

# Métodos geofísicos para investigação de áreas contaminadas

Otávio Coaracy Brasil Gandolfo (IPT)

CIMA - Cidades, Infraestrutura e Meio Ambiente

SIRGA - Seção de Investigações, Riscos e Gerenciamento Ambiental

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

- Principais métodos geofísicos utilizados na investigação ambiental (áreas contaminadas)
- Alguns tipos de contaminação e a resposta geofísica
- Exemplos de uso no diagnóstico de uma área
- Exemplos de uso na remediação de uma área

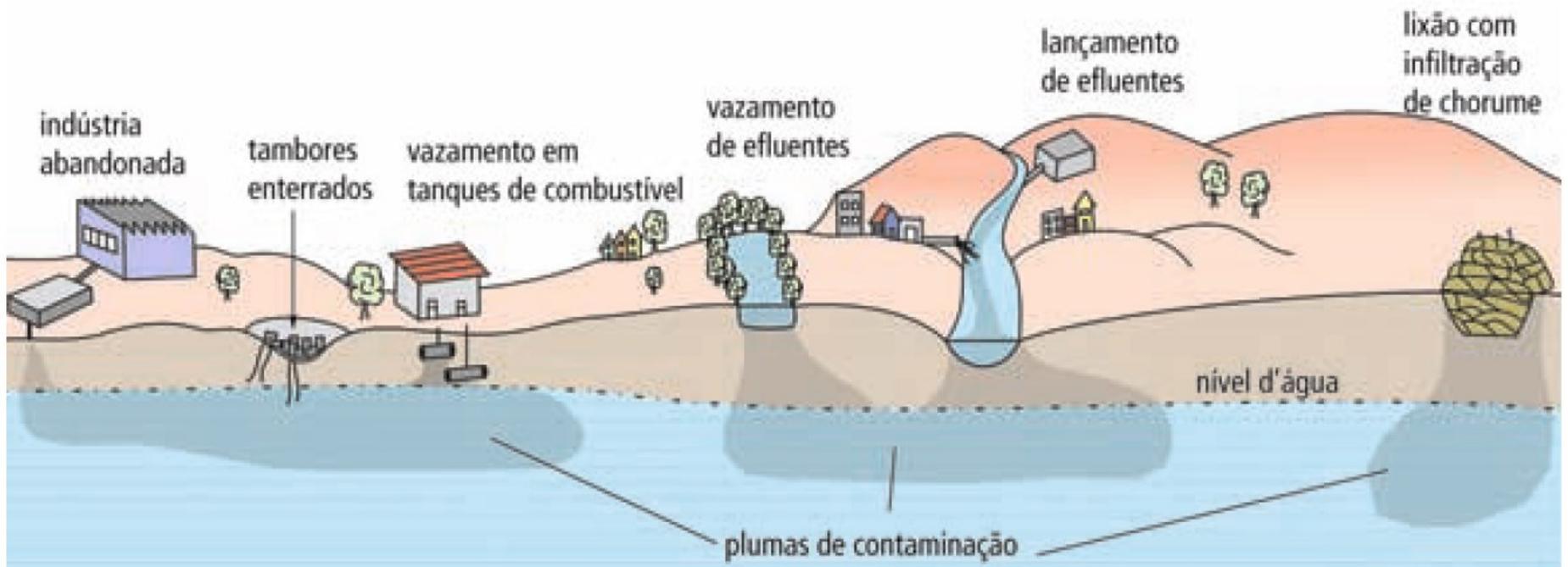
# **EXPLORATION GEOPHYSICS**

**OIL & GAS**

**MINING  
GEOPHYSICS**

**ENGINEERING  
AND  
ENVIRONMENTAL**

## Exemplos de fontes potenciais de poluição





Pluma de contaminação?  
Passivo ambiental?



2010



boletim  
**SBGf**  
Publicação da Sociedade Brasileira de Geofísica  
Número 2, 2010 – ISSN 2177-9080



## A Geofísica aplicada ao estudo de contaminação de solos e águas subterrâneas

A conscientização da proteção do solo e das águas subterrâneas e o enrijecimento da legislação ambiental têm ampliado a demanda pelo uso dos métodos geofísicos no estudo de áreas contaminadas. A rapidez na avaliação a custos relativamente baixos representa a principal vantagem destes métodos indiretos em relação às investigações diretas na subsuperfície.

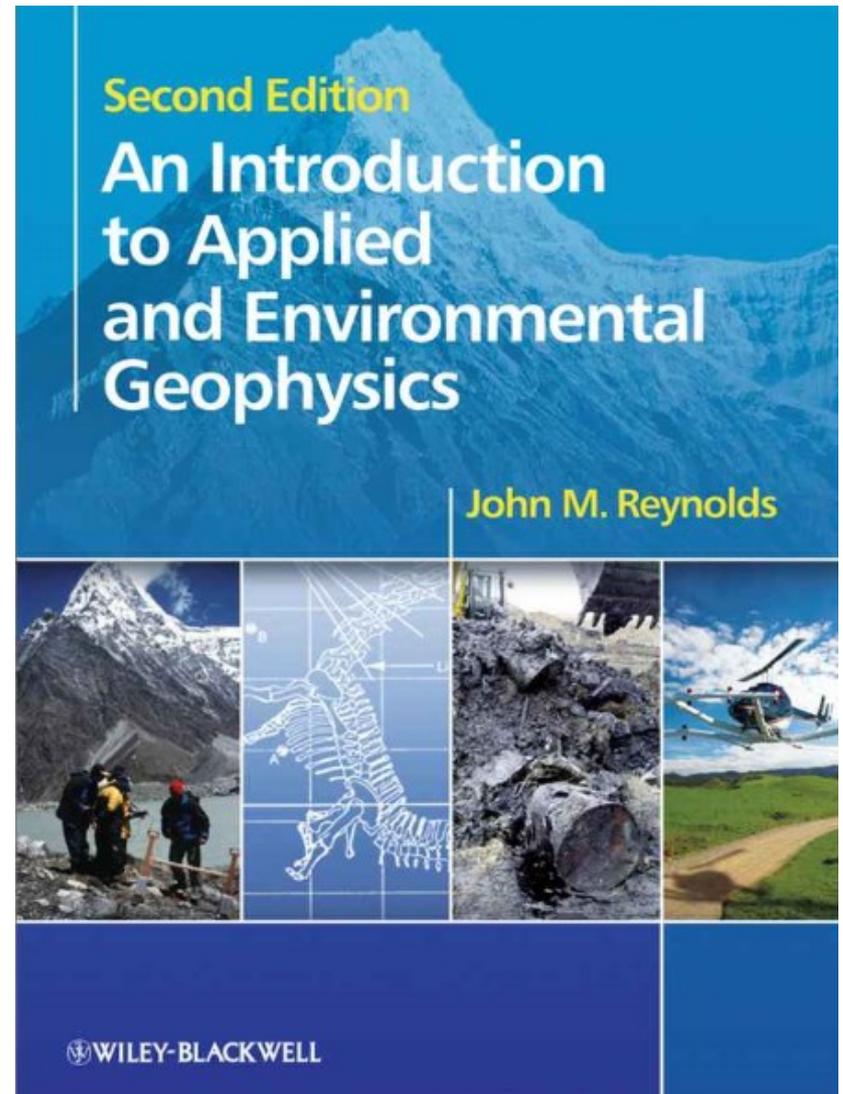
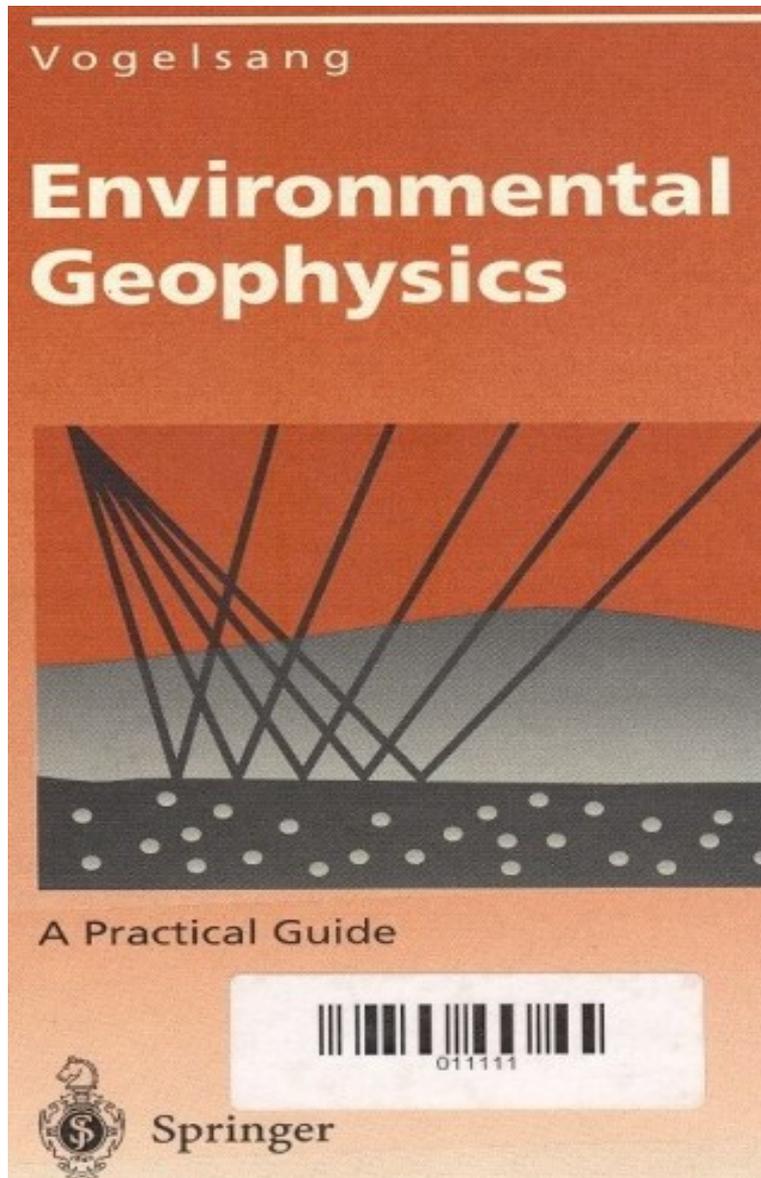
Capex avalia programas de pós-graduação em Geociências, p.6. 3

Levantamentos aerogeofísicos mapeiam 109 municípios baianos, p.6. 7

2022



1995



2011

**NORMA  
BRASILEIRA**

**ABNT NBR  
15935**

Primeira edição  
22.03.2011

Válida a partir de  
22.04.2011

---

**Investigações ambientais – Aplicação de  
métodos geofísicos**

*Environmental investigations – Application of geophysical methods*

ICS 13.020.01; 13.020.040

ISBN 978-85-07-02687-7



**ASSOCIAÇÃO  
BRASILEIRA  
DE NORMAS  
TÉCNICAS**

Número de referência  
ABNT NBR 15935:2011  
22 páginas

© ABNT 2011



Início



Meu cadastro



Meus pedidos



Meu carrinho



Perguntas Frequentes



## Norma Técnica

**Código** ABNT NBR 15935:2011

**Data de Publicação :** 22/03/2011

**Válida a partir de :** 22/04/2011

**Título :** Investigações ambientais — Aplicação de métodos geofísicos

**Título Idioma Sec. :** Environmental investigations – Application of geophysical methods

**Nota de Título :** Confirmada em 03.12.2019

**Comitê :** ABNT/CEE-068 Avaliação da Qualidade do Solo e Água p/ Levantamento de Passivo Ambiental e Análise de Risco à Saúde Humana

**Páginas :** 22

**Status :** Em Vigor

**Idioma :** Português

**Organismo :** ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

**Preço (R\$) :** 139,70

**Objetivo :** Esta Norma estabelece as diretrizes para a seleção de métodos geofísicos aplicáveis a investigações ambientais de solo e água subterrânea, embora não descreva os procedimentos específicos para cada método.



COMPRAR



CONTINUAR PESQUISANDO



VISUALIZE ANTES DE COMPRAR  
Apenas para associados ABNT



Normas Necessárias para a aplicação da ABNT NBR 15935:2011



ICS/CIN

13.020.01 - Meio ambiente e proteção do meio ambiente em geral

13.020.40 - Poluição, controle da poluição e conservação



### DESEMPENHO DE EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS - ABNT NBR 15575

#### OBJETIVO

Levar ao entendimento dos conceitos e à forma de atender aos requisitos da norma.

