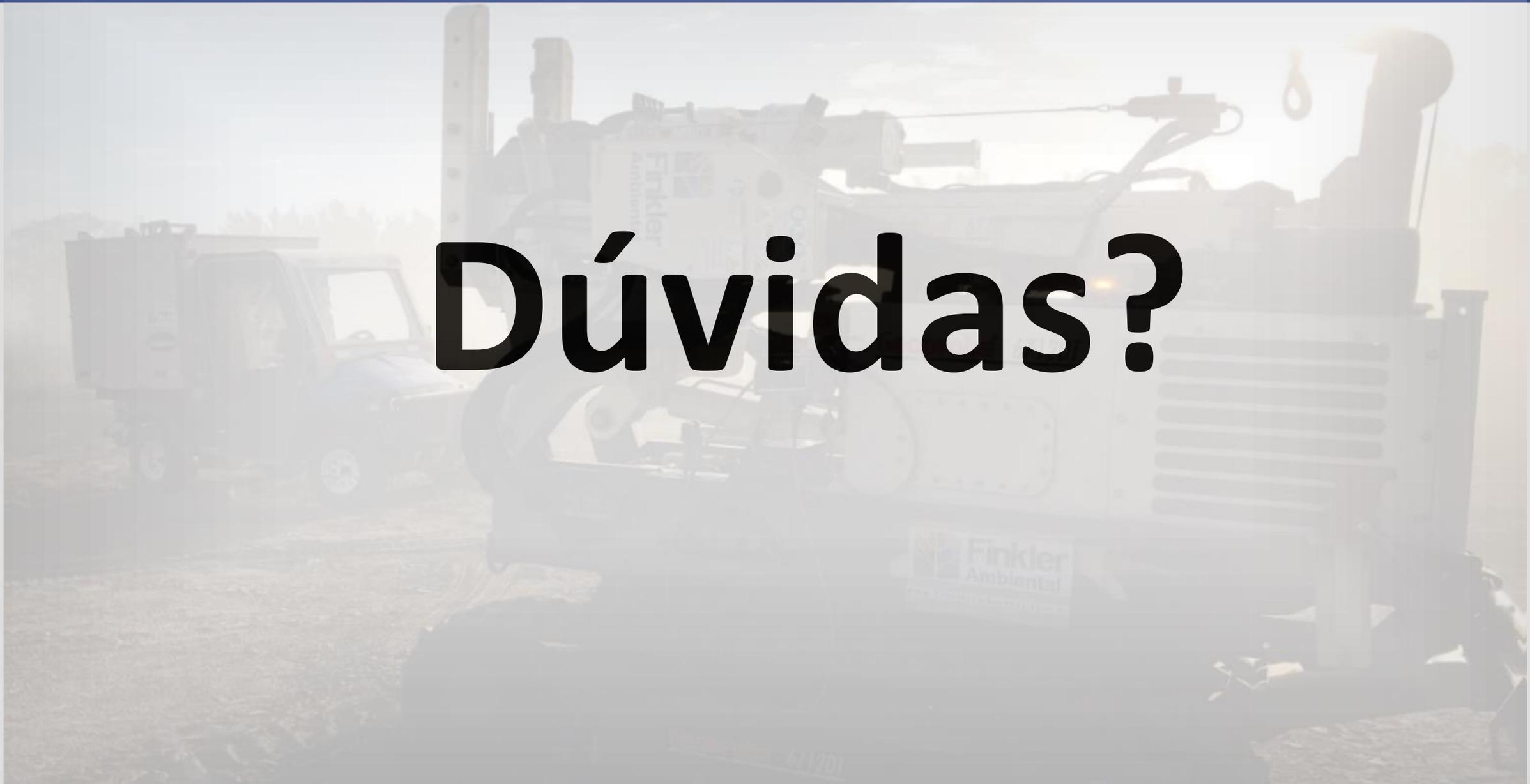
# Combinação de técnicas para caracterização litoestratigráfica





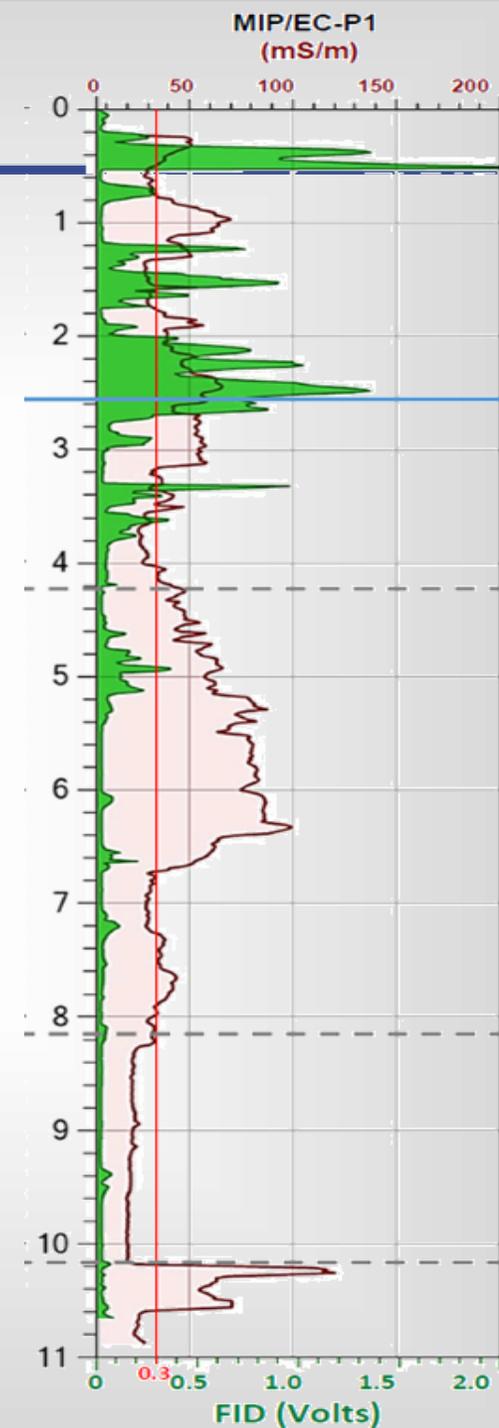
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE  
GEOLOGIA DE ENGENHARIA  
E AMBIENTAL

# Dúvidas?



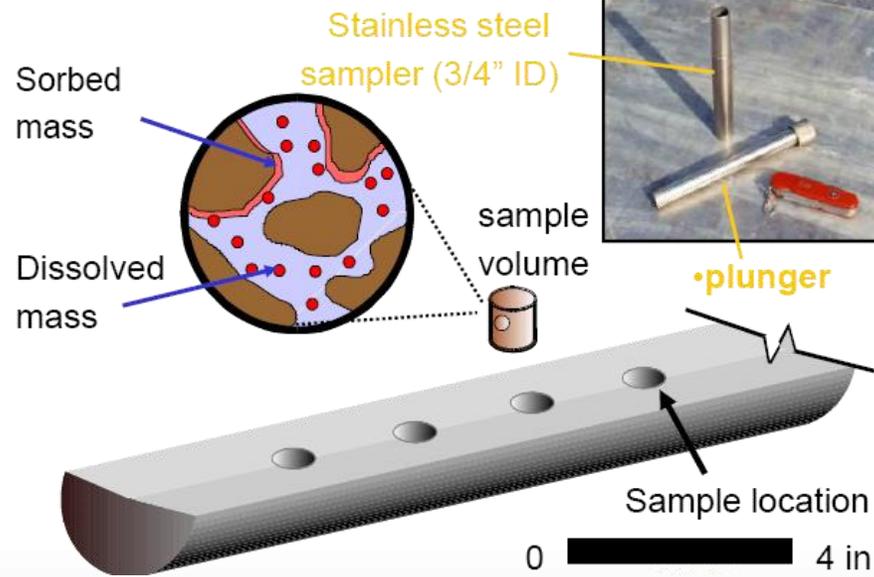
## Principais técnicas de HRSC para caracterização dos contaminantes

- Amostragem discreta e/ou multipontual do perfil do solo, dos gases do solo e da água subterrânea por métodos Direct Push (e.g. *Vertical Profile Boring*; *Waterloo APS*, *Post Run Tubing*; *Whole Core Soil Sampling - WCSS*);
- Sistemas de amostragem multinível (CMT, Westbay, FLUTe);
- Sistemas de amostragem da água subterrânea em transectos;
- Amostradores passivos de gases do solo e de água subterrânea (e.g. *VSorber*; *Beacon sampler*);
- Sonda *Membrane Interface Probe* (MIP);
- Métodos de *Laser Induced Fluorescence* (LIF), como o *UVOST* (*Ultra-Violet Optical Screening Tool*);
- Métodos Óticos - OIP (*Optical Image Profiler*);
- Uso de laboratórios móveis para análises químicas em campo;



# Amostragem discreta e multipontual de solo

3.25-inch OD  
1.85-inch  
core



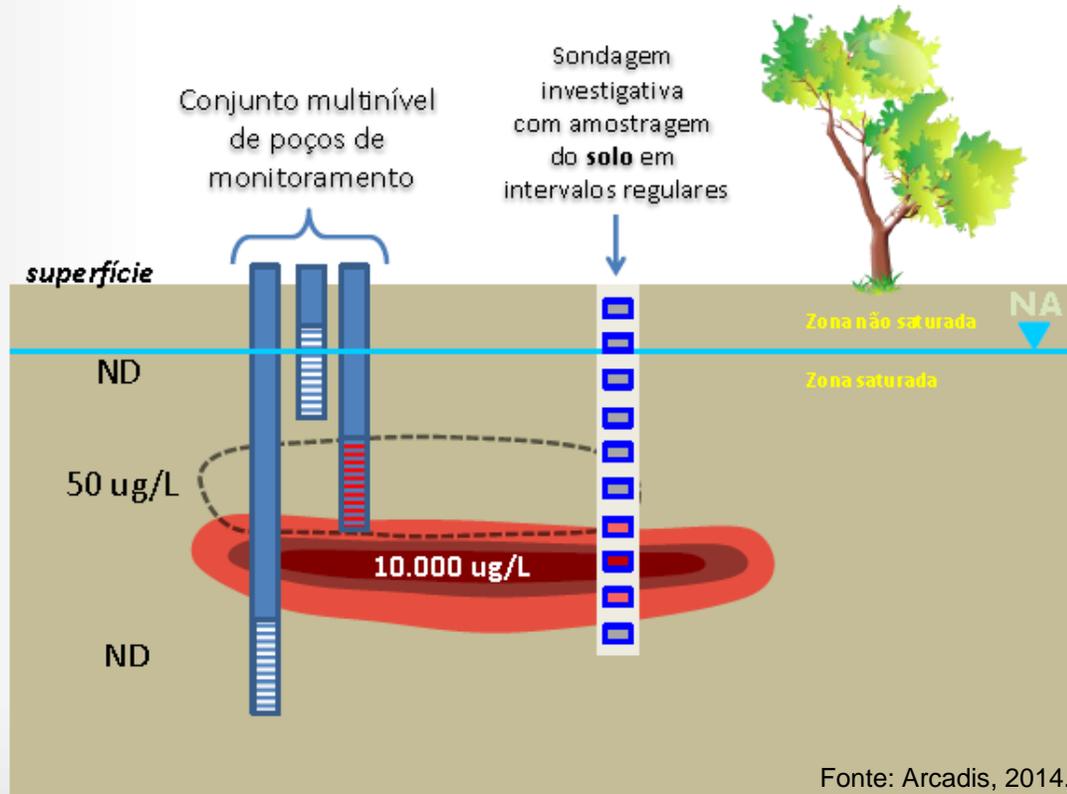
Fonte: Stone Environmental Inc.



ABNT NBR 16434/2015 - Amostragem de resíduos sólidos, solos e sedimentos - Análise de compostos orgânicos voláteis (COV)

# Amostragem discreta e multipontual de solo

## VPB - Vertical Profile Boring



*Whole core soil sampling (WCSS);  
ou*

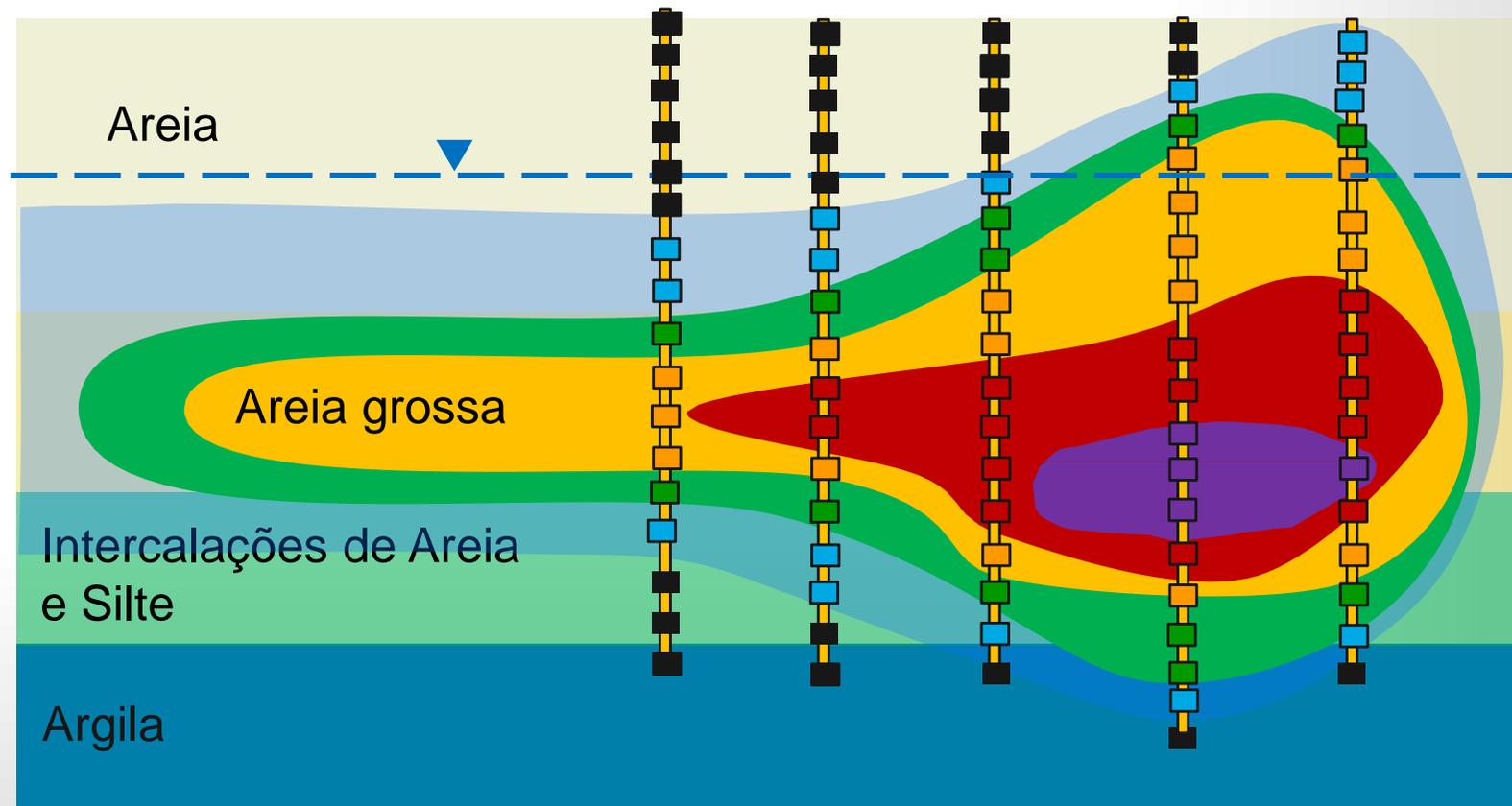
Amostragem de solo de perfil  
completo (ASPC)