**29 a 31/08/2022**

24 h, em 3 dias  
das 8 h 30 min às 17 h 30 min

Mais informações e inscrições:  
[cursos@abnt.org.br](mailto:cursos@abnt.org.br)  
ou (11) 3017.3680/3681/3683

11 3017-3636



## ABNTCOLEÇÃO, CONHEÇA!

Quer ter acesso

CURSOS (0 itens)

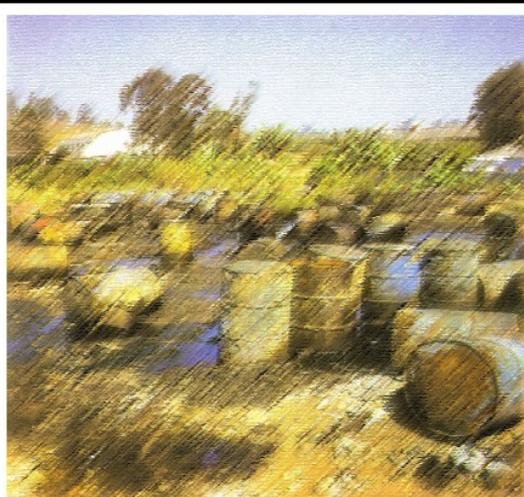
PUBLICAÇÕES (0 itens)



### DEMONSTRAÇÃO GRATUITA CLIQUE AQUI!

Para mais informações:  
[colecacao@abnt.org.br](mailto:colecacao@abnt.org.br)  
(11) 3017-3652





## Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas

Governo do Estado de São Paulo  
Secretaria do Meio Ambiente  
CETESB - Cia. de Tecnologia de Saneamento Ambiental  
Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH

0100 Índice

---

## Capítulo VI Investigação confirmatória

Investigação confirmatória – Introdução	6000
Métodos de “screening”	6100
Métodos geofísicos	6200

---

Métodos geofísicos **6200**

---

## 6200 Métodos geofísicos

### 1 Geofísica aplicada à detecção da contaminação do solo e das águas subterrâneas

## 2 Principais métodos geofísicos para investigações ambientais

Existe uma variedade de métodos geofísicos que podem ser utilizados nos estudos ambientais, porém os principais e mais adequados métodos, que comumente são aplicados à investigação da contaminação do solo e da água subterrânea, são o geo-radar (GPR), o eletromagnético indutivo (EM), a eletrorresistividade (ER) e a magnetometria.

Métodos geofísicos são técnicas indiretas (não invasivas, não destrutivas), geralmente realizados na superfície do terreno, que investigam os contrastes das propriedades físicas existentes entre os materiais geológicos e os alvos da investigação

Os métodos geofísicos envolvem a medida de certas **propriedades físicas** dos solos e das rochas

Os métodos geofísicos diferem entre si de acordo com a **propriedade física** investigada:

- ✓ densidade
- ✓ constantes elásticas
- ✓ condutividade elétrica
- ✓ susceptibilidade magnética
- ✓ radioatividade

# Diferente métodos geofísicos investigam diferentes propriedades físicas do meio

## Propriedades físicas x método

Permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ) e condutividade elétrica ( $\sigma$ ) : GPR

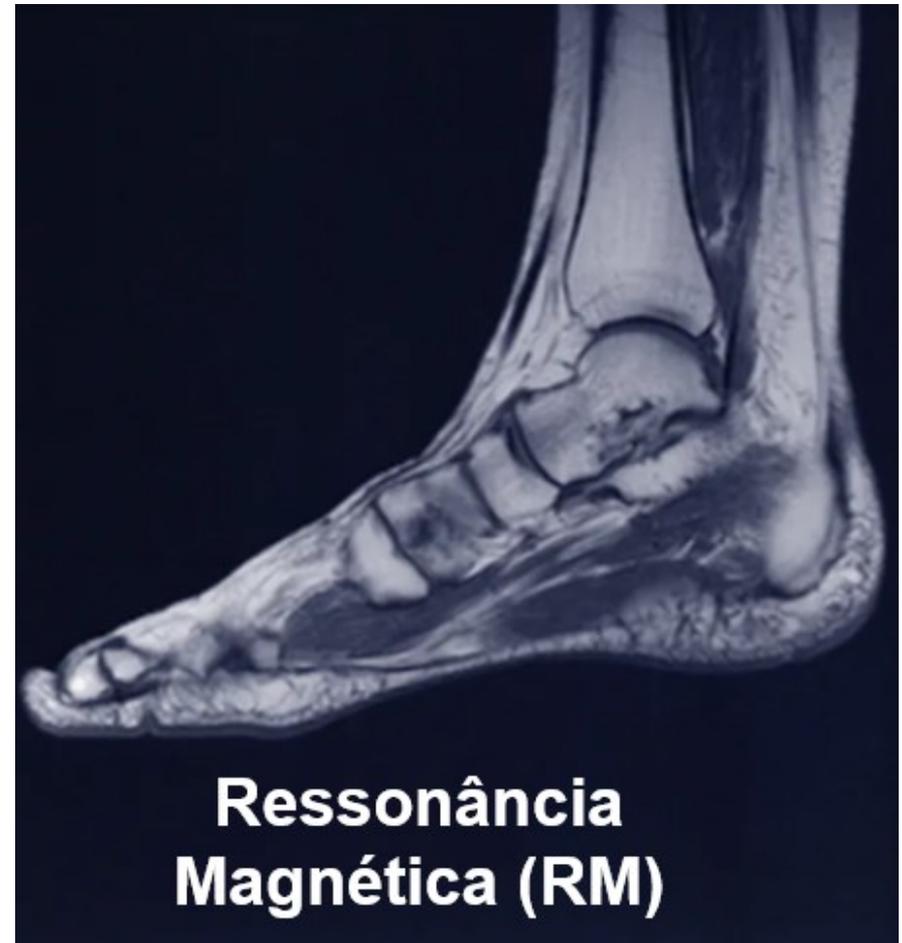
Condutividade ( $\sigma$ ) ou resistividade ( $\rho$ ) elétrica:  
Eletrorresistividade (ER) e Métodos Eletromagnéticos (EM)

Susceptibilidade magnética ( $\kappa$ ): Magnetometria

Geofísica e medicina: muito mais parecidos do que você possa imaginar!



# GEOFÍSICA & MEDICINA



**RX** → distingue a parte dura (ossos) da parte mole (tecidos) do corpo

**RM** → permite visualizar melhor o contraste entre as partes moles do corpo

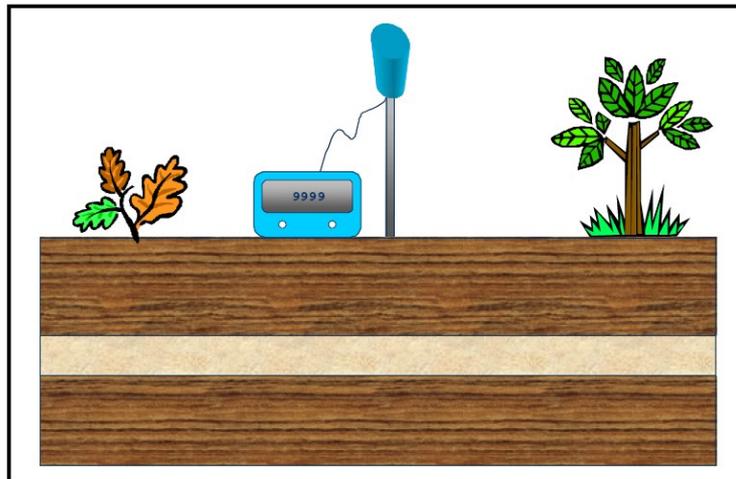
**GPR, EM e ER** respondem muito bem às variações da **condutividade elétrica ( $\sigma$ ) / resistividade elétrica ( $\rho$ )**

$\sigma$ ,  $\rho$   $\Rightarrow$  Representam a facilidade (ou dificuldade) encontrada pela corrente elétrica para se propagar em um meio

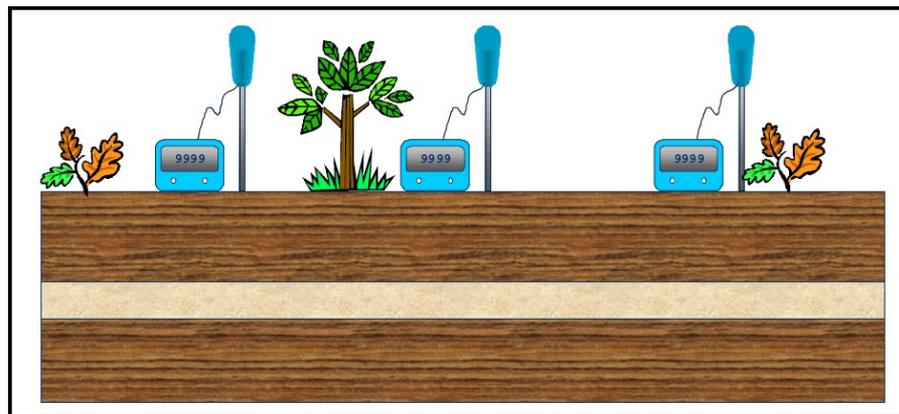
$$\sigma = \frac{1}{\rho} \qquad \rho = \frac{1}{\sigma}$$

# Como é feita uma aquisição de dados geofísicos?

Em um ponto  
(estação)



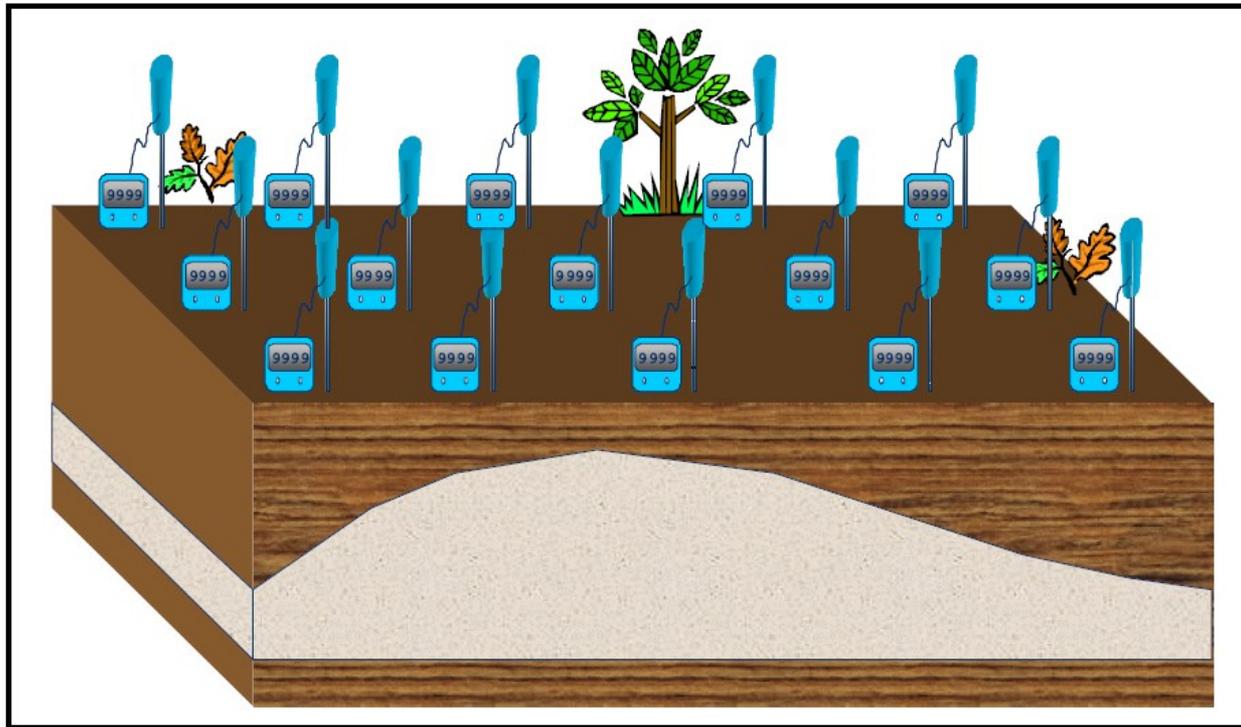
Em vários pontos ao  
longo de uma linha



↳ perfil ou linha geofísica

# Como é feita uma aquisição de dados geofísicos?

Um conjunto de perfis ou agrupamento de estações que cubram uma determinada área é chamado de malha (“grid”)



malha ou “grid”



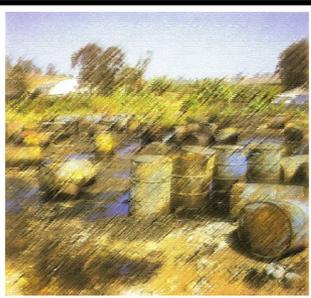
## Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas

Governo do Estado de São Paulo  
Secretaria do Meio Ambiente  
CETESB - Cia. de Tecnologia de Saneamento Ambiental  
Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH

A realização dos levantamentos geofísicos pode ser efetuada nas diferentes etapas de atividades estabelecidas para o gerenciamento de áreas contaminadas

- Na etapa de investigação confirmatória, as técnicas geofísicas são utilizadas para localizar os pontos de amostragem mais adequados, através da determinação de **anomalias** que representam os locais com maiores concentrações de contaminantes (*hot spots*)



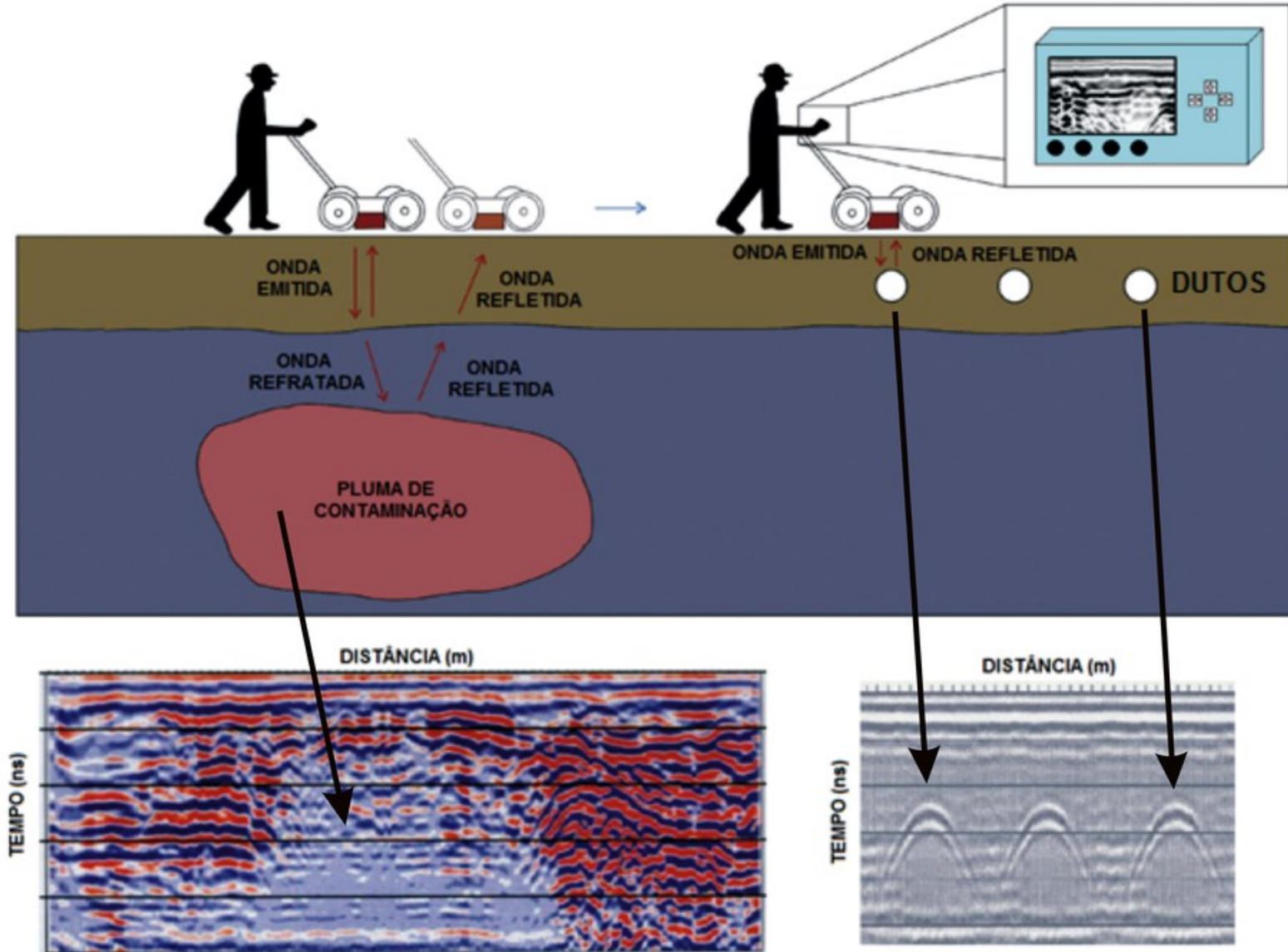


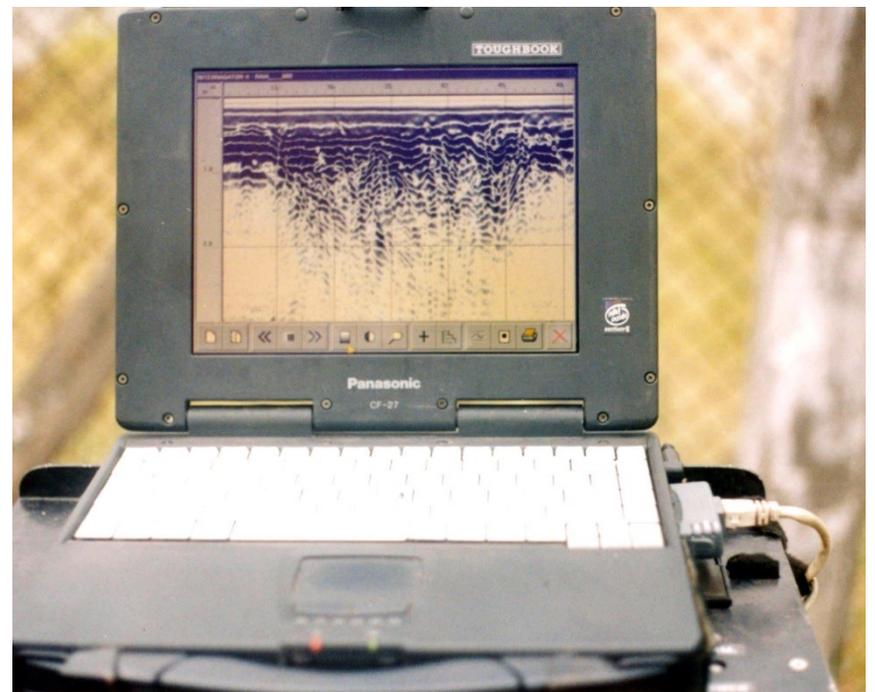
**Manual de  
Gerenciamento de  
Áreas Contaminadas**

Governo do Estado de São Paulo  
Secretaria do Meio Ambiente  
CETESB - Cia. de Tecnologia de Saneamento Ambiental  
Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH

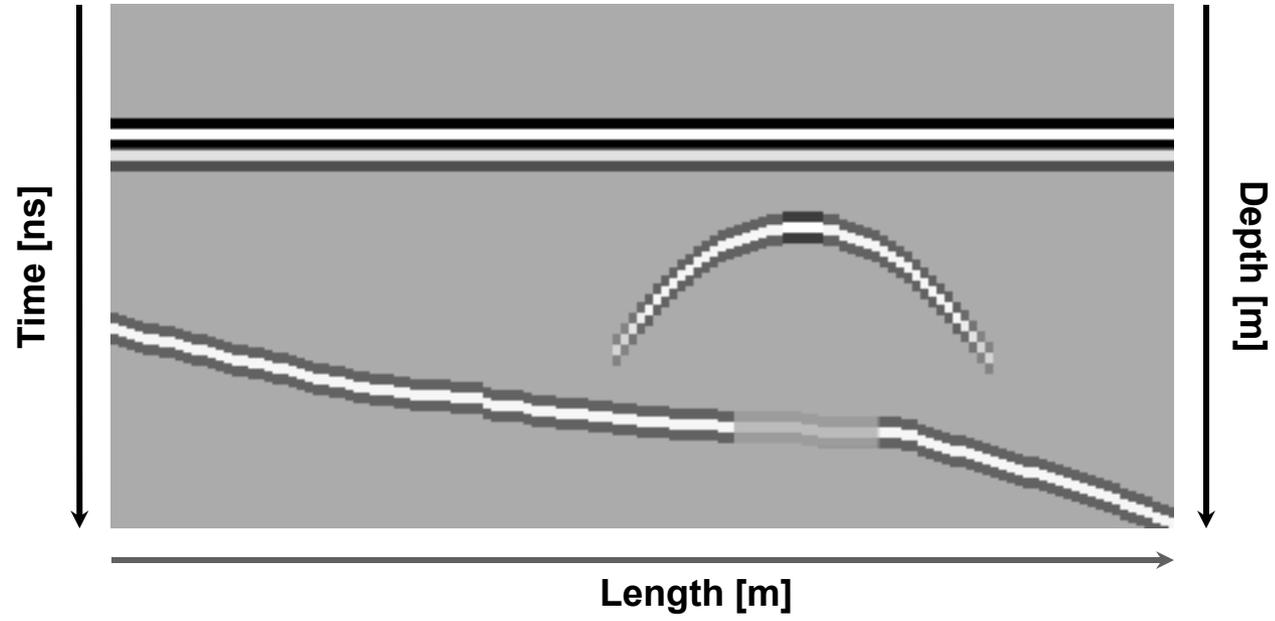
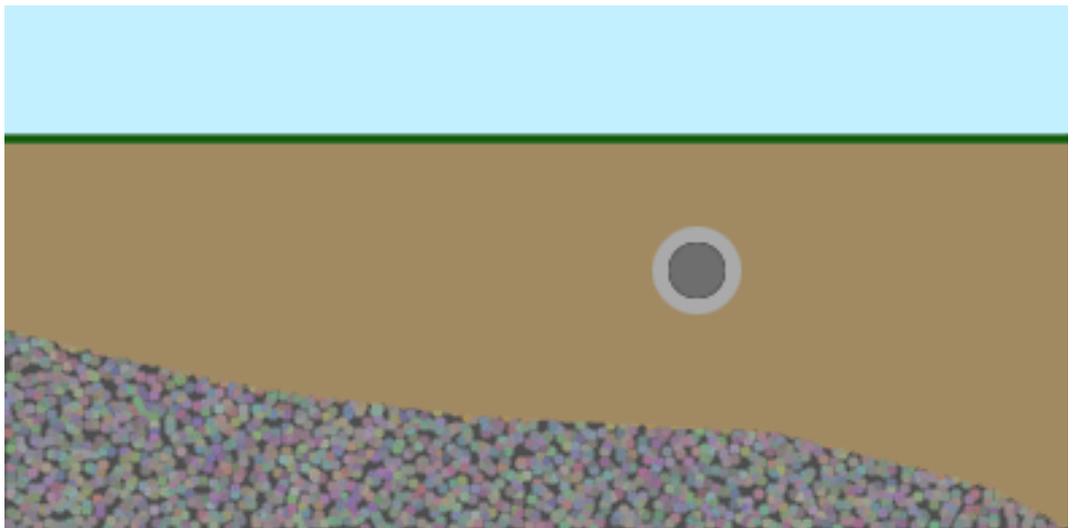
- Quando da investigação detalhada e investigação para remediação, os métodos geofísicos podem ser empregados para o mapeamento e monitoramento da propagação da contaminação
- Na fase de remediação de áreas contaminadas, estes métodos podem ser aplicados na avaliação da eficiência dos trabalhos de recuperação pela confirmação das reduções das concentrações dos contaminantes