Fonte: Riyis et al. (2019)

ND = não detectado

 = Amostra de solo (saturado e não saturado em perfuração de alta resolução)

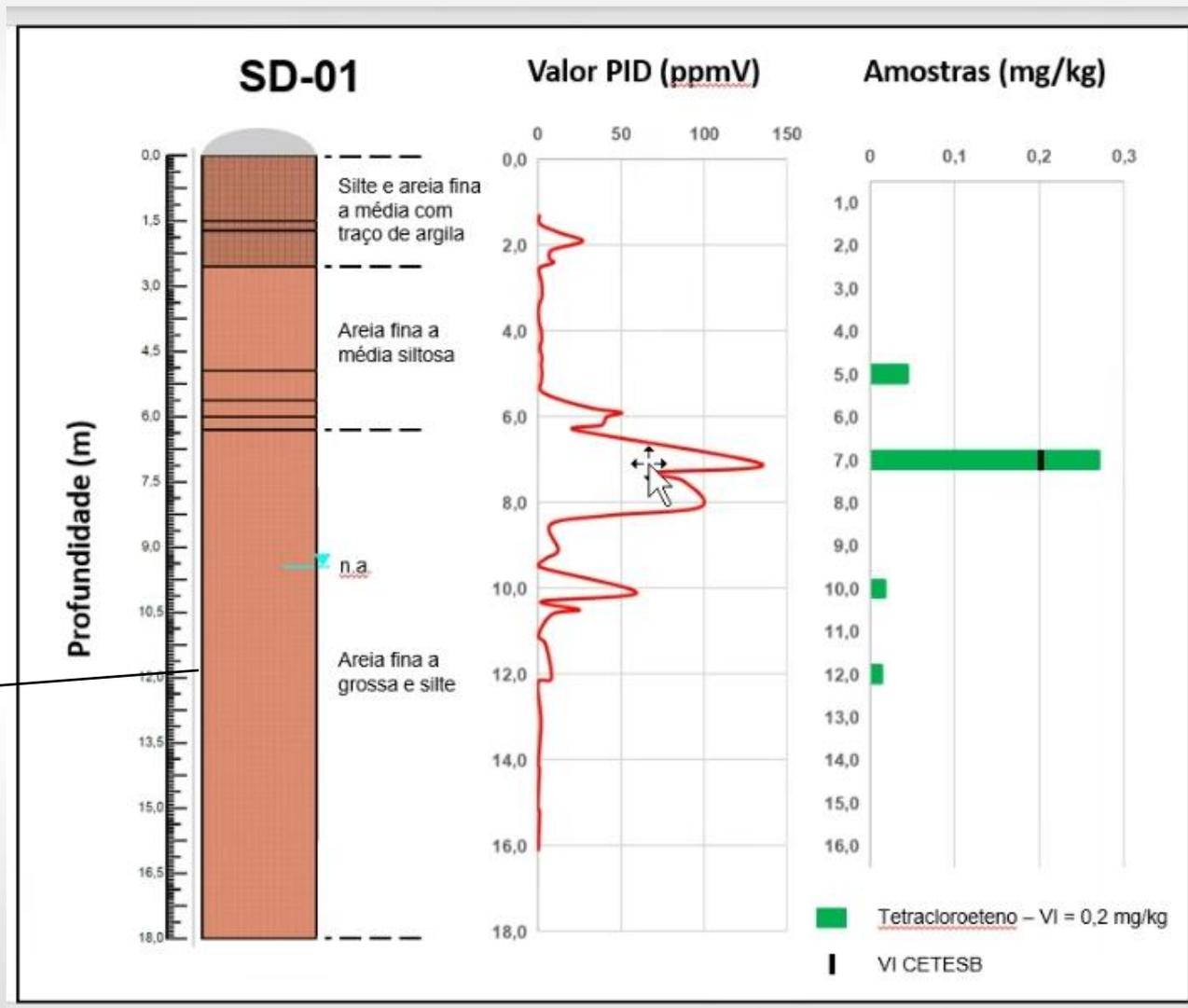
# Mapeamento e caracterização das fontes de contaminação



*Técnica de amostragem de solo de perfil completo (ASPC)*

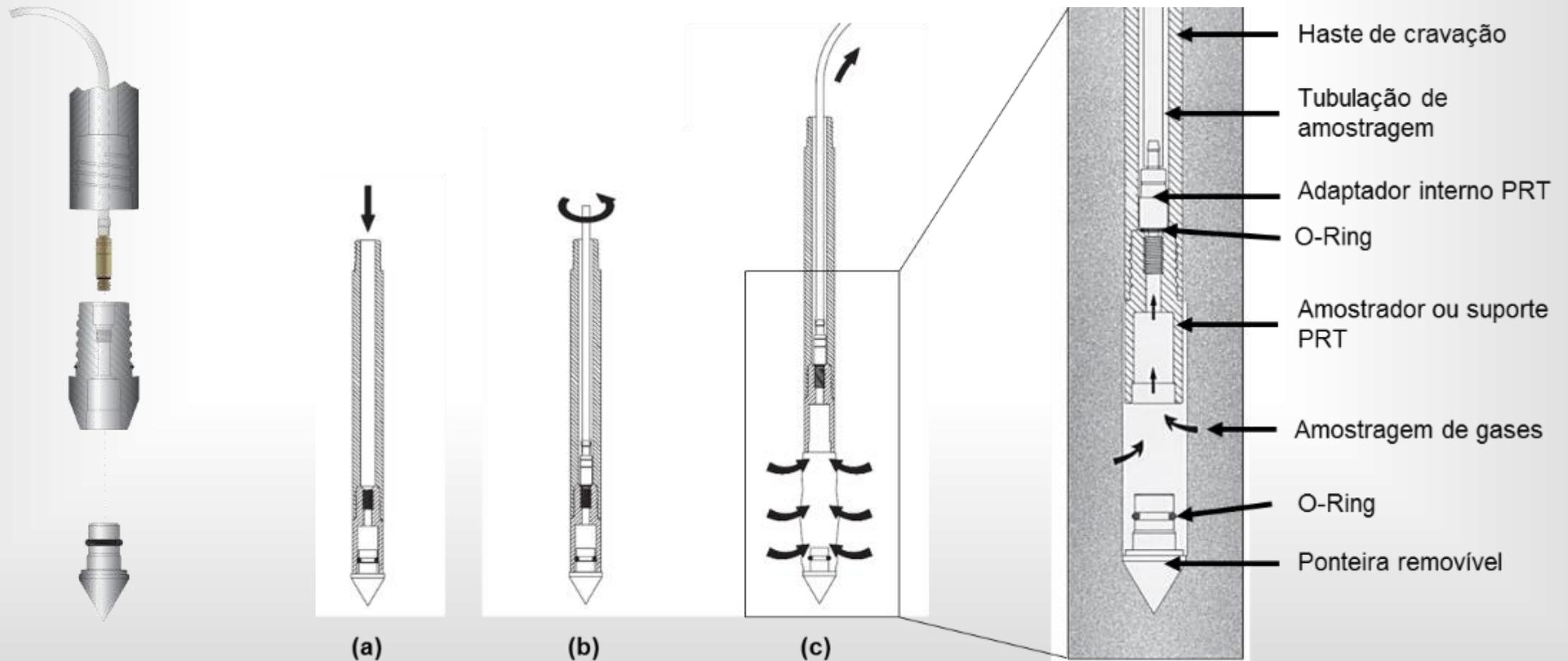
## Varredura vertical de VOCs

*Agregando dados de litologia,  
varredura de VOCs em amostras de  
solo e resultados de análises químicas*



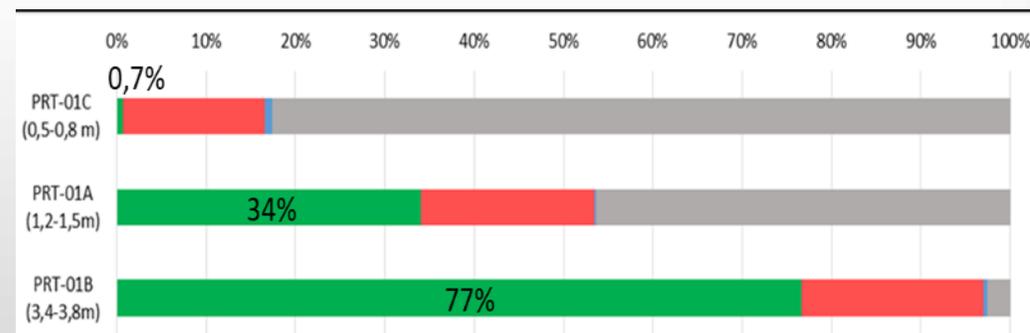
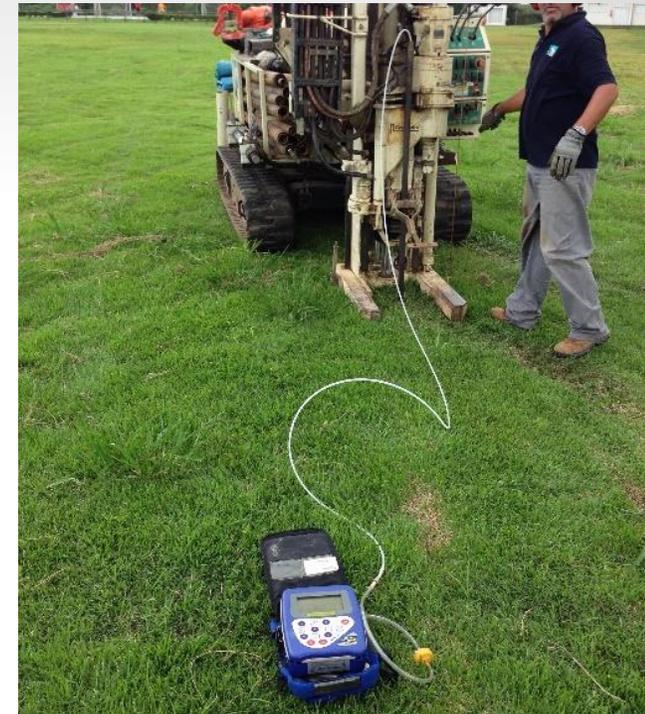
# Amostragem discreta de gases e vapores do solo

- PRT (*Post Run Tubing*)



# Amostragem discreta de gases e vapores do solo

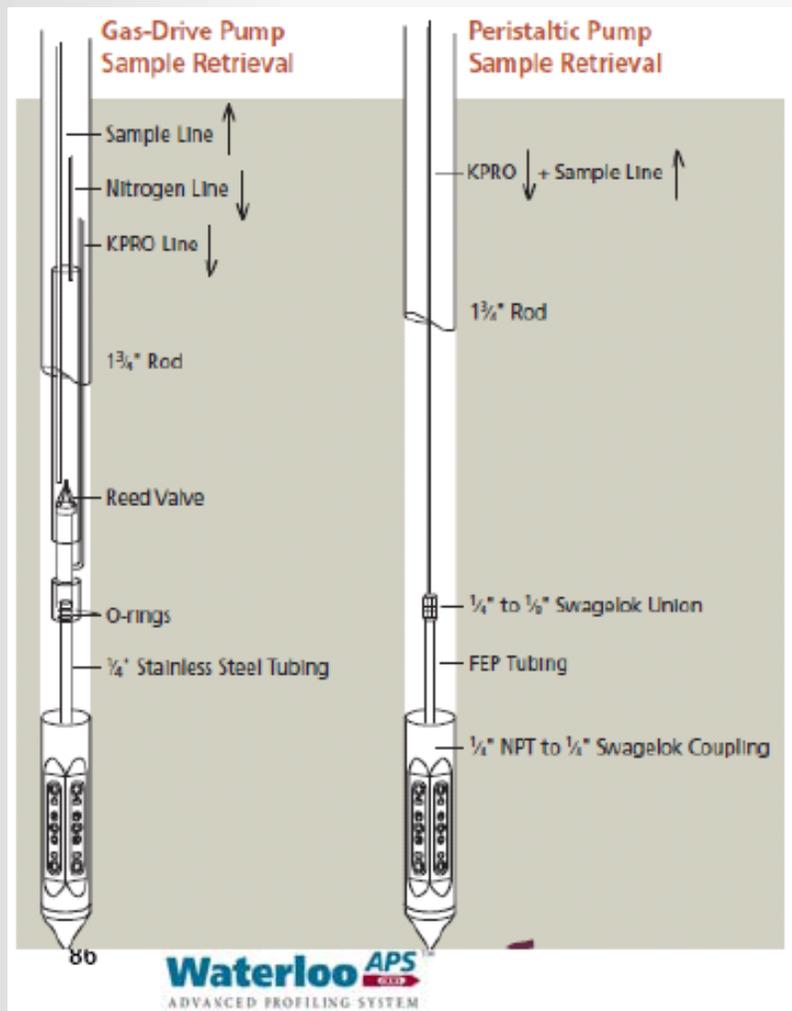
## PRT (*Post Run Tubing*)



Freitas (2017)

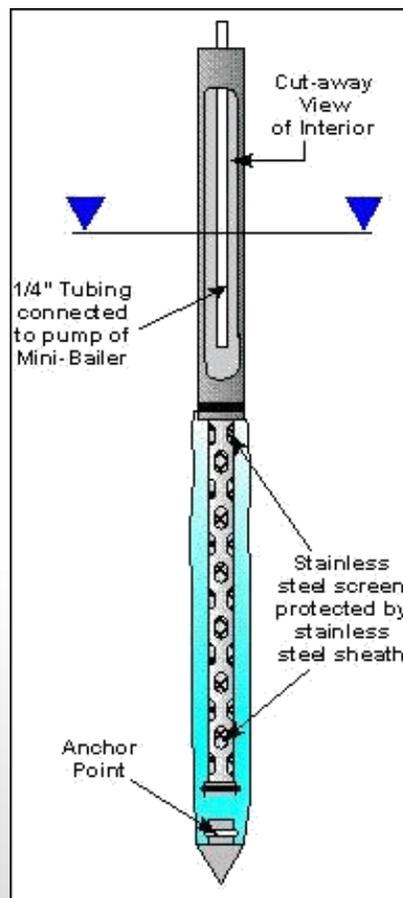
■ CH4 (%) 
 ■ CO2 (%) 
 ■ O2 (%) 
 ■ Bal. (%)

## Amostragem discreta de água subterrânea



Fonte: Stone Environmental Inc.

### Screen Point Groundwater Sampling

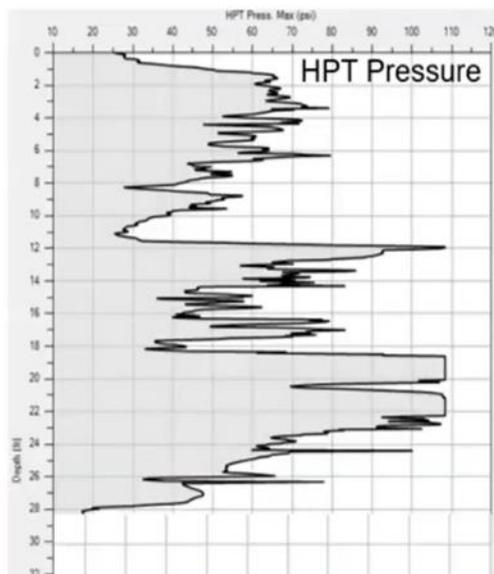
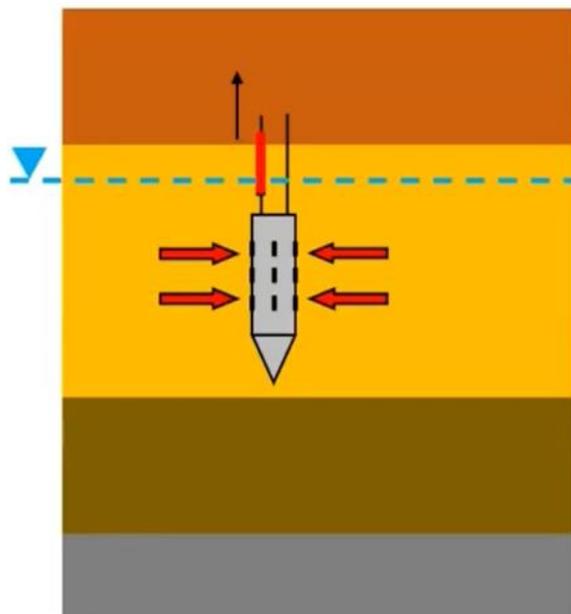


Fonte: ESN Northwest Inc.

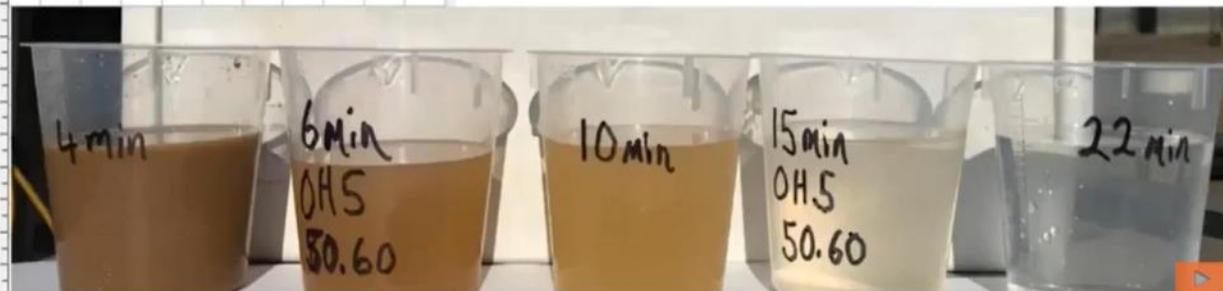
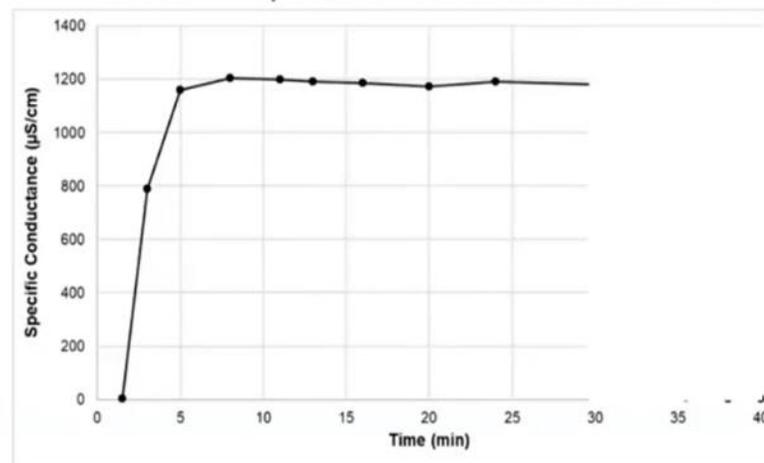


<https://geoprobe.com/tooling/sp16-groundwater-sampler>

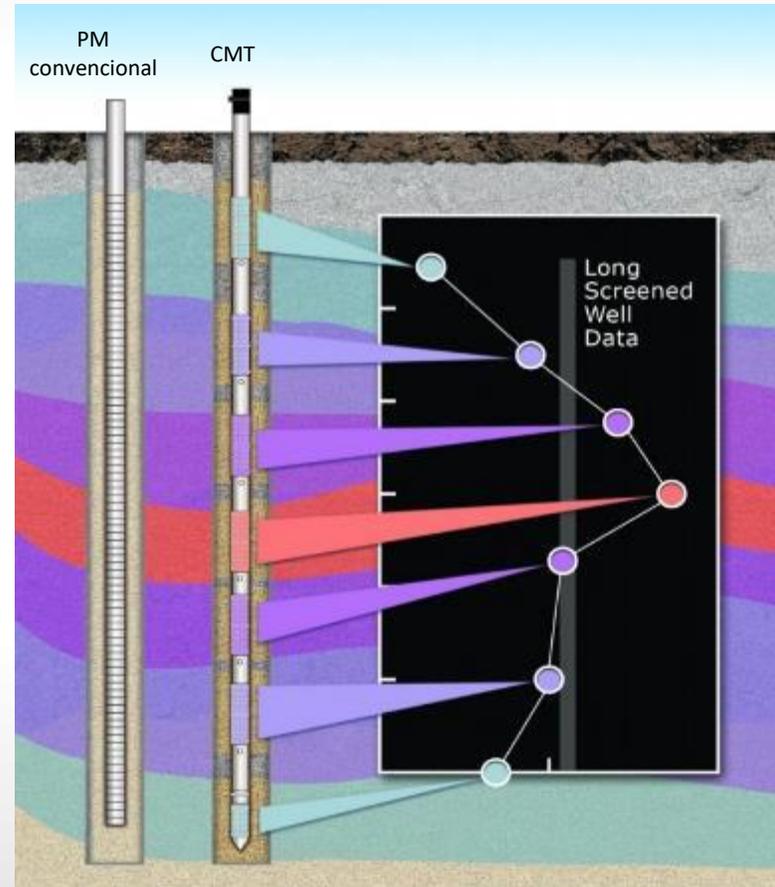
# Ground Water Profilers (GWP)



Groundwater Specific Conductance Measurement



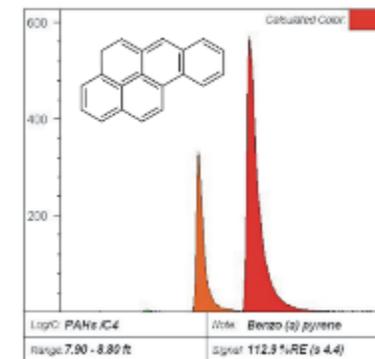
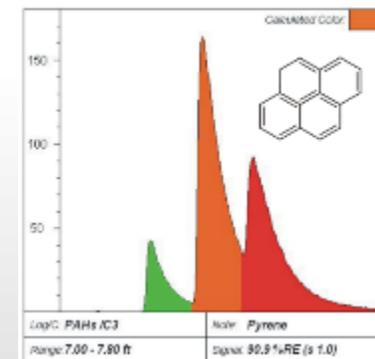
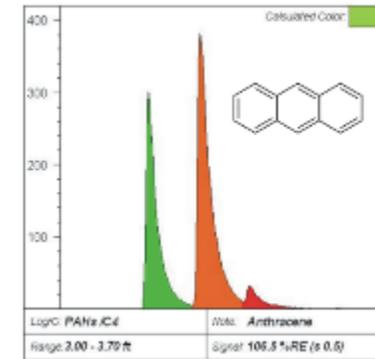
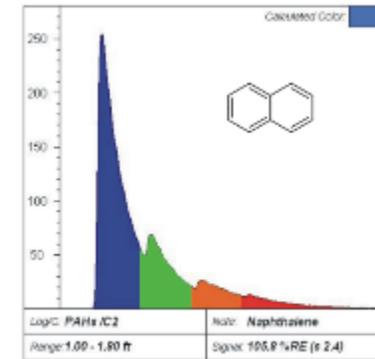
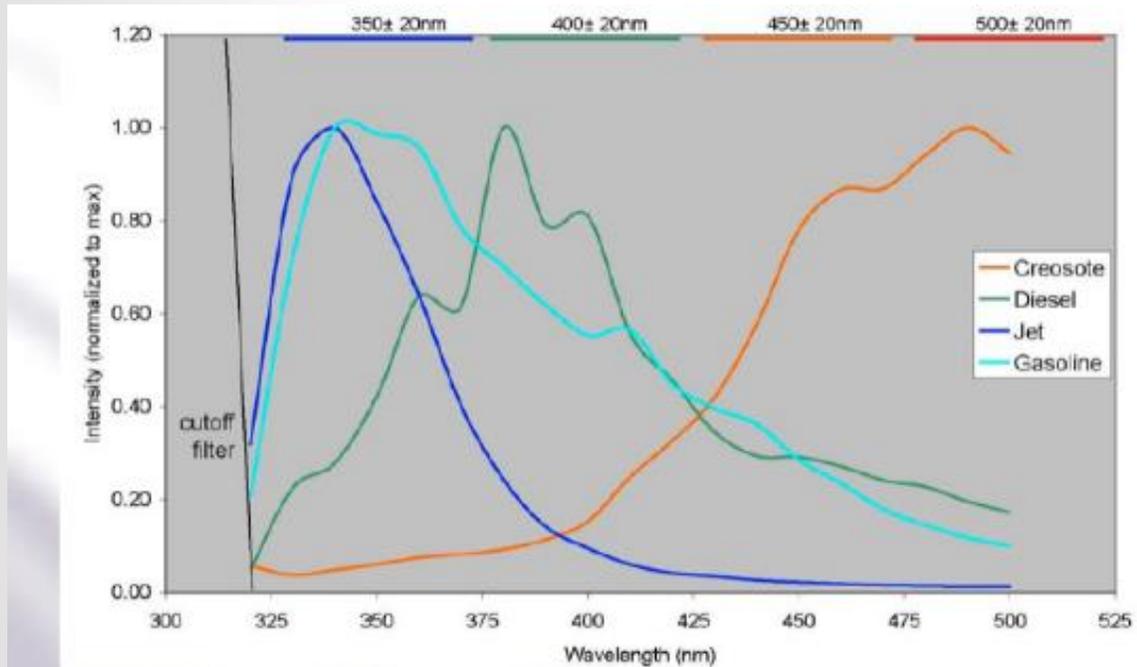
## Sistemas de amostragem multinível de água subterrânea



Comparação entre a concentração obtida com poço de filtro longo e o gradiente obtido por um poço multinível CMT