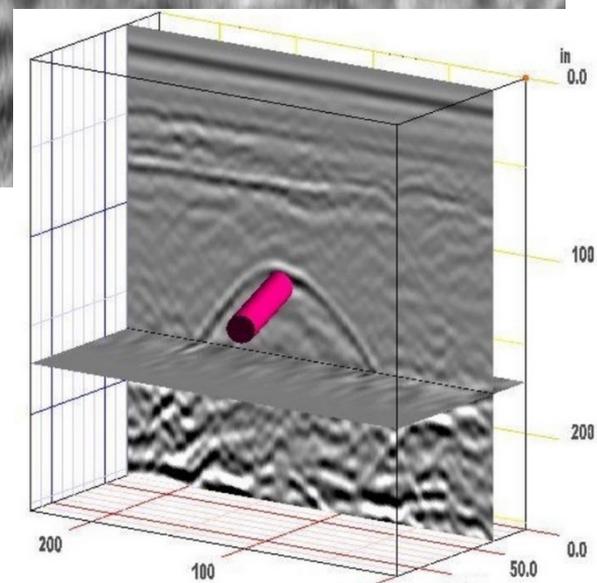
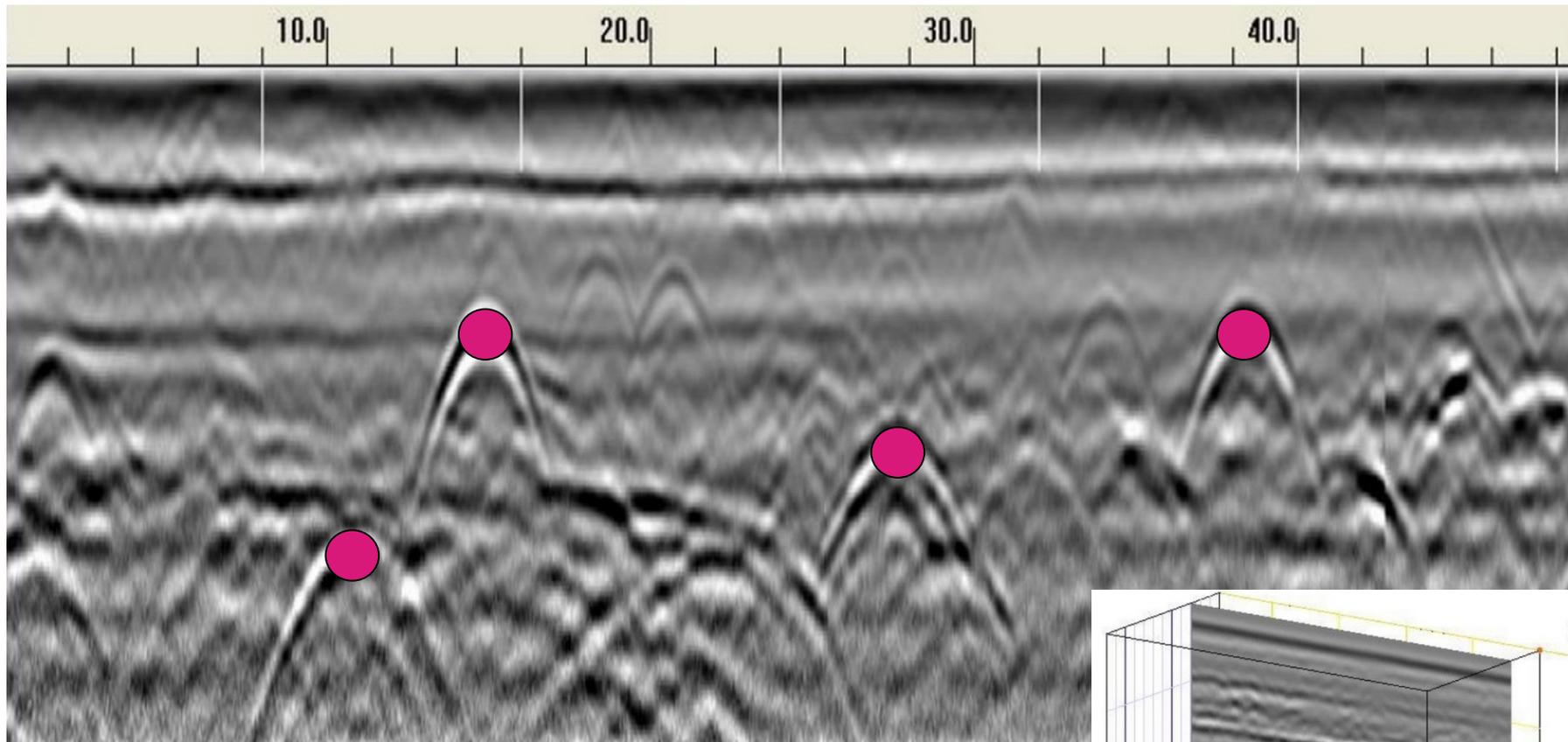
# I) Georadar (GPR-Ground Penetrating Radar)

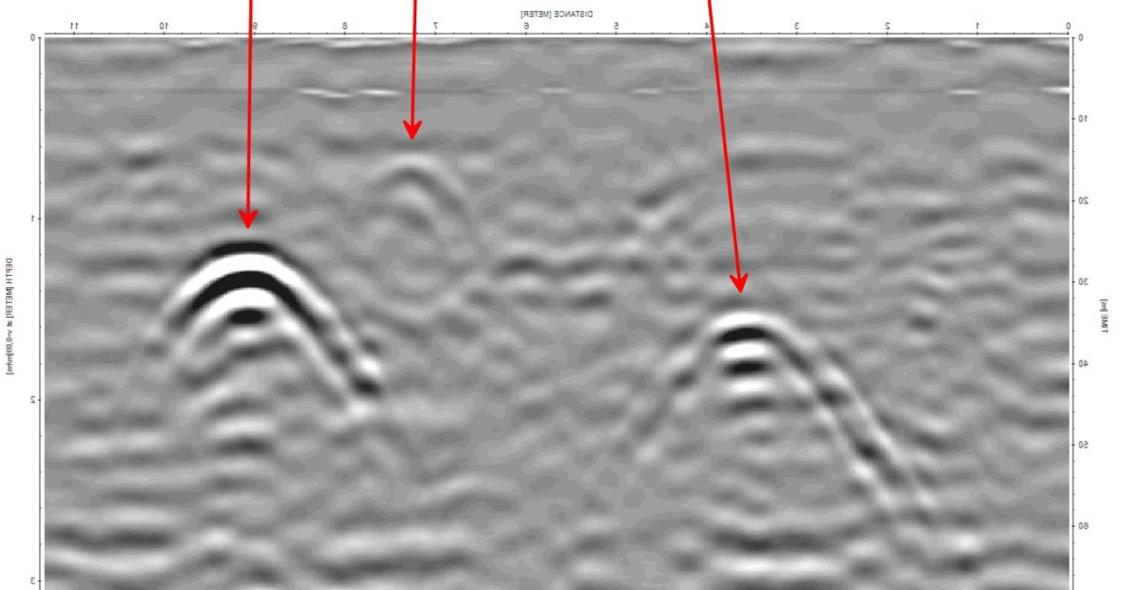




# I) Georadar (**GPR**-Ground Penetrating Radar)





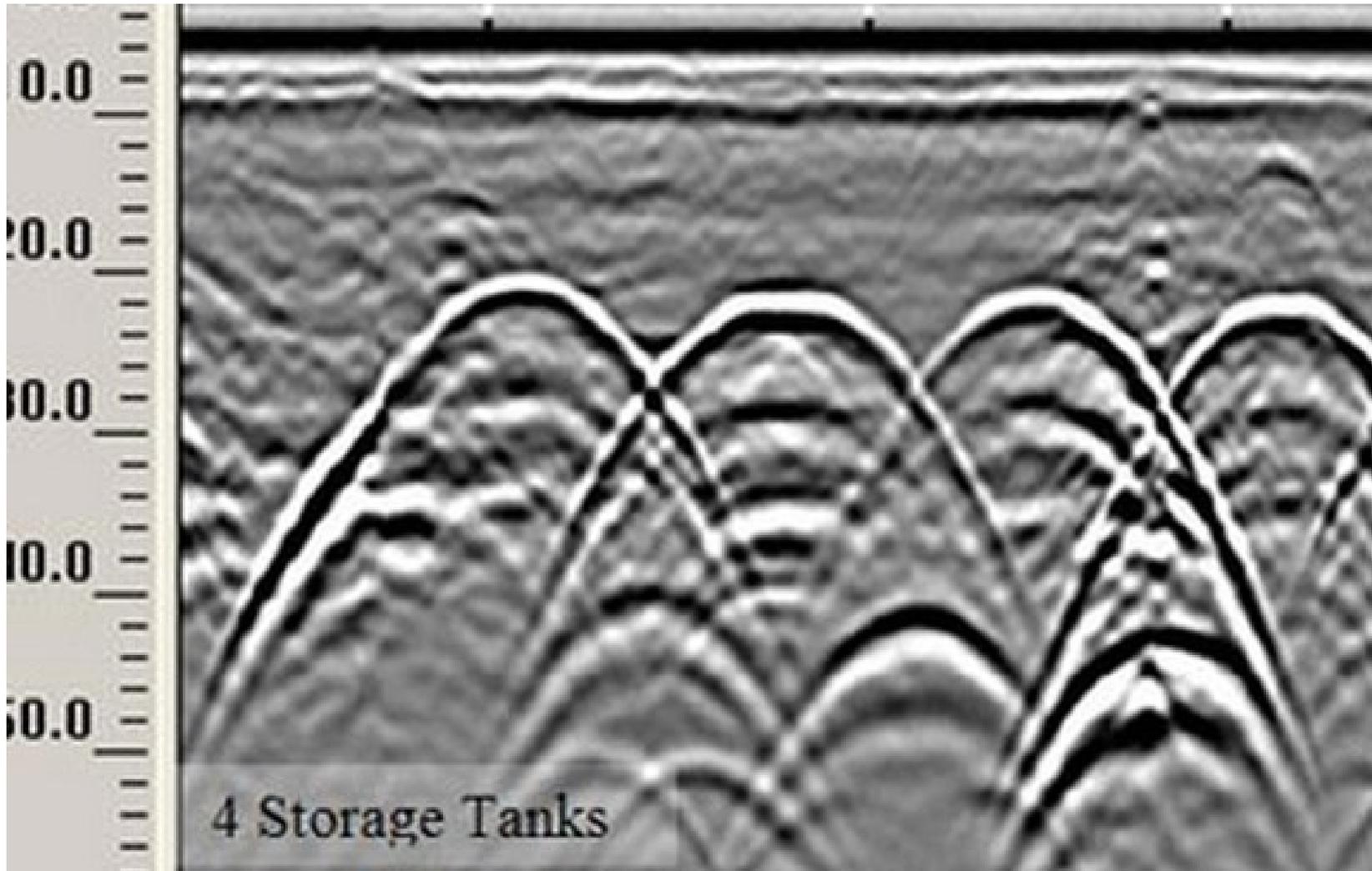


# Detecção de tanques enterrados



Riolândia-SP (julho/2021)