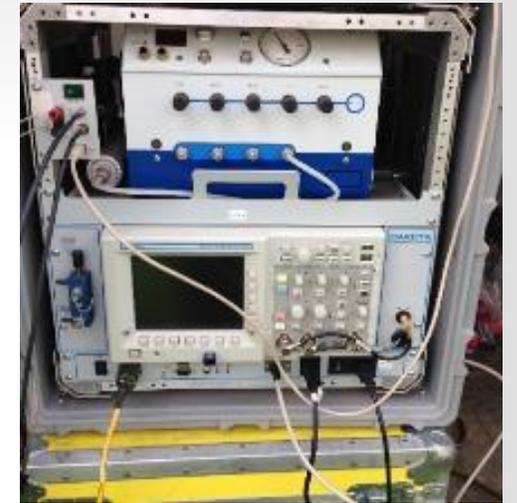
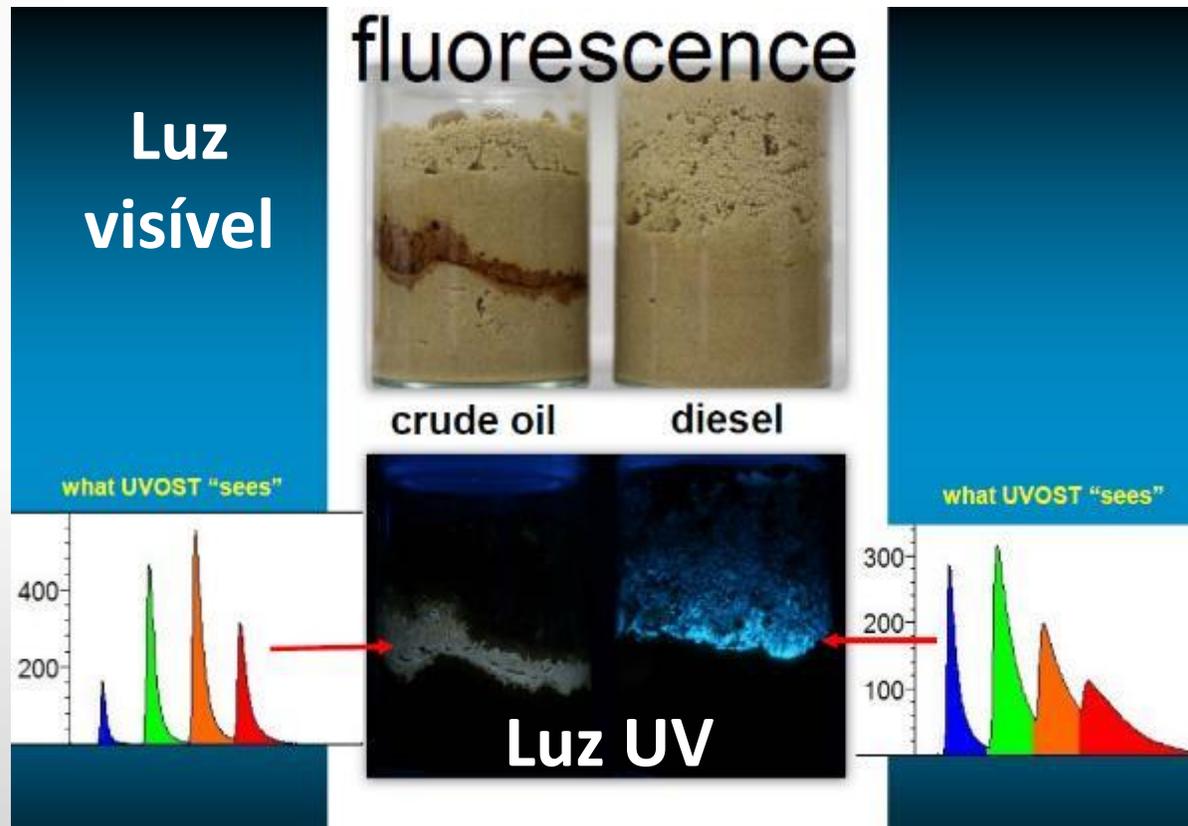
# Laser-Induced Fluorescence (LIF)

- Fonte de luz UV induz a fluorescência de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) de óleos e combustíveis no subsolo;



# Ultra Violet Optical Screening Tool (UVOST)

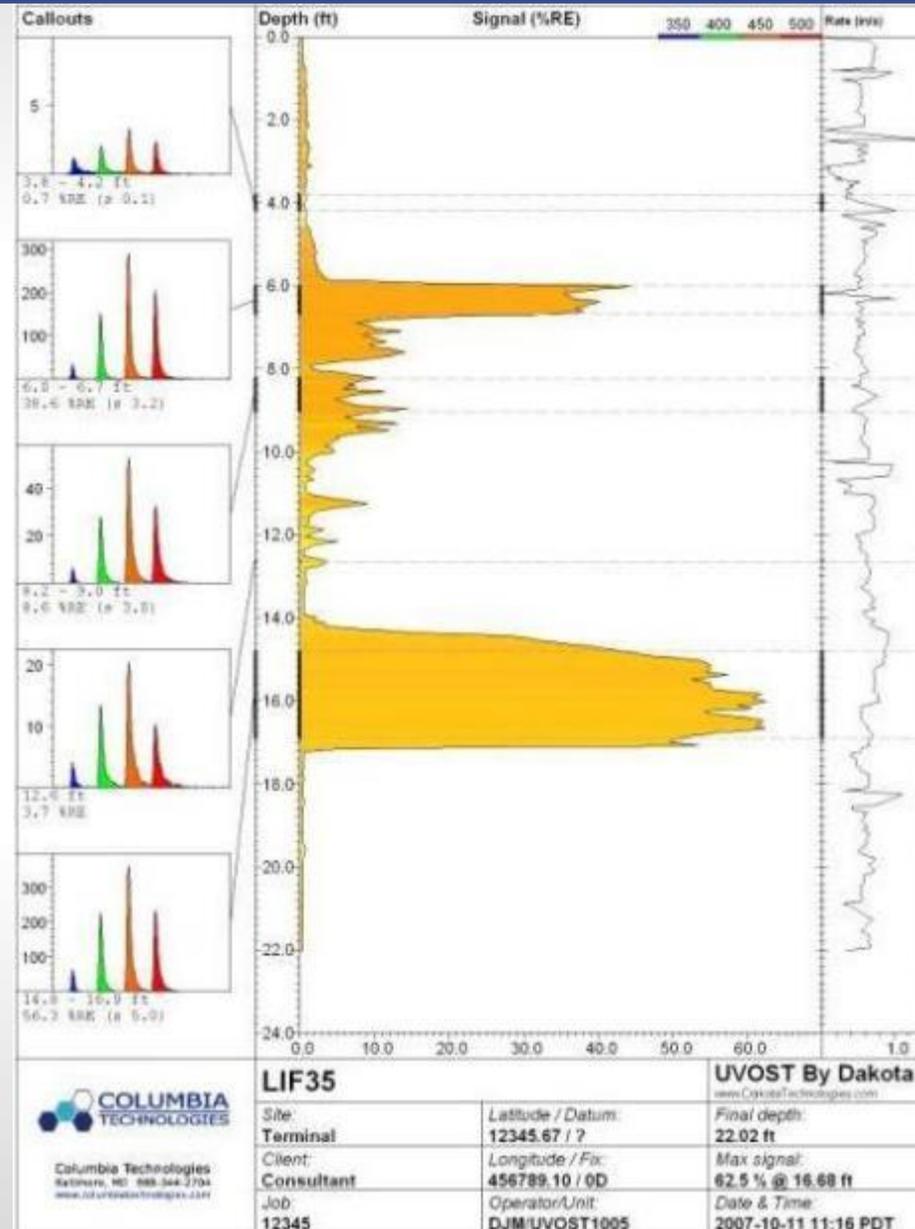
- Sonda para detecção de LNAPLs: Gasolina, Diesel, Querosene, Óleo de Motor, Fluido de Corte, Óleo Cru;
- Provida de sensor de EC;



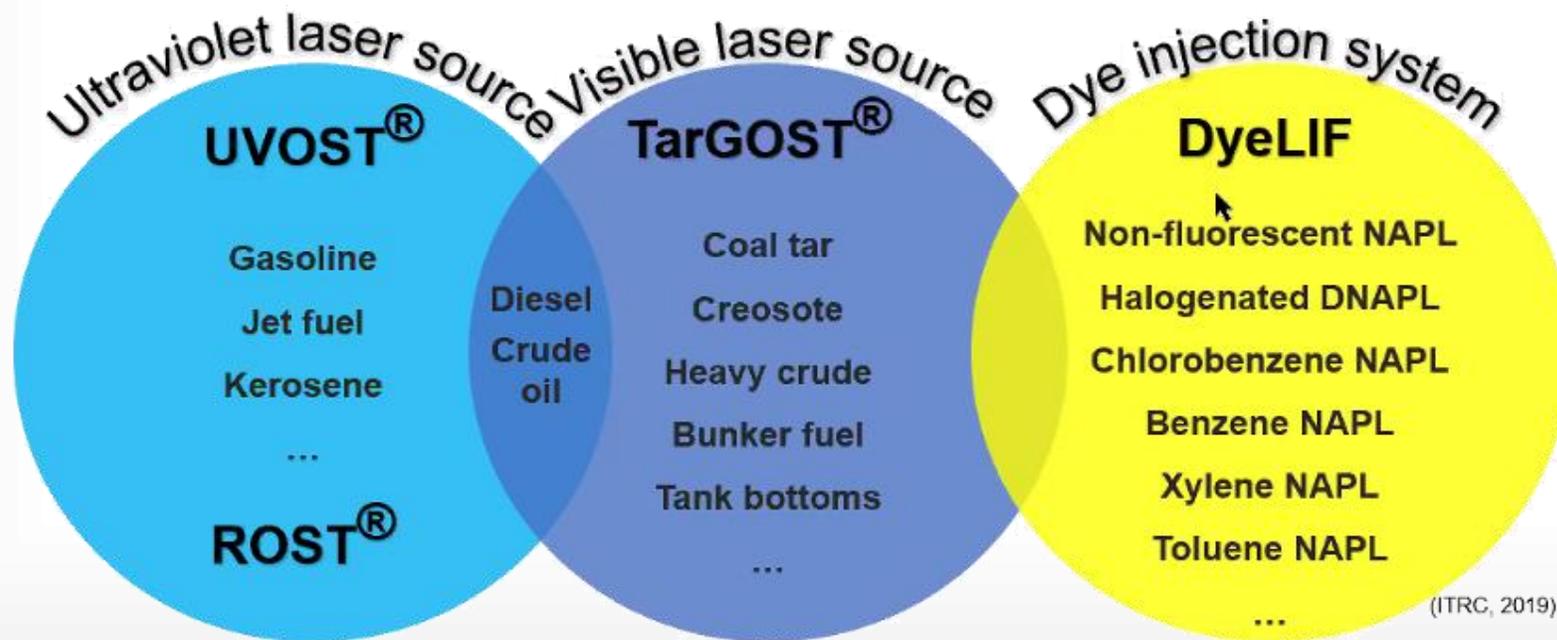
## Log do UVOST

Análise das assinaturas espectrais possibilita inferências sobre:

- Tipo de LNAPL;
- Grau de degradação;
- Condições do subsolo;
- Maturidade da contaminação.



## Adaptações do método LIF

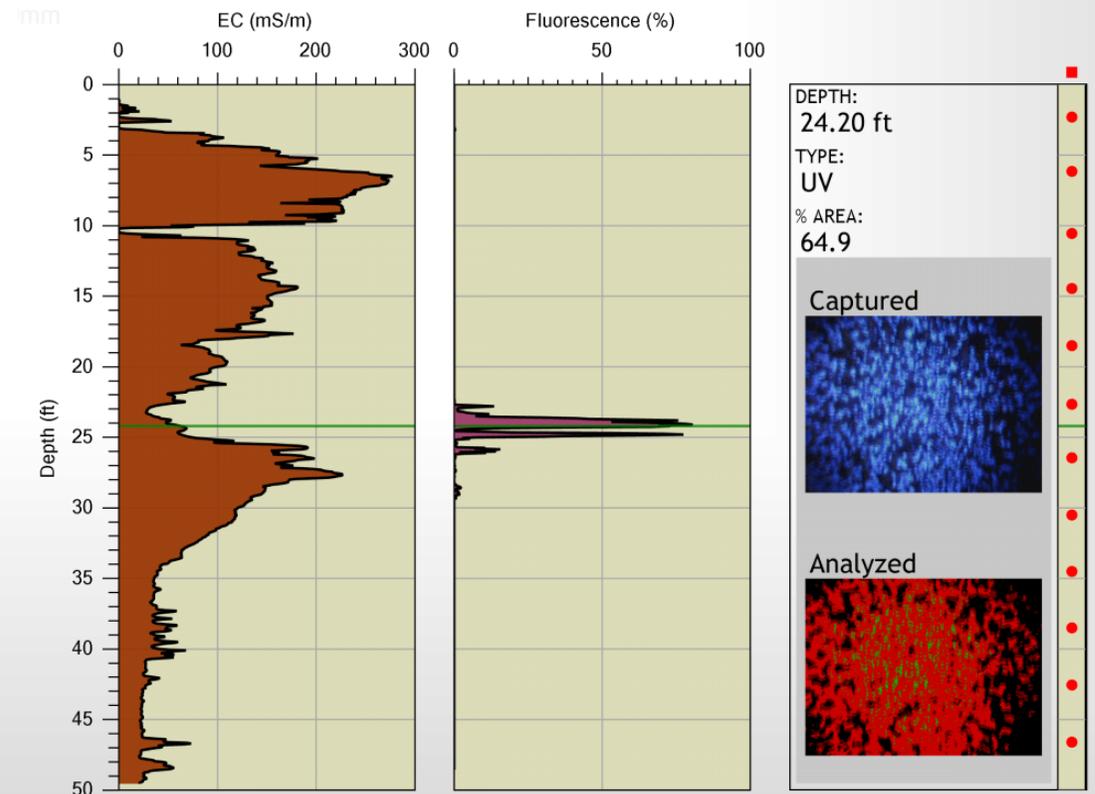


# Optical Image Profiler (OIP)

- Fonte de luz UV induz a fluorescência dos HPAs;
- Detecção de fase residual e fase livre de HPAs e óleos no subsolo;
- Também capta luz visível (cores do solo);
- Sonda OIP + EC + HPT