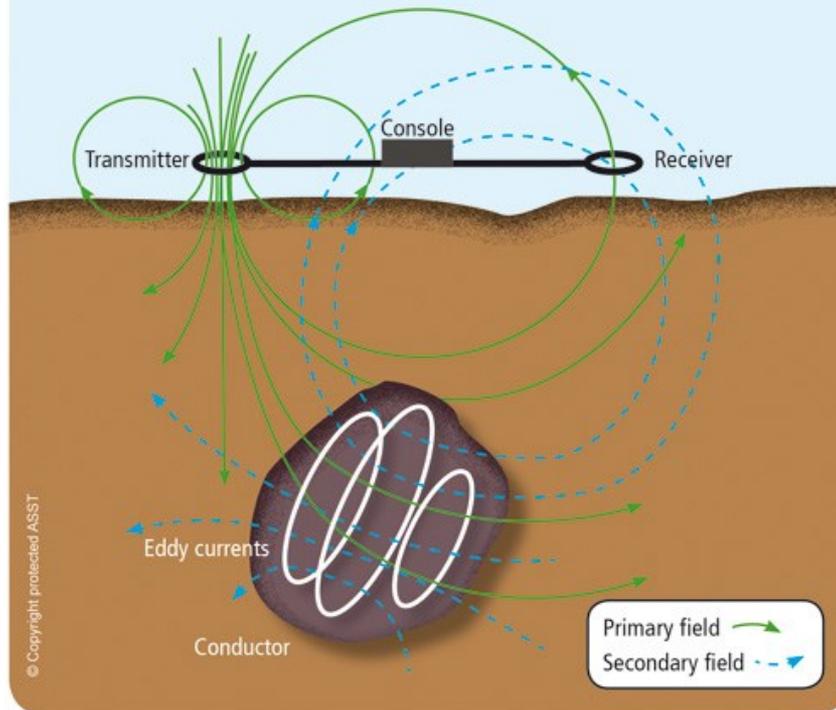
## Detecção de tanques enterrados



# II) Eletromagnético (EM)



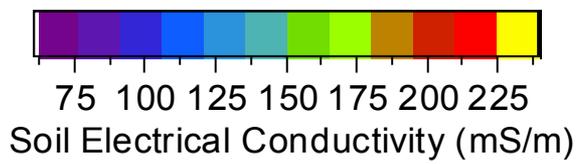
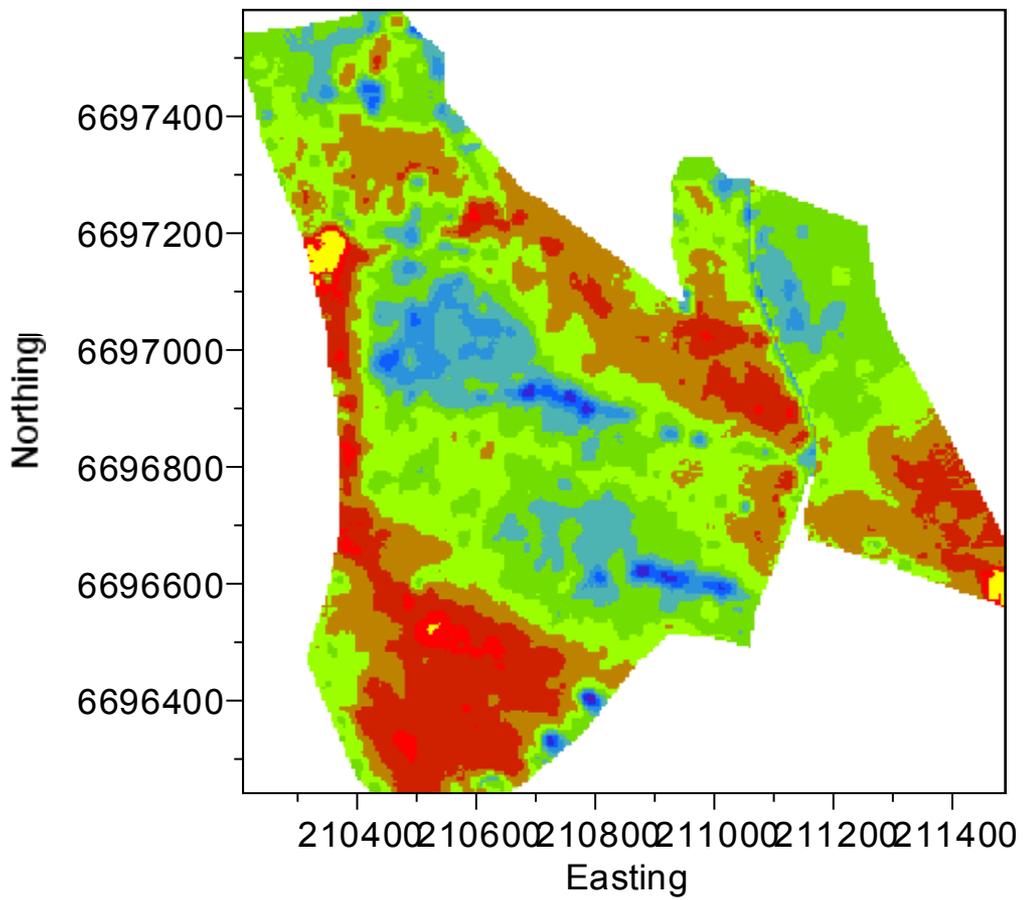
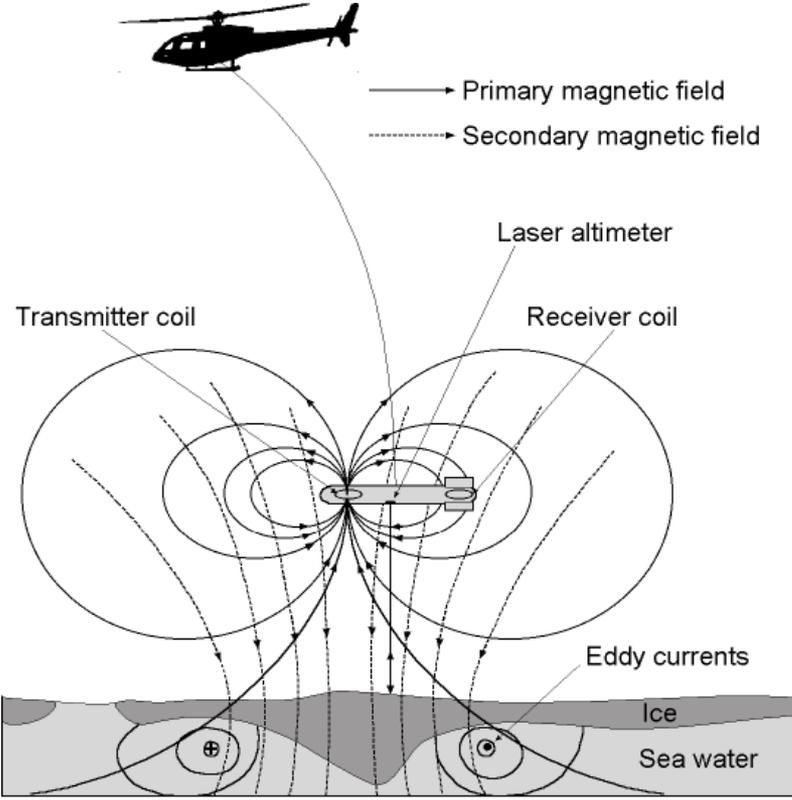
SHALLOW ELECTROMAGNETIC INDUCTION



$$\sigma_{ap} = \frac{4}{2\pi f \mu_0 S^2} \left( \frac{H_S}{H_P} \right)$$

$H_P$  = campo primário  
 $H_S$  = campo secundário

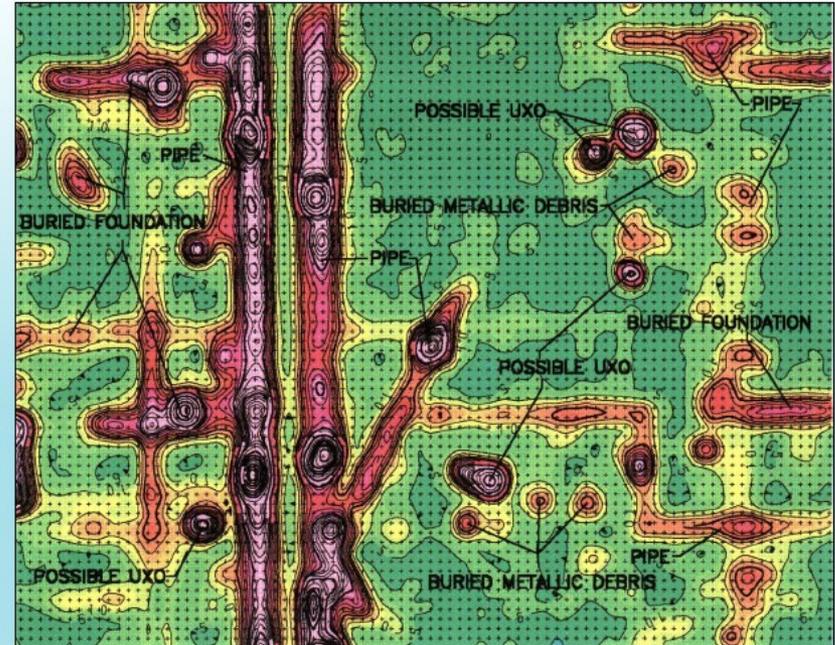
# II) Eletromagnético (EM)



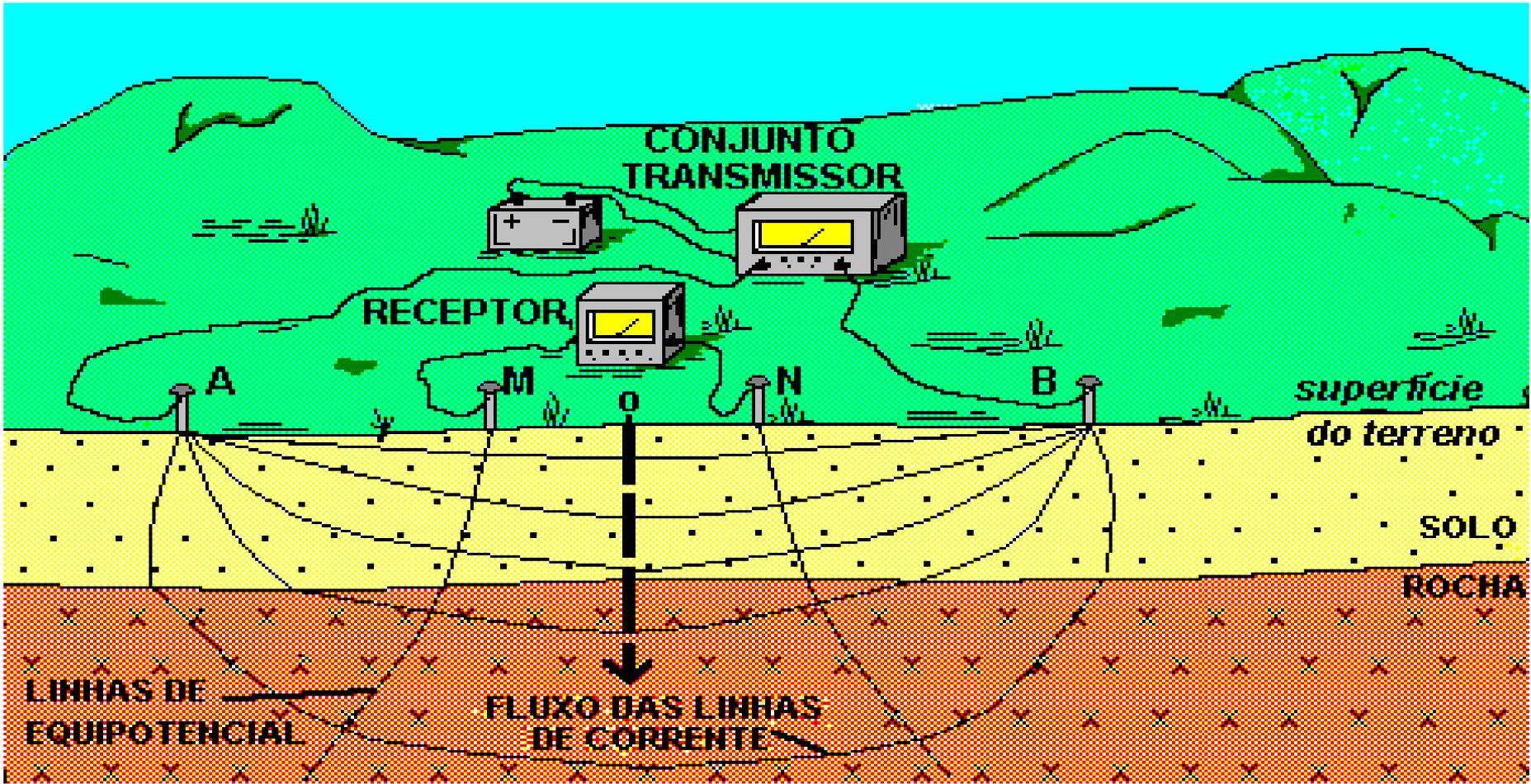
# II) Eletromagnético (EM)