<https://geoprobe.com/oip-optical-image-profiler>



## Optical Image Profiler (OIP)



<https://geoprobe.com/oip-optical-image-profiler>



Sonda OIP + HPT

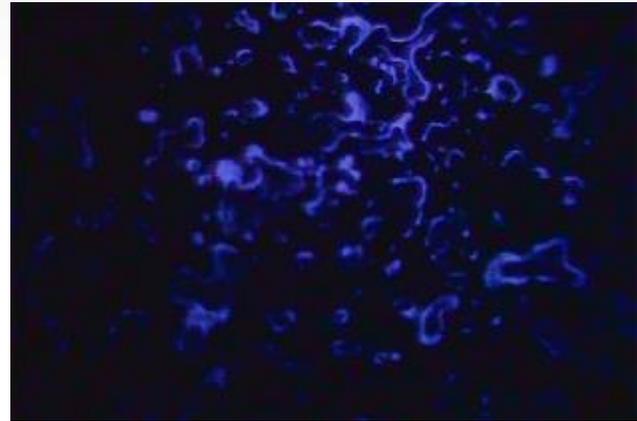
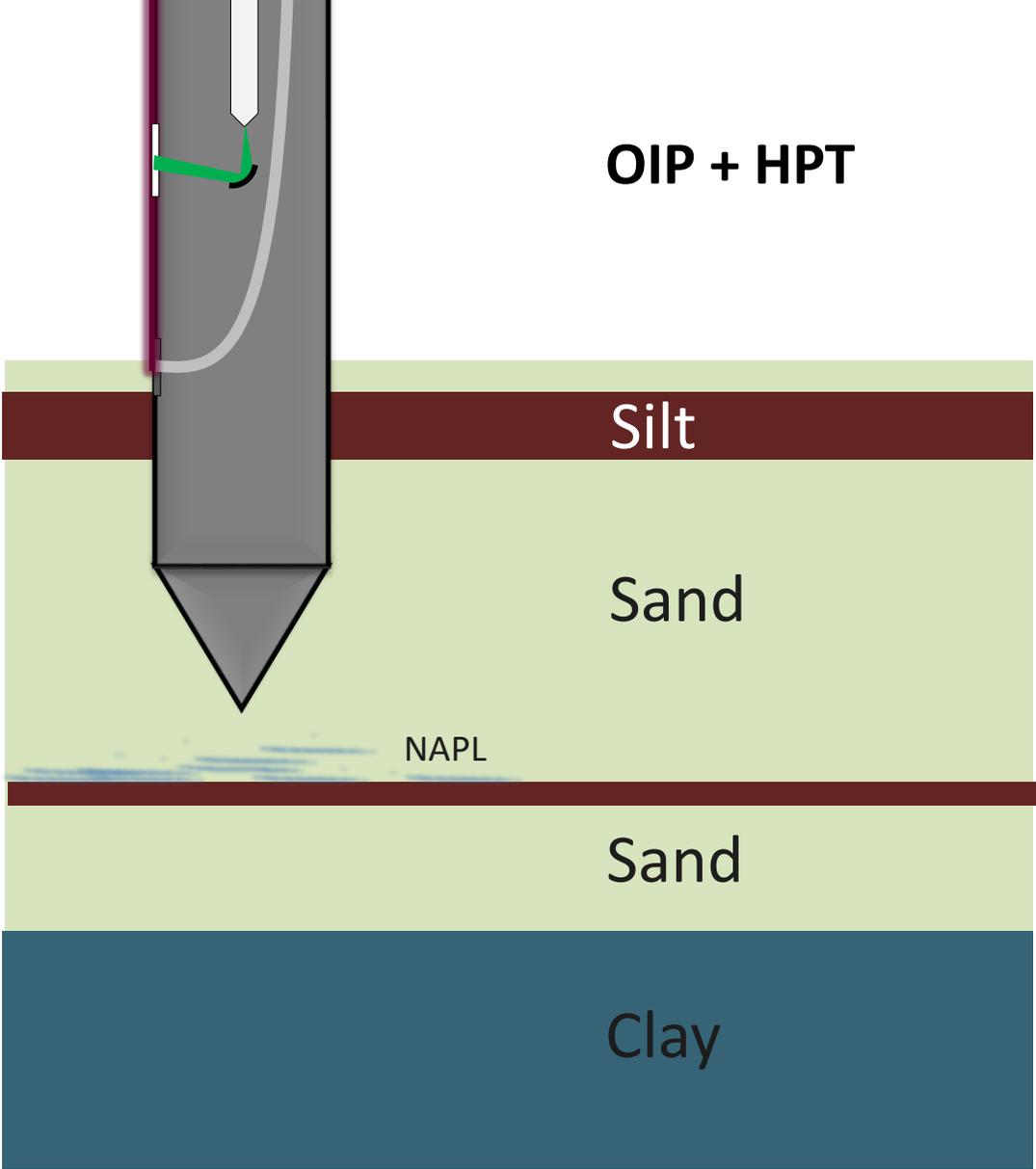
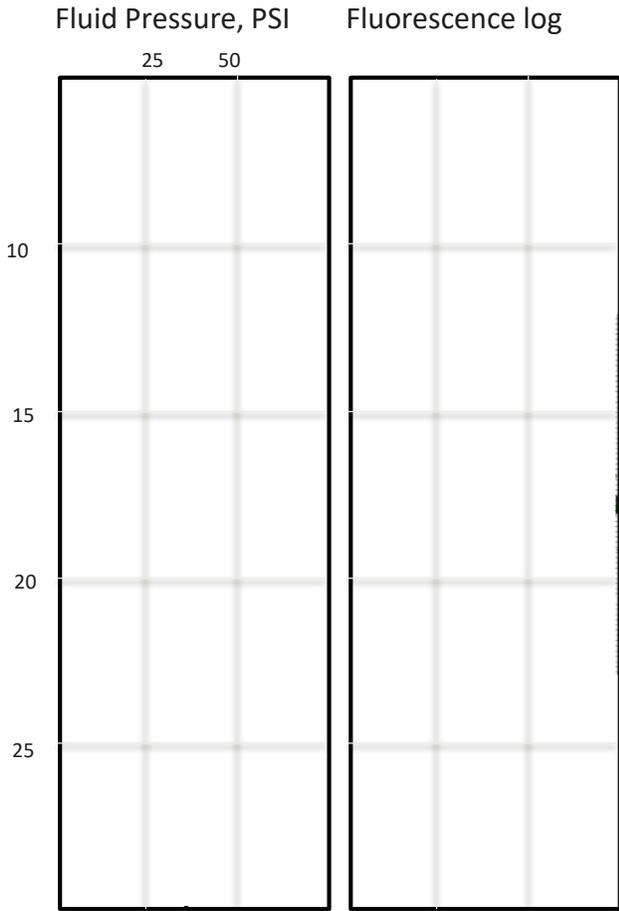


Imagem UV de NAPL no solo

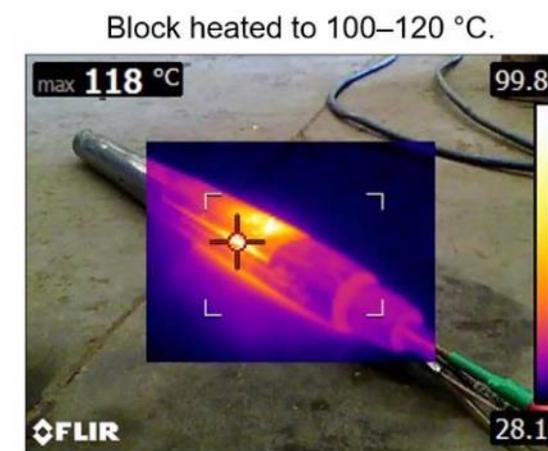
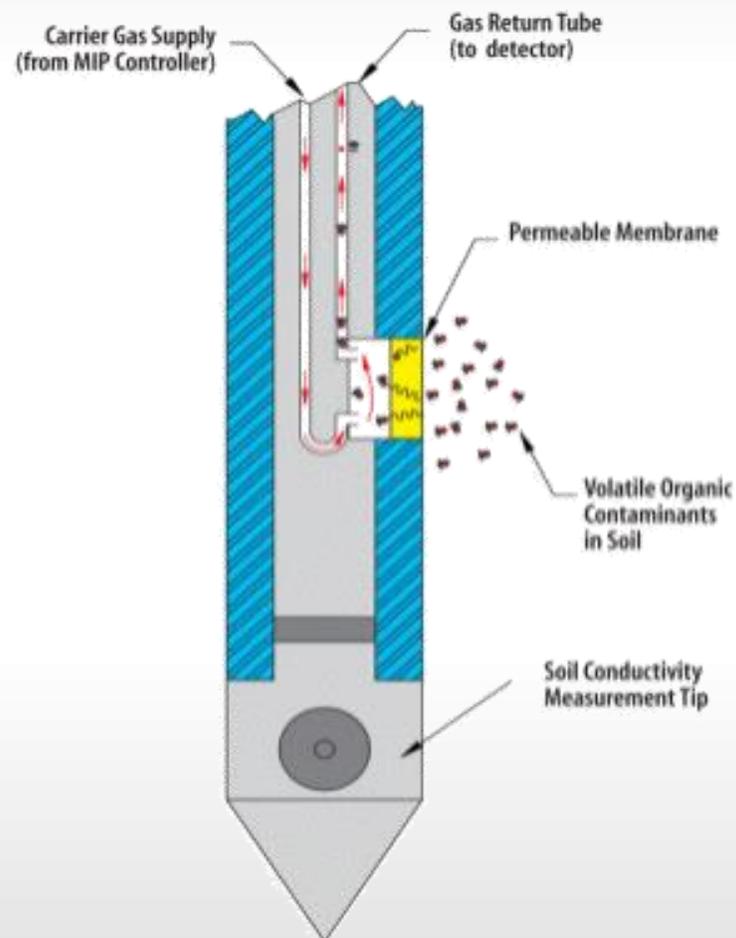
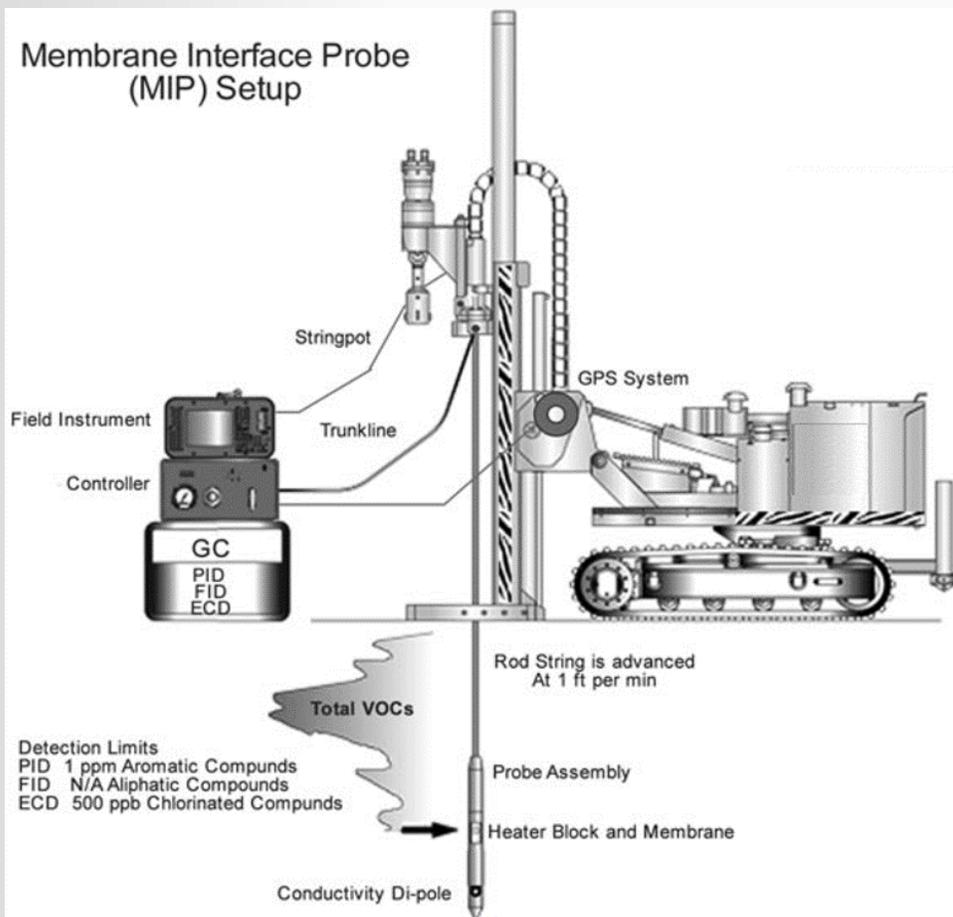


Imagem visível do solo

**OIP + HPT**



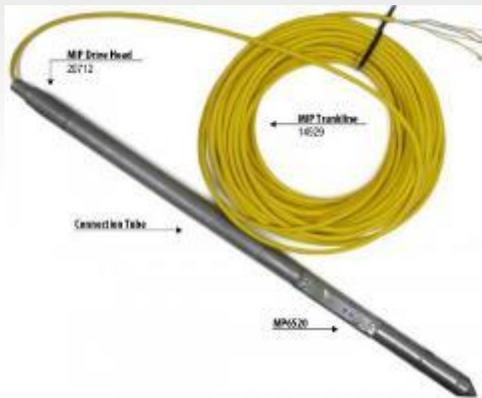
# Membrane Interface Probe (MIP)



Princípio de funcionamento da sonda MIP.