## UXO Detection



### III) Eletrorresistividade (ER)

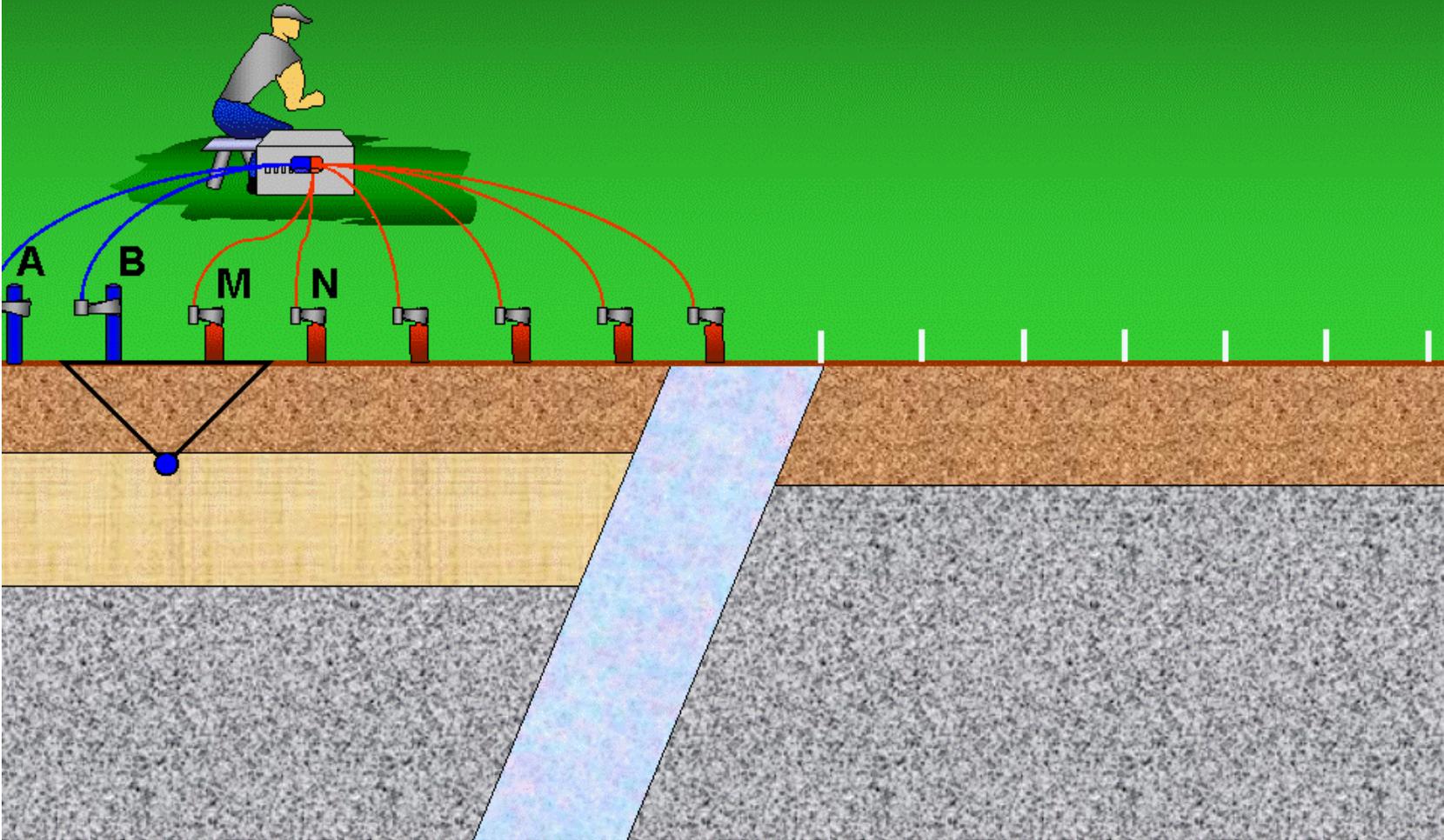


$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

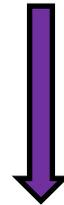
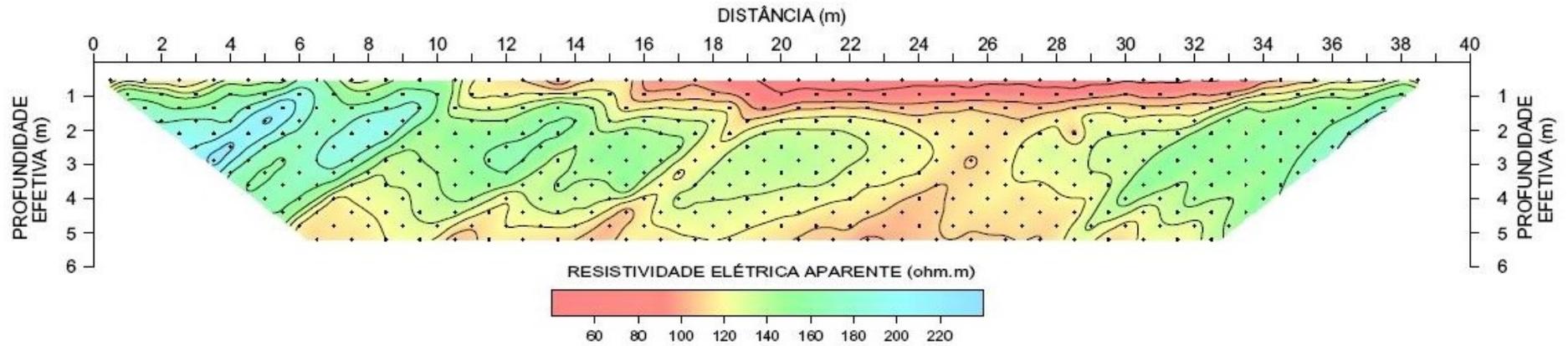
# III) Eletrorresistividade (ER)

## Caminhamento Eléctrico - Arranjo Dipolo-Dipolo

unesp  
Braga, A.C.O.

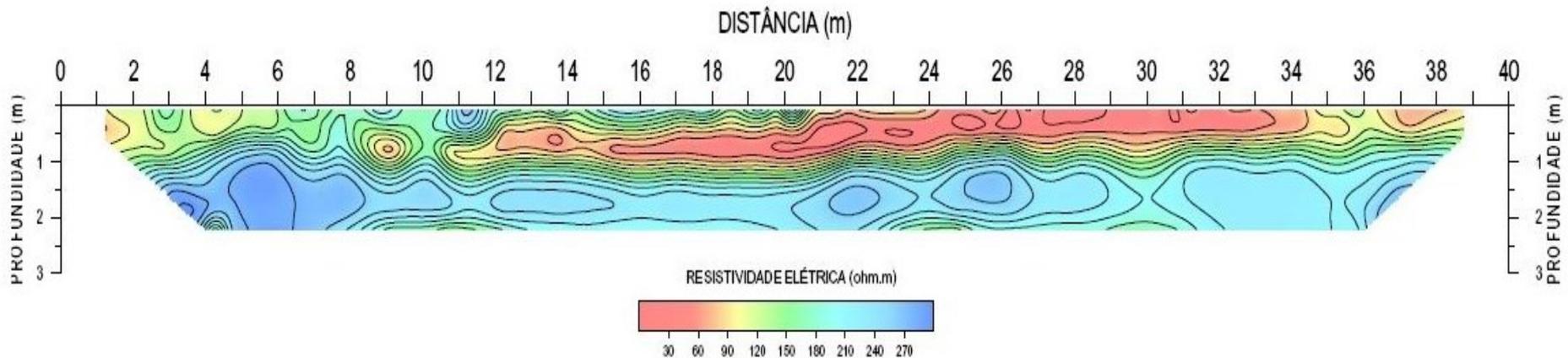


# PSEUDO SEÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE

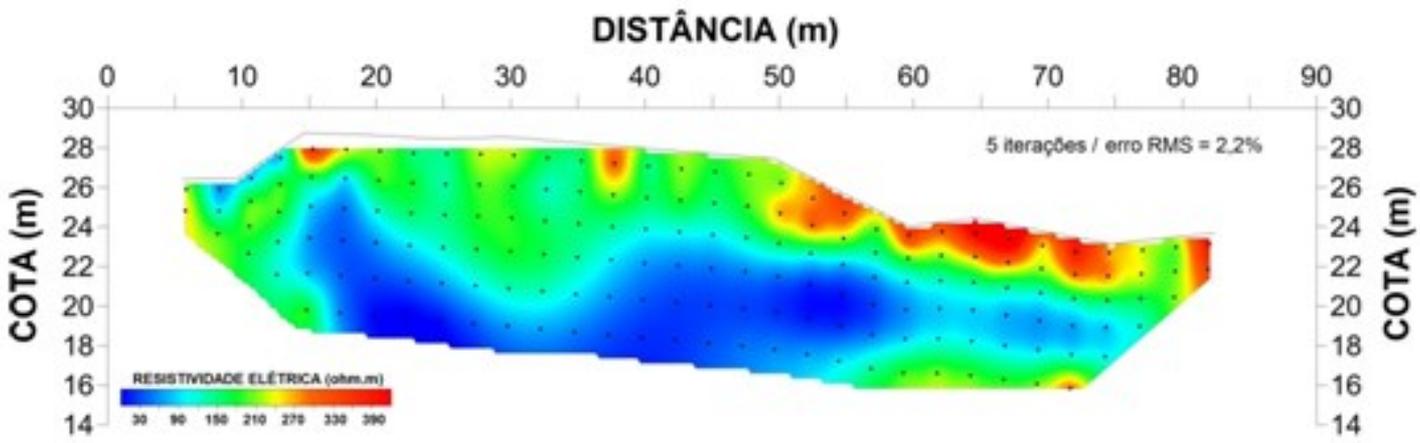
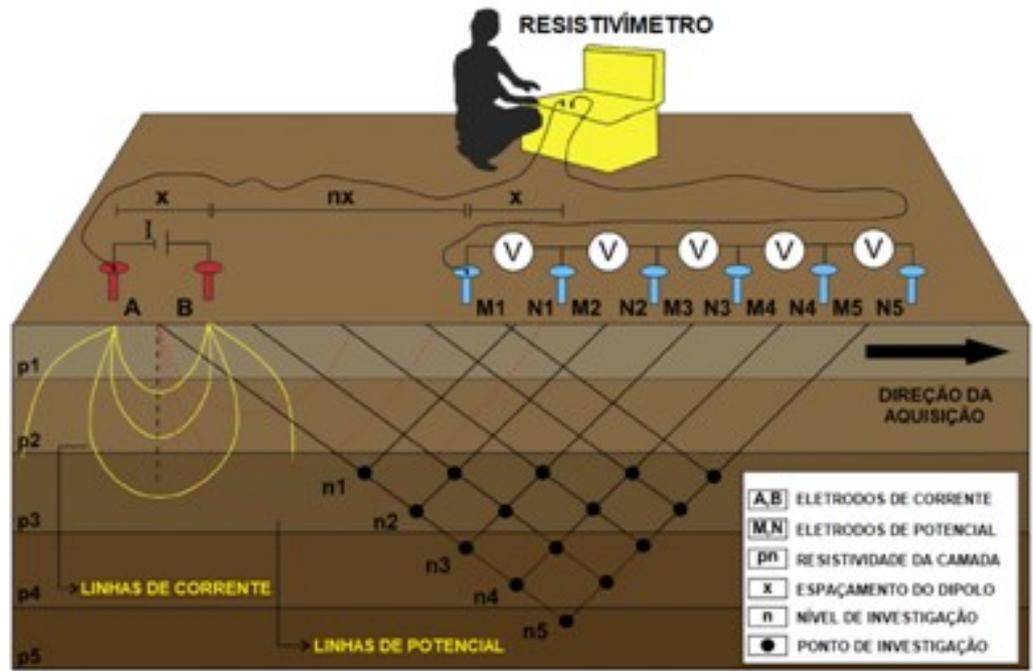


**PROCESSAMENTO**

# SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA



# III) Eletrorresistividade (ER)



# ***SBGf LIVE***

## **Métodos Geelétricos Aplicados na Contaminação do Meio Geológico (Rochas e Águas Subterrâneas)**



**Antônio Celso de Oliveira Braga**  
*(Professor Adjunto da UNESP - Campus de Rio Claro)*

***MEDIADORA:*** **Daniela Serrão**  
*(Estudanta de Geofísica - UnB)*

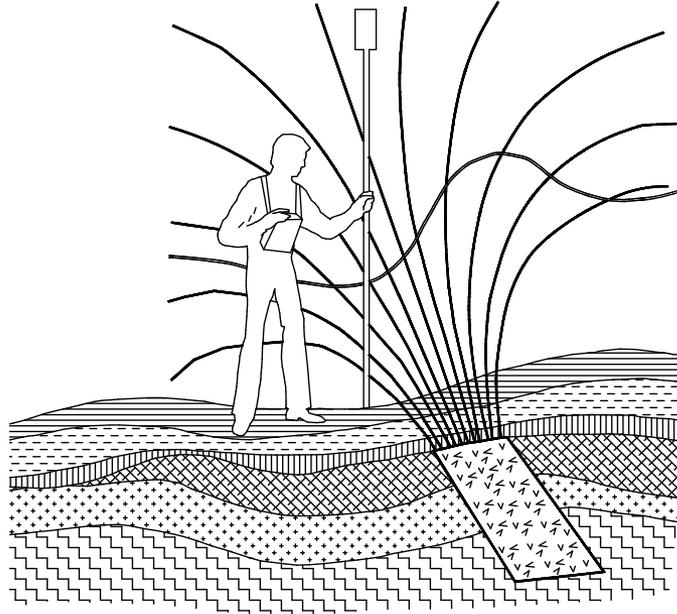
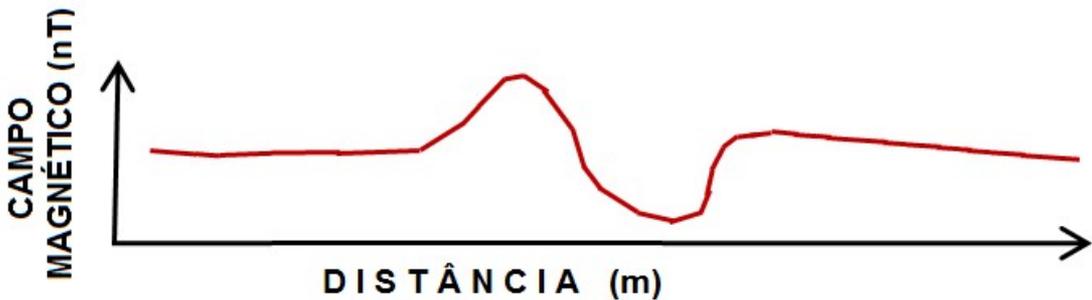
A live será transmitida pelo  
**Canal do YouTube**

**14 de Abril**  
**às 20h**



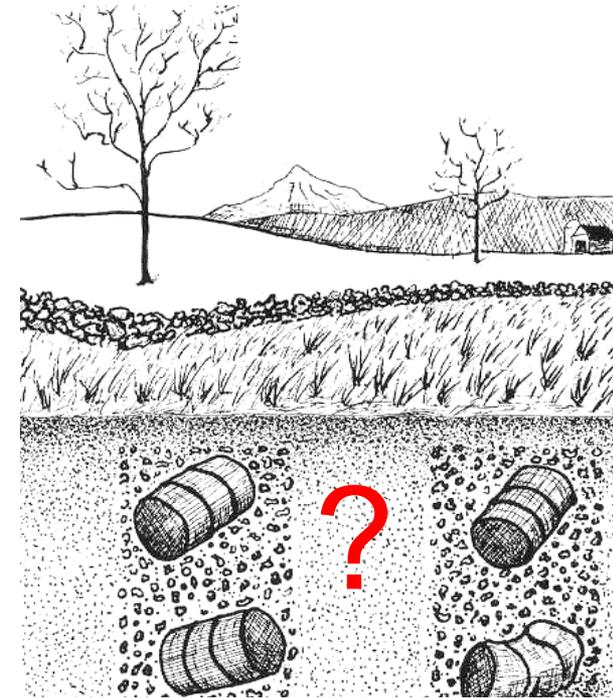
**<https://www.youtube.com/watch?v=gVNJu-Ir-dM>**

# IV) Magnetometria (MAG)

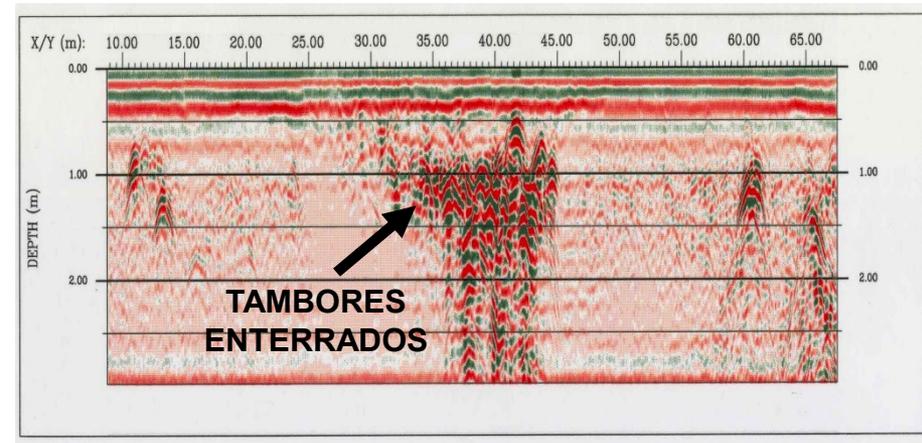
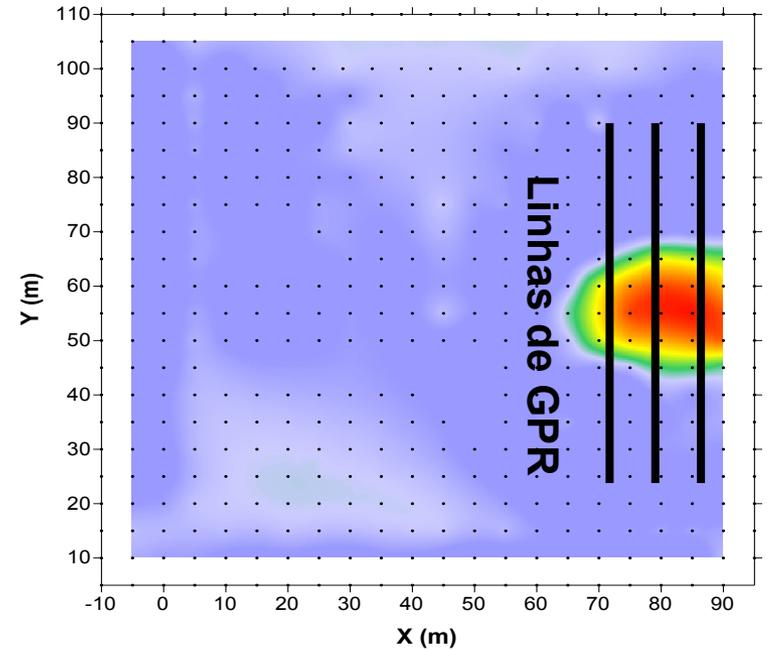


# LOCALIZAÇÃO DE TAMBORES ENTERRADOS

Área com suspeita da existência de tambores enterrados



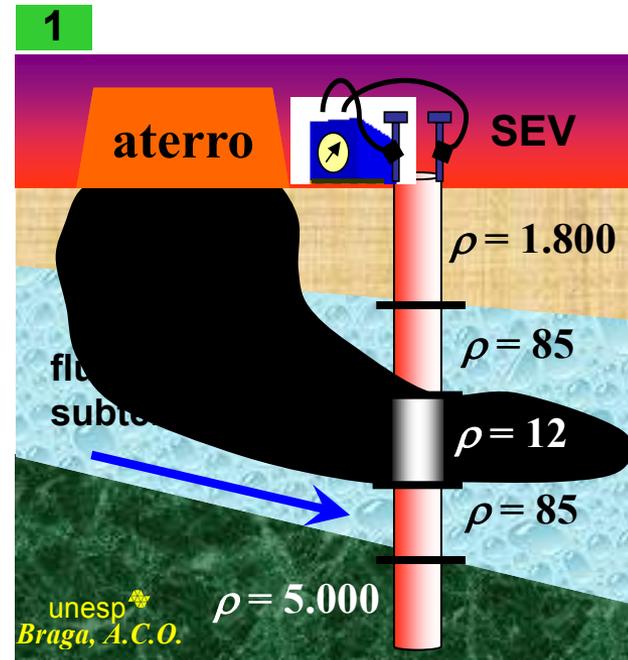
# LOCALIZAÇÃO DE TAMBORES ENTERRADOS



# LOCALIZAÇÃO DE TAMBORES ENTERRADOS



# LIXÕES E ATERROS SANITÁRIOS



CHORUME → condutivo eletricamente

Parâmetro	Faixa de Variação (mg/L)
K <sup>+</sup>	200-1000
Na <sup>+</sup>	200-1200
Ca <sup>2+</sup>	100-3000
Mg <sup>2+</sup>	100-1500
Cl <sup>-</sup>	300-3000
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	10-1000
Alcalinidade	500-10000
Fe (total)	1-1000
Mn	0,01-100
Cu	<10
Ni	0,01-1
Zn	0,1-100
Pb	<5
Hg	<0,2
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,1-10
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	10-1000
Carbono orgânico total dissolvido (COTD)	200-30000
Demanda química de oxigênio (DQO)	1000-90000
Sólidos totais dissolvidos (STD)	5000-40000
pH	4-8

**TDS = 20.000 mg/l**

$$\sigma = 0,15 \cdot \text{TDS}$$

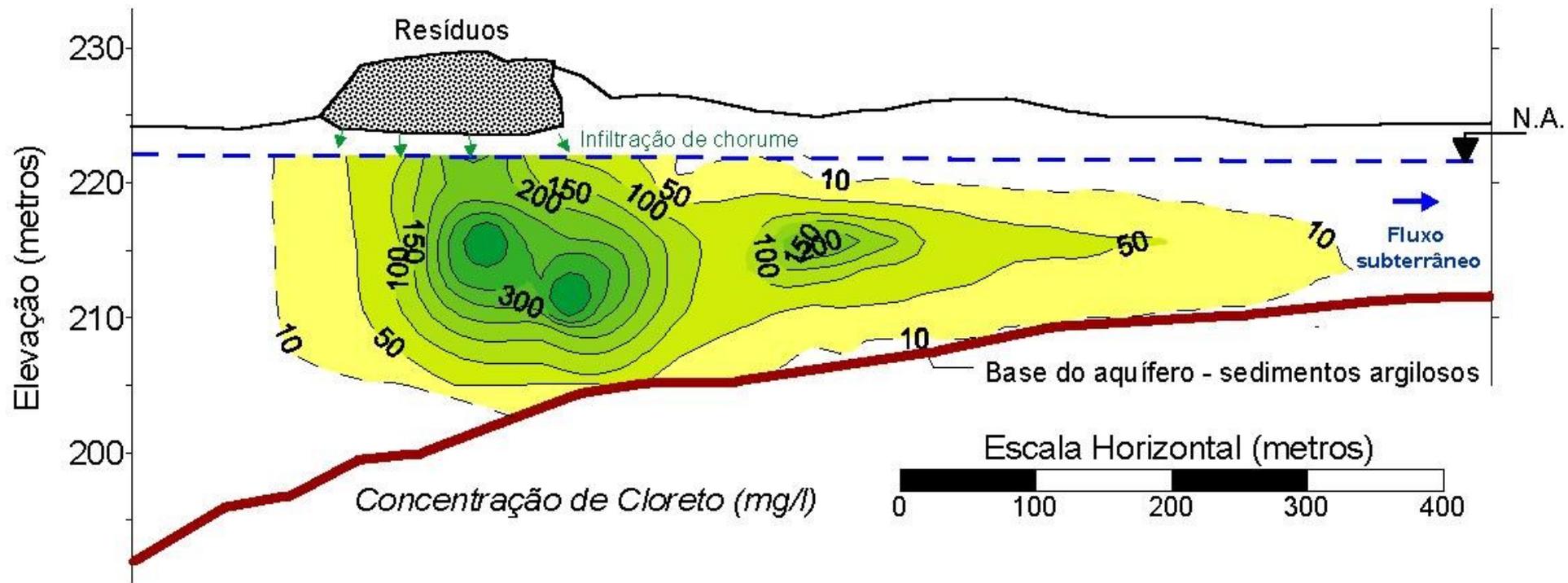
$$\Rightarrow \sigma = 3.000 \text{ mS/m}$$

(  $\rho \approx 0,3 \Omega.m$  )

**OBS: água do mar =  
0,2  $\Omega.m$**

**Tabela 6.1** - Faixas de variação dos teores de substâncias contaminantes dissolvidas no chorume de aterros sanitários (Freeze & Cherry, 1979; Griffin *et al.*, 1976; Leckie *et al.*, 1975).

# LIXÕES E ATERROS SANITÁRIOS



Typical ion mobility at 25°C is (McNeill 1980):