Perfuratriz  
Geoprobe



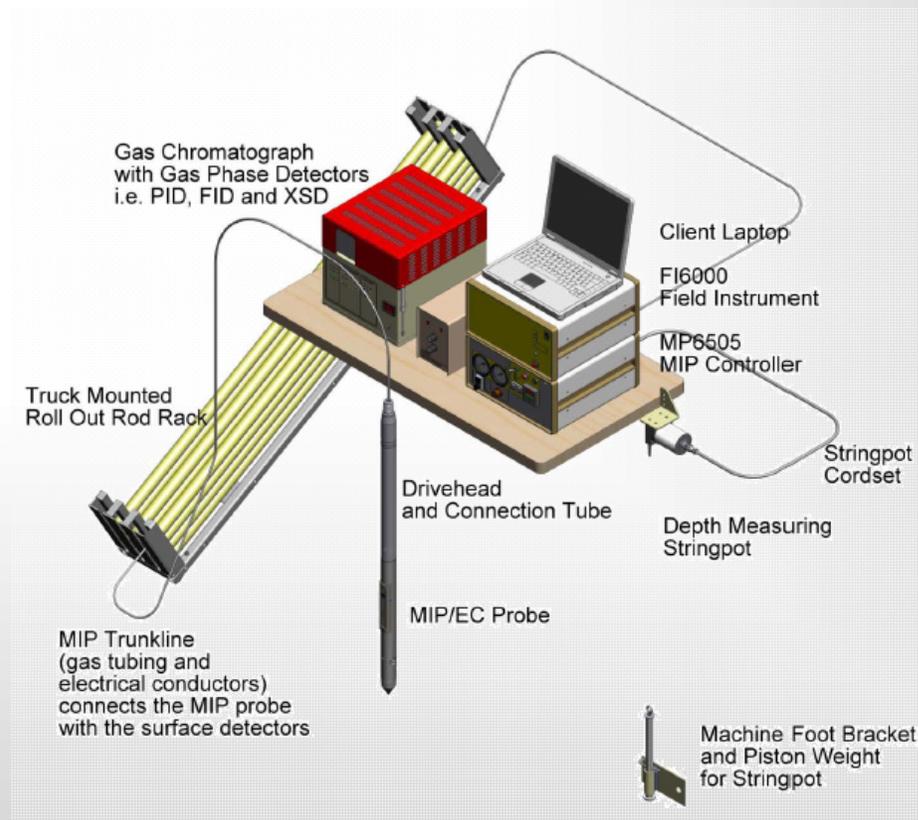
Sonda + Trunkline



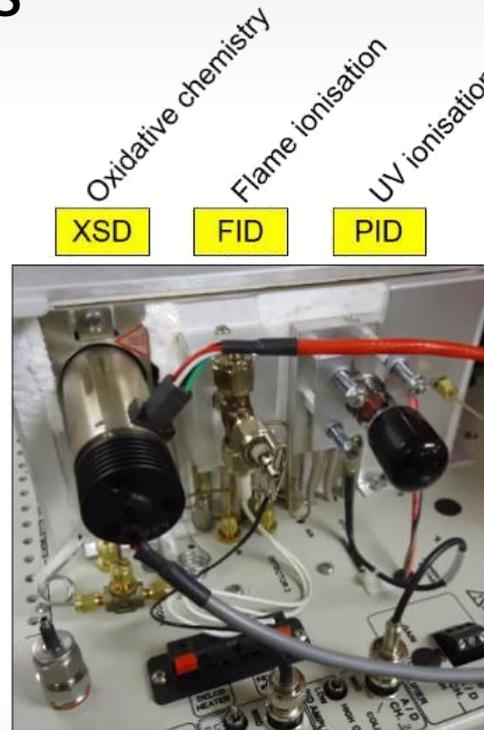
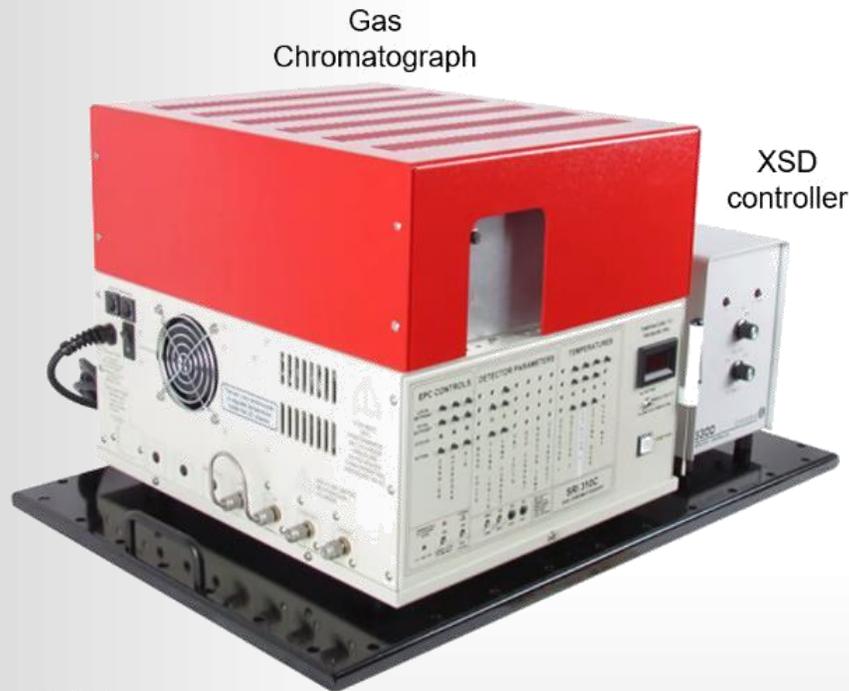
Cromatógrafo a gás



Sistema de Controle



# MIP – GC & detectores



## Sensores

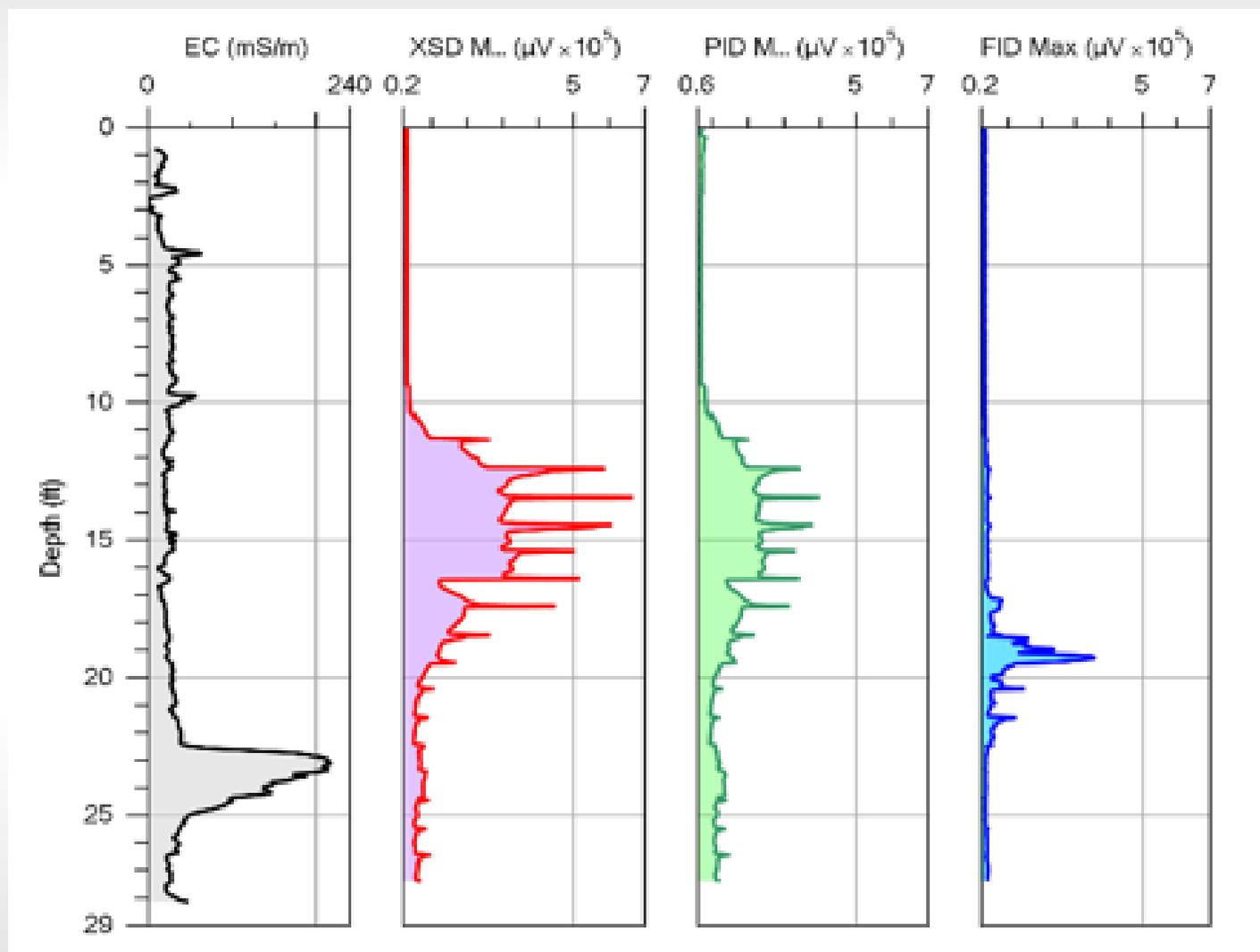
PID - Detector por Fotoionização

FID - Detector por Ionização de Chama

XSD - Detector específico de halogênios

- Resultados qualitativos/ semi-quantitativos – unidade: Volts
- Compostos halogenados (TCE...) PID & XSD
- Alcanos clorados (TCA...) XSD
- Combustíveis com hidrocarbonetos aromáticos (BTEX...) PID & FID
- Metano e gás natural FID

## Logs do MIP



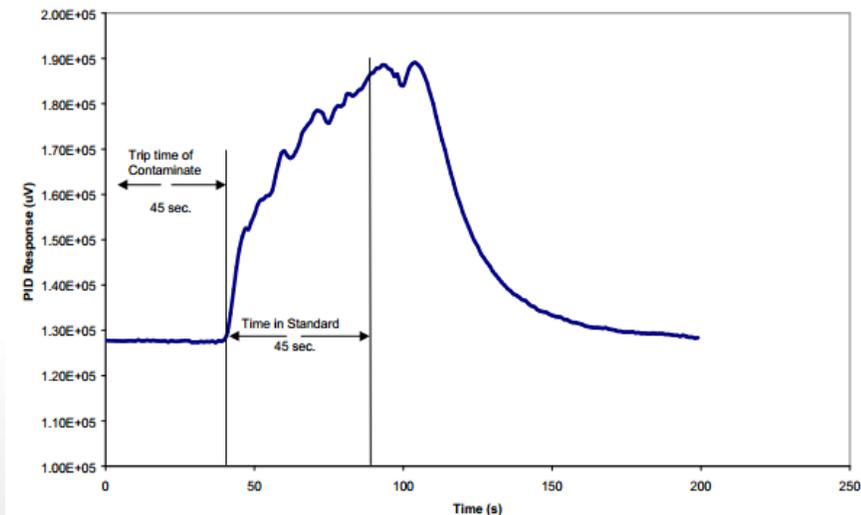
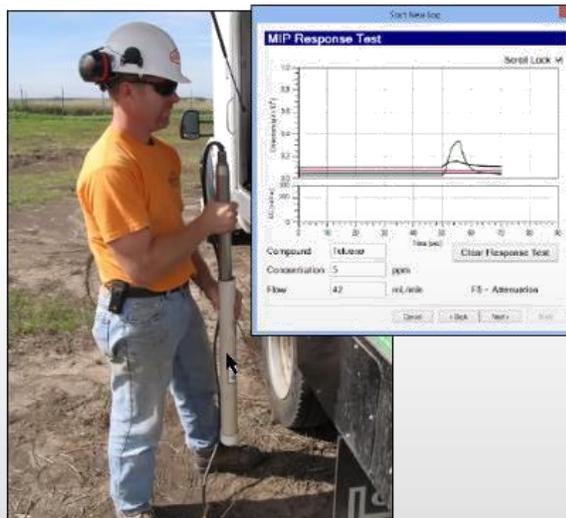
Perfis de resposta dos detectores do MIP

# QA/QC do MIP

## Chemical Response Test



(Geoprobe)



Teste de resposta para Benzeno  
(10 ppm) com sensor PID  
(GEOPROBE, 2012)

This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.



Designation: D7352 – 18

## Standard Practice for Volatile Contaminant Logging Using a Membrane Interface Probe (MIP) in Unconsolidated Formations with Direct Push Methods<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D7352; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

### 1. Scope\*

1.1 This standard practice describes a field procedure for the rapid delineation of volatile organic compounds (VOC) in the subsurface using a membrane interface probe. Logging with the membrane interface probe is usually performed with direct push (DP) equipment. DP methods are typically used in soils and unconsolidated formations, not competent rock.

conformance with the standard. Reporting of test results in units other than SI shall not be regarded as nonconformance with this standard.

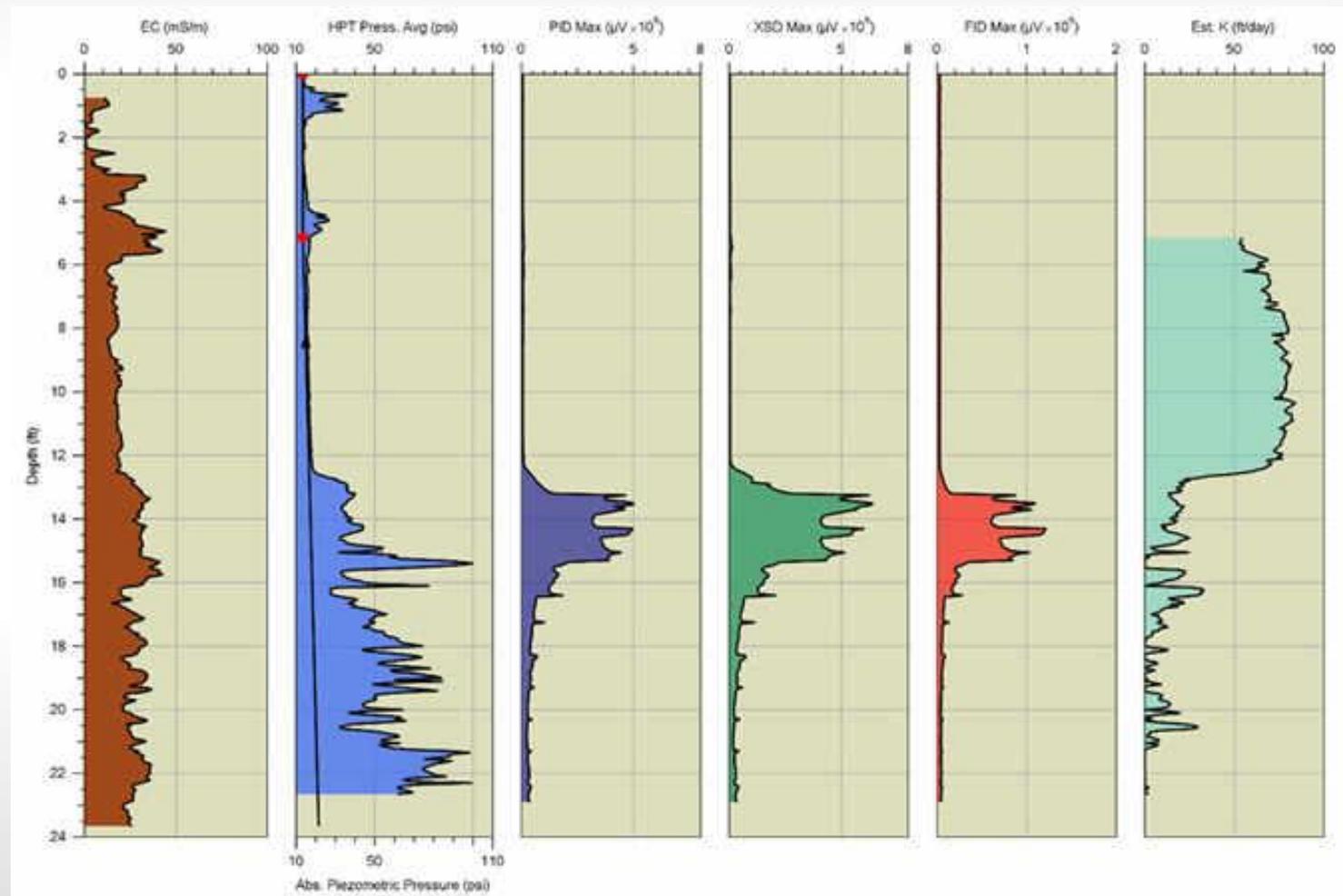
1.6 All observed and calculated values shall conform to the guidelines for significant digits and rounding established in Practice D6026, unless superseded by this standard.

1.6.1 The procedures used to specify how data is collected/

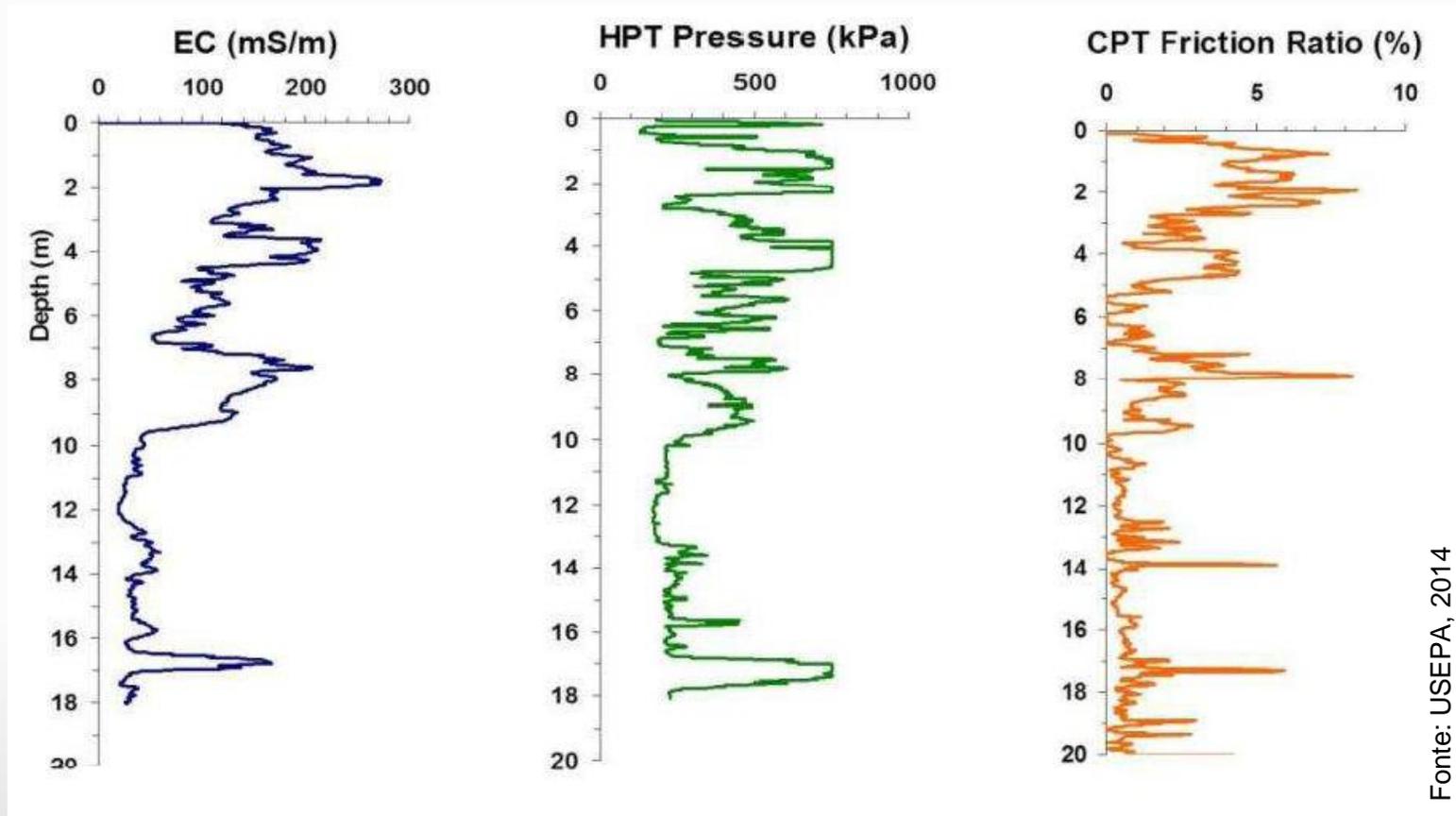
## Aplicação do MIP em Campo



## Combinação de técnicas (MIP + HPT)



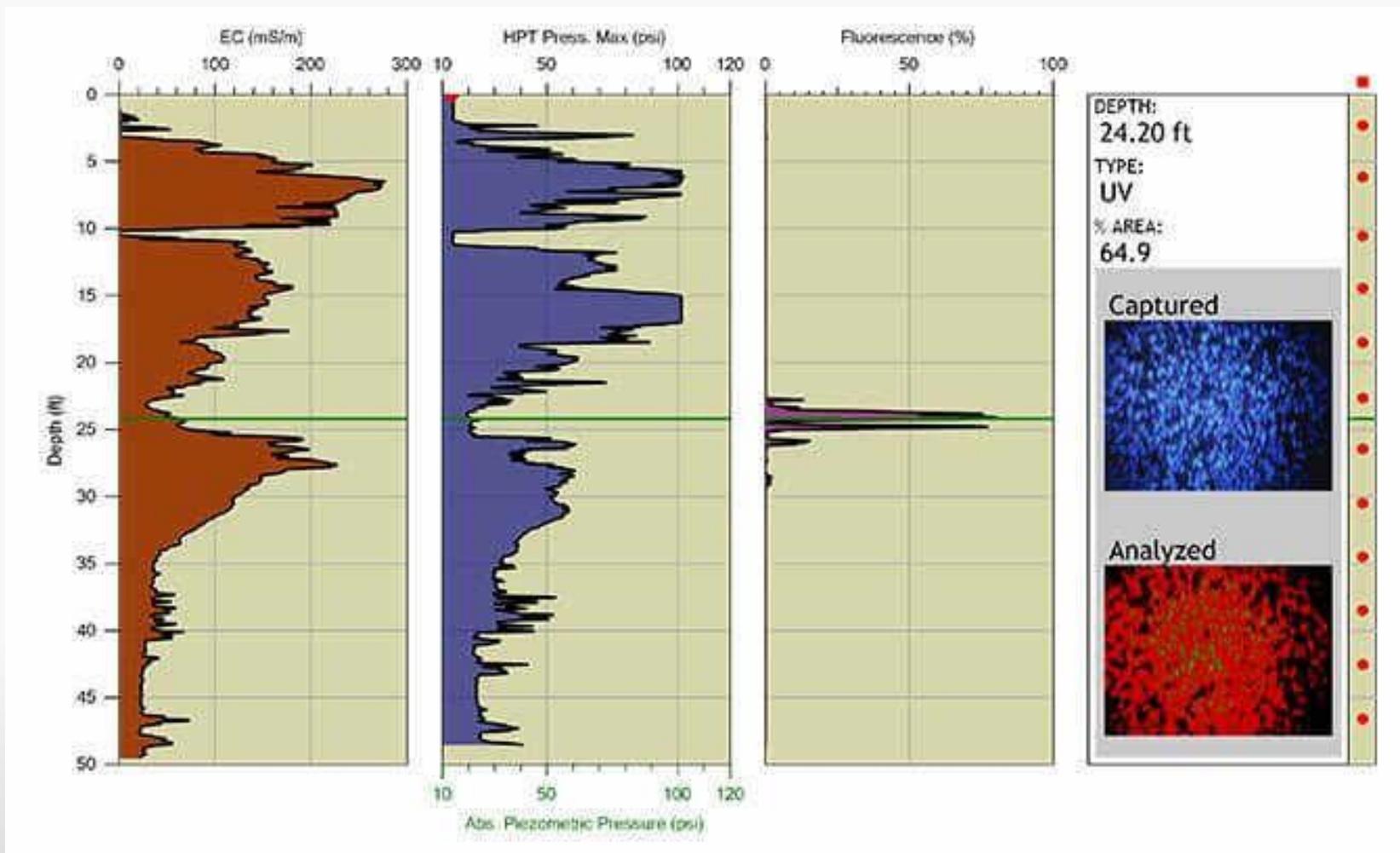
# Combinação de técnicas



Fonte: USEPA, 2014

Comparação de perfis obtidos pelas técnicas de condutividade elétrica, HPT e CPT

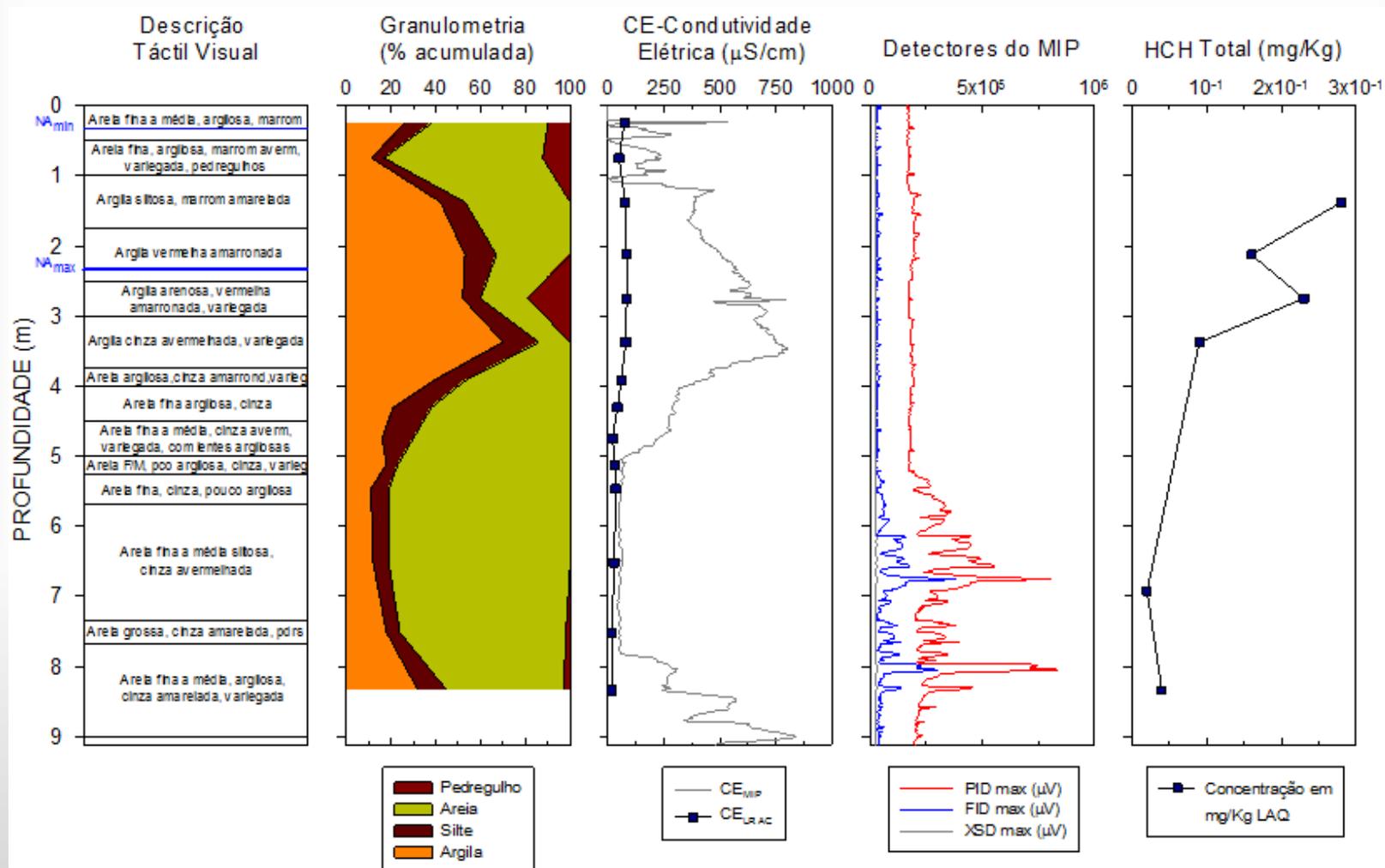
# Combinação de técnicas



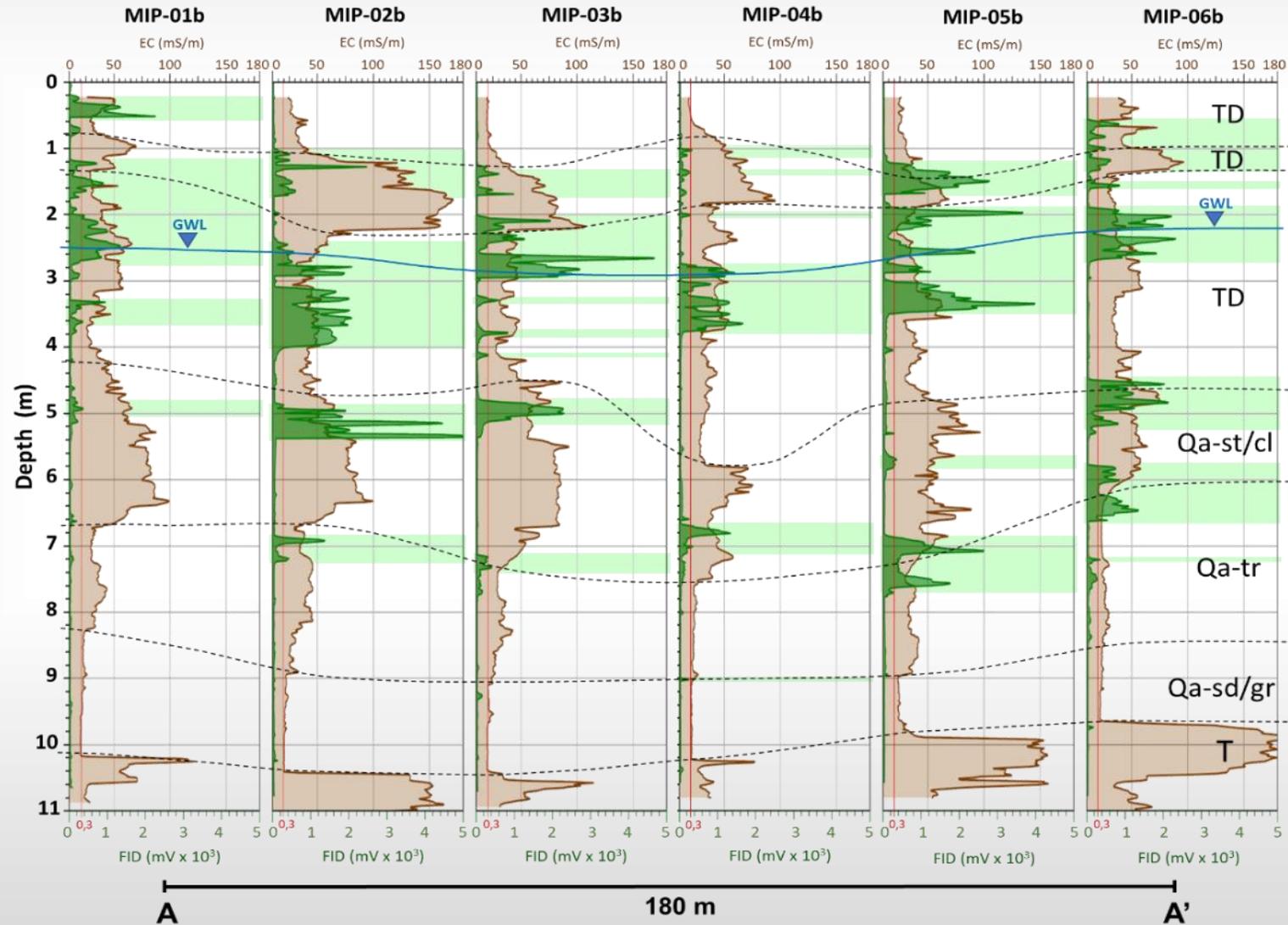
Perfis obtidos pela sonda OIHPT + EC

# Integração de métodos

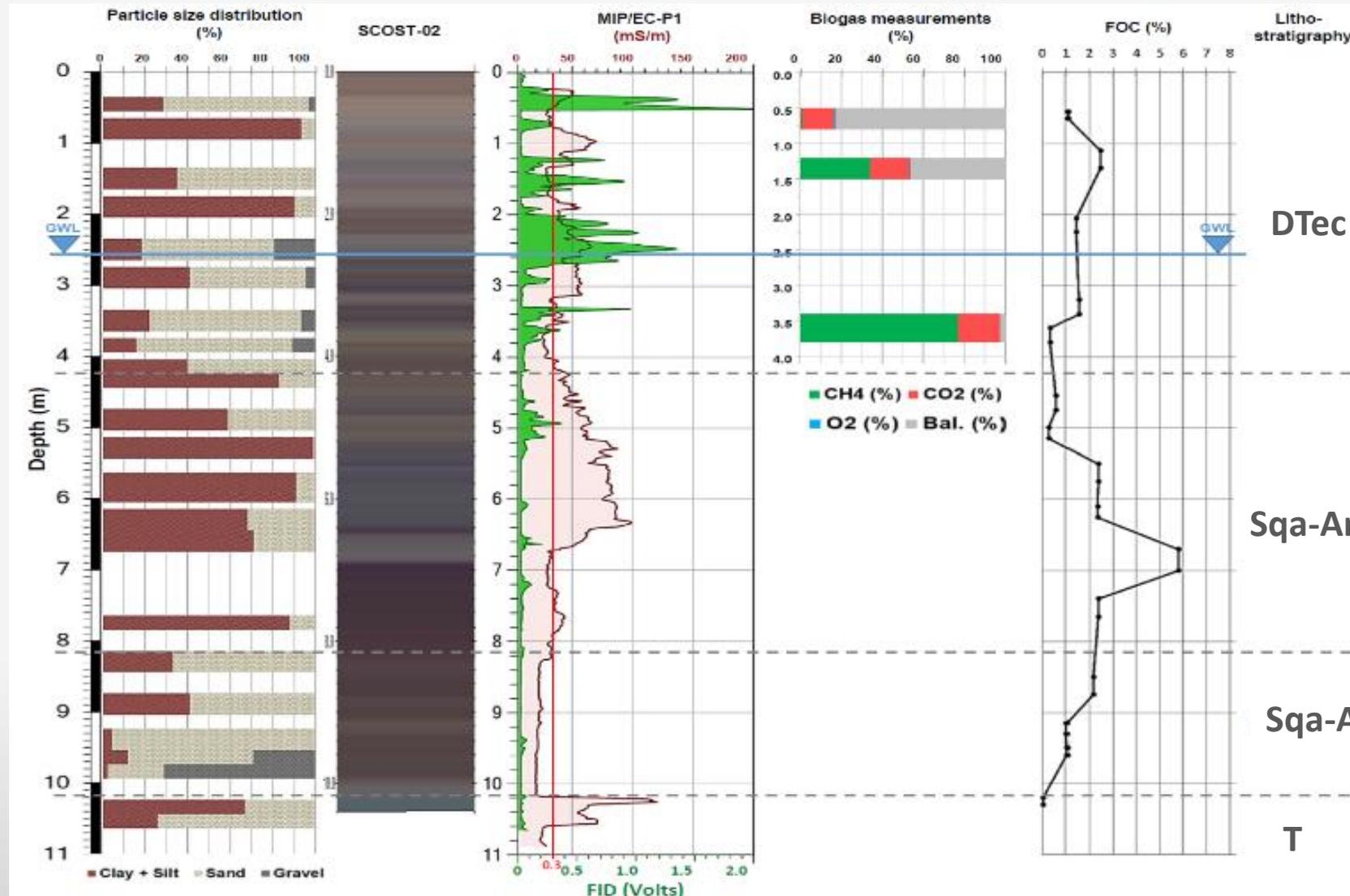
Integração dos dados de caracterização visual, granulométrica, MIP e análise química para HCH no solo

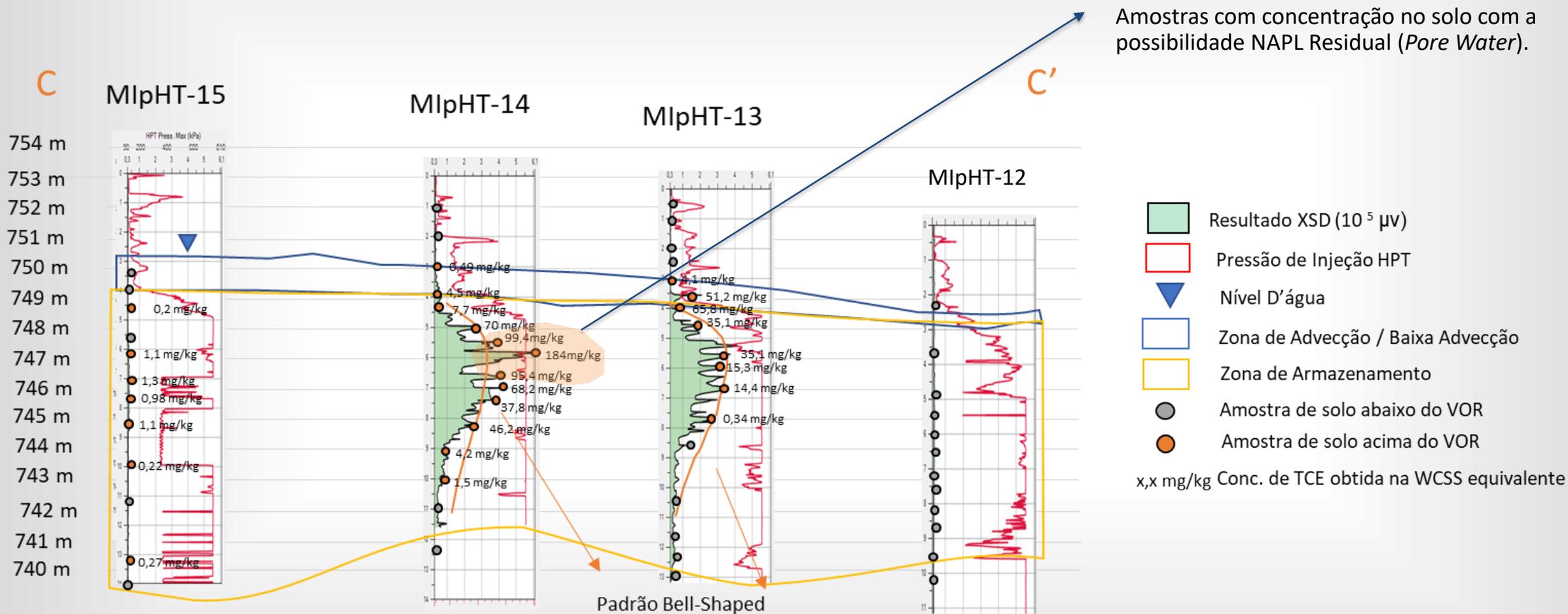


## Integração de métodos para caracterização de uma área com ocorrência de gás metano



## Integração de métodos para caracterização de uma área com ocorrência de gás metano





Logs de resultados do MIP (sensor XSD), divisão das zonas de fluxo (pressão de injeção do HPT), nível d'água aproximado e resultados de amostras de solo para o composto TCE.

## Considerações finais

- O uso de técnicas de Investigação de Alta Resolução vem se consolidando como um novo padrão de qualidade no mercado do GAC, com tendência de crescimento para casos cada vez mais complexos;
- Geração de dados em tempo real permite a tomada de decisão em campo, tornando as investigações mais dinâmicas, rápidas e assertivas;
- Utilização de técnicas de varredura otimiza o plano de amostragem e a investigação da área;
- HRSC auxilia na obtenção de Modelos Conceituais mais detalhados e com menos incertezas, suportando o design e a implementação de projetos de remediação mais eficientes.





- ARCADIS. Ferramentas de varredura e obtenção de dados em tempo real. Apresentação no Workshop de Remediação Beacon. Outubro de 2014.
- ARCADIS. Site investigation and restoration in the era of emerging contaminants and large plumes. July, 2019.
- BEACON ENVIRONMENTAL SERVICES. PASSIVE SOIL GAS SURVEYS. Disponível em <http://www.beacon-usa.com/services/passive-soil-gas-surveys/>
- BUTLER, J. J. et al. Hydrostratigraphic Characterization of Unconsolidated Alluvial Deposits with Direct-Push Sensor Technology. Kansas. 1999. Disponível em: <[http://www.kgs.ku.edu/Hydro/Publications/OFR99\\_40/index.html](http://www.kgs.ku.edu/Hydro/Publications/OFR99_40/index.html)>.
- CLEAN ENVIRONMENT BRASIL. Clean lança Laboratório Móvel para Investigações em Áreas Contaminadas. Disponível em <<http://www.clean.com.br/site/clean-lanca-laboratorio-movel-para-investigacoes-em-areas-contaminadas/>>
- COLUMBIA TECHNOLOGIES. Use of Today's High Resolution Tools for Remedial Design Characterization & Optimization. April, 2016.
- CRUMBLING, Deana M. **Summary of Triad Approach**. U.S. Environmental Protection Agency Office of Superfund Remediation and Technology Innovation: Superfund Triad Support Team. 2004. Disponível em <http://www.triadcentral.org/ref/doc/triadsummary.pdf>
- CTECH. Coastal Facility with groundwater contamination. C Tech 3D Scene Viewer. At: <https://www.ctech.com/>
- Einarson, M. D., and Mackay, D. M. Predicting impacts of groundwater contamination, *Env. Sci. & Tech.*, 35(3):66A-73A, 2001.
- Freitas, L. G. Aplicação de técnicas de alta resolução para caracterização geoambiental de áreas com ocorrência de gás metano. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP Rio Claro, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/150662>
- Freitas, L. G., Pedde, M. A. Z.; Chang, H. K. (2018) Aplicação de técnicas direct push para caracterização litoestratigráfica de alta resolução em ambiente aluvionar. *Águas Subterrâneas*, 31(4), p. 355.
- Guilbeault, M. A., Parker, B. L., and Cherry, J. A., Mass and flux distributions from DNAPL zones in sandy aquifers, *Ground Water*, 43(1): 70-86, 2005.
- GEOPROBE SYSTEMS INC. Direct Image. Disponível em <<https://geoprobe.com/direct-image>>.
- HORST, J., WELTY, N., SCHNOBRICH, M., SINHA, P., & KULKARNI, P. R. (2017). Digital Innovation: The Next Disruptive but Transformative Remediation Frontier. **Groundwater Monitoring & Remediation**, 37(3), 19–27. <https://doi.org/10.1111/gwmmr.12222>
- INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL – ITRC. Sampling, Characterization and Monitoring Team. 2003. Technical and Regulatory Guidance for the Triad Approach: A New Paradigm for Environmental Project Management. Available online at <<http://www.itrcweb.org>>.

- INTERSTATE TECHNOLOGY AND REGULATORY COUNCIL (ITRC) Use and Measurement of Mass Flux and Mass Discharge.2010. At: <https://maf-1.itrcweb.org/4-measuring-mass-flux-and-mass-discharge/>
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). Contaminants in the Subsurface: Source Zone Assessment and Remediation. National Academy Press; Washington, D.C: 2005.
- QUINNAN, Joe. Real-Time High Resolution LNAPL and DNAPL Characterization – Part 1: Philosophy and Background. In: North American Environmental Field Conference. Tampa, FL. Março/2012
- RIYIS et al. (2019). A importância da amostragem de solo de perfil completo (ASPC) para a investigação de alta resolução em áreas contaminadas. Águas Subterrâneas, 33(4), pp. 1–18. doi: 10.14295/ras.v33i4.29735
- Riyis, Marcos Tanaka. Contribuição para Investigação de Áreas Contaminadas com Abordagem de Alta Resolução. Tese de Doutorado. UNESP – FEB. Bauru, 2019. 162 f. (<http://hdl.handle.net/11449/191563>)
- RIYIS, M.T. Investigação geoambiental com tomada de decisão em campo utilizando o piezocone de resistividade como ferramenta de alta resolução. 2012. 173 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012.
- SOLINST. CMT Multilevel System. Disponível em <<http://www.solinst.com/products/multilevel-systems-and-remediation/>>
- STONE ENVIRONMENTAL INC. Advanced/High Resolution Site Characterization - A Short Course. In: Third International Congress on Subsurface Environments, Sao Paulo, Brasil. 2013
- Suthersan, S., Quinnan, J. and Welty, N. (2015) ‘The New ROI: Return on Investigations by Utilizing Smart Characterization Methods’, Groundwater Monitoring & Remediation, 35(3), pp. 25–33.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. High Resolution Site Characterization for Groundwater Short Course. 23rd Annual NARPM Training Program. 2014. At: < <http://clu-in.org/characterization/technologies/hrsc/pdfs/HRSC-Participant-Manual-NARPM-2014.pdf>>
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. CLEAN UP INFORMATION (CLU-IN). High-Resolution Site Characterization (HRSC). At: <http://www.clu-in.org/characterization/technologies/hrsc/>

# Obrigado pela atenção!

Eng. Leandro Gomes de Freitas

[lfreitas@ipt.br](mailto:lfreitas@ipt.br)

[www.abge.org.br](http://www.abge.org.br)

[abge@abge.org.br](mailto:abge@abge.org.br)

(11) 3767-4721