$$\text{H}^+ : 36.2 * 10^{-8}$$

$$\text{K}^+ : 7.6 * 10^{-8}$$

$$\text{SO}_4^- : 8.3 * 10^{-8}$$

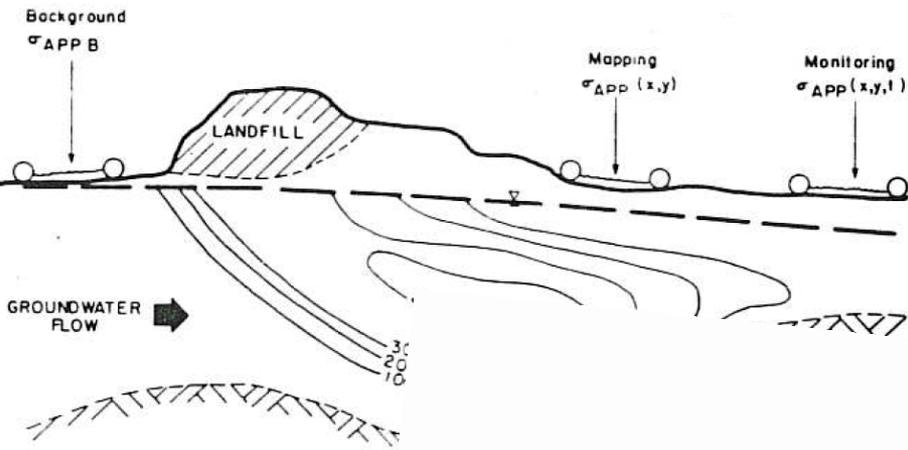
$$\text{NO}_3^- : 7.4 * 10^{-8}$$

$$\text{Na}^+ : 5.2 * 10^{-8}$$

$$\text{OH}^- : 20.5 * 10^{-8}$$

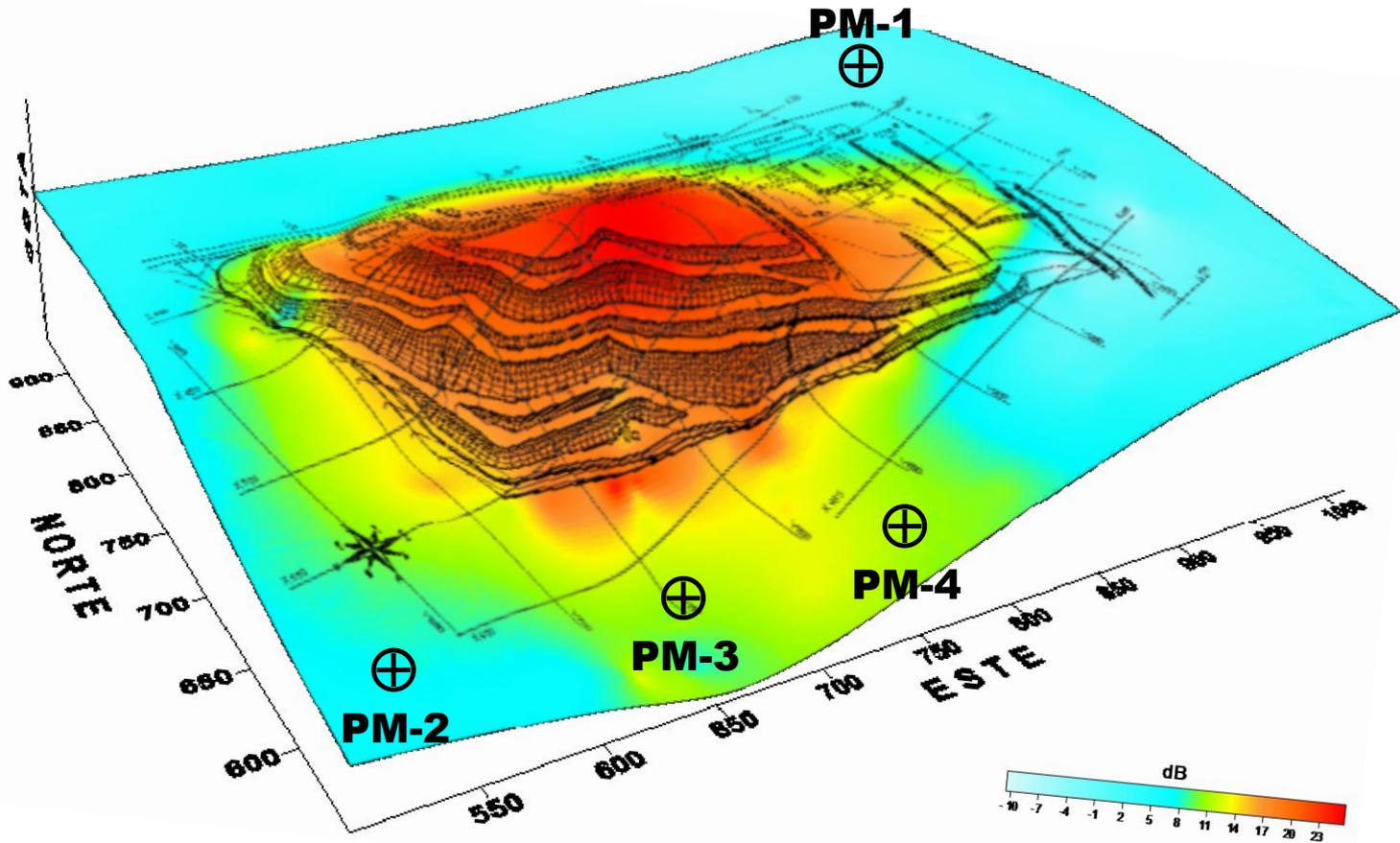
$$\rightarrow \text{Cl}^- : 0.9 * 10^{-8}$$

$$\text{HCO}_3^- : 4.6 * 10^{-8}$$



**Método: EM**

Fonte: Grenhouse, J.P.; Slaine, D.D. 1986.



# LIXÕES E ATERROS SANITÁRIOS

**Miracatu-SP**



# LIXÕES E ATERROS SANITÁRIOS

## Miracatu-SP



Norma Federal - Publicado no DO em 25 ago 1980

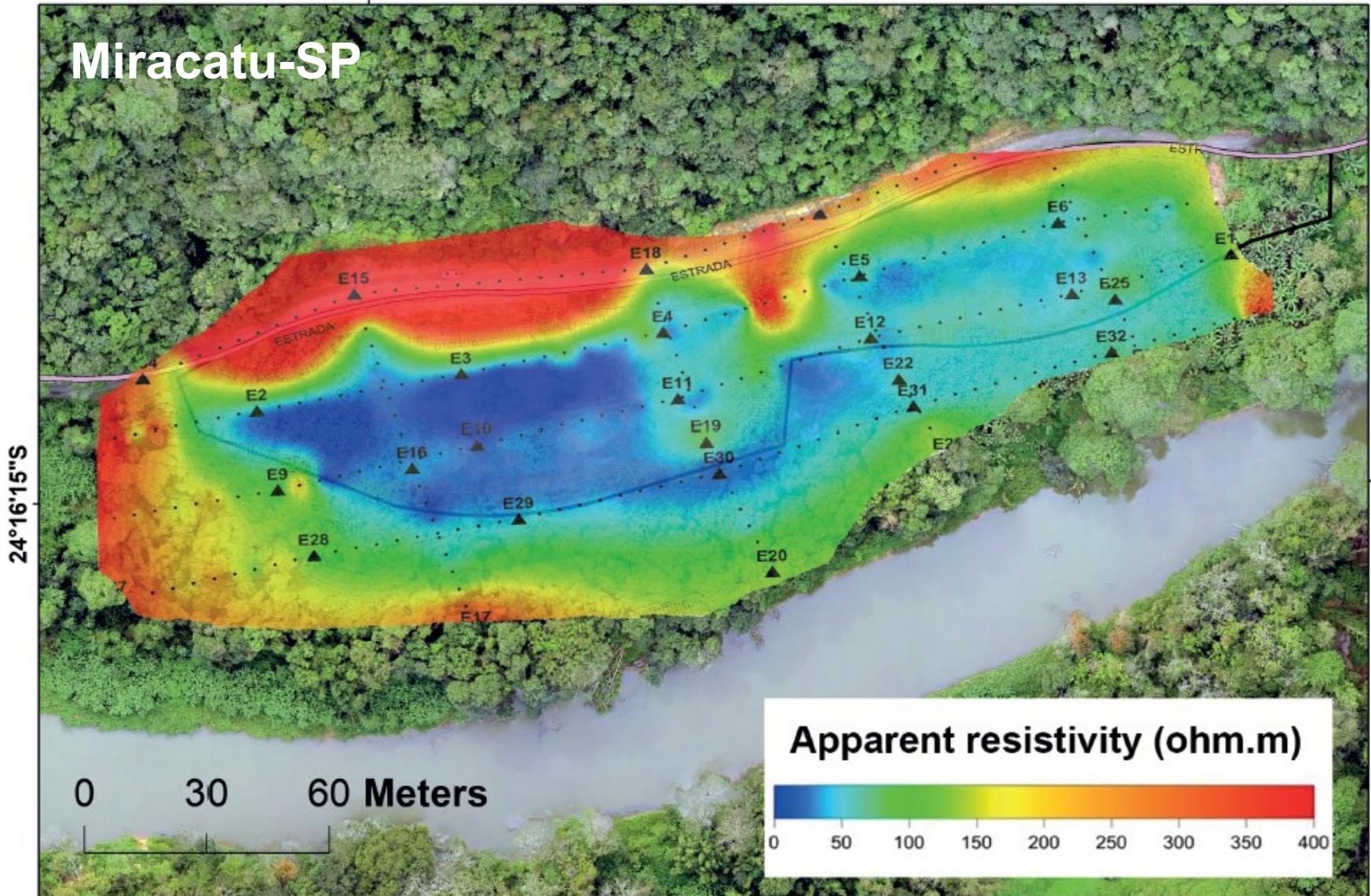
Estabelece normas para a localização de indústrias potencialmente poluidoras junto a coleções hídricas.

I - Quaisquer indústrias potencialmente poluidoras, bem como as construções ou estruturas que armazenam substâncias capazes de causar poluição hídrica, devem ficar localizadas a uma distância mínima de 200 (duzentos) metros das coleções hídricas ou cursos d'água mais próximos.

# LIXÕES E ATERROS SANITÁRIOS

47°28'20"W

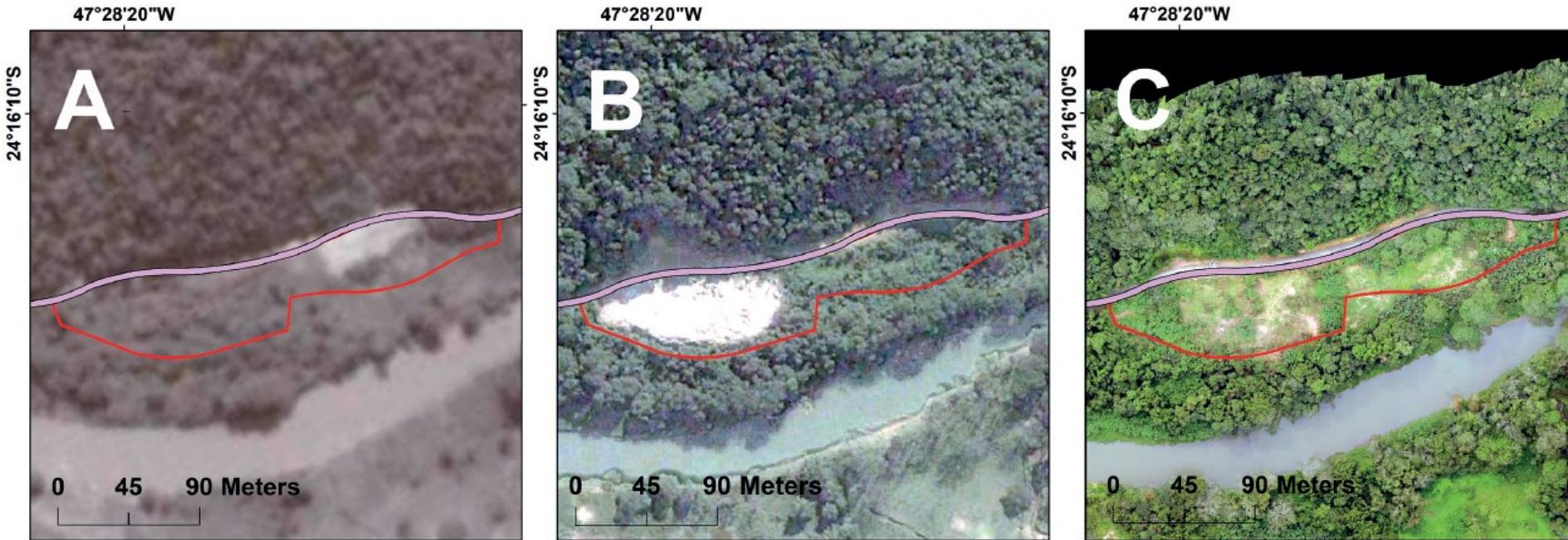
Miracatu-SP



**FIGURE 8:** Geophysical results in Miracatu dump expressed in scales of electrical resistivity in the subsoil.

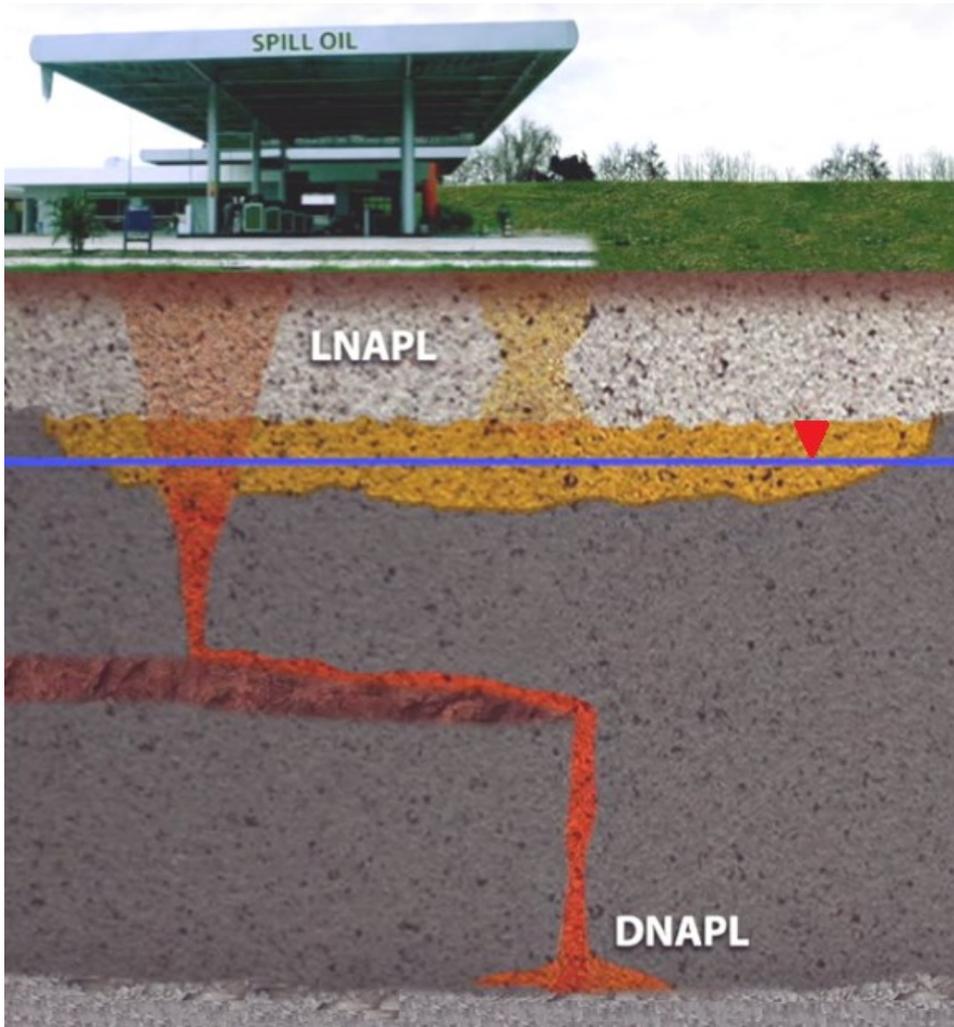
# LIXÕES E ATERROS SANITÁRIOS

## Miracatu-SP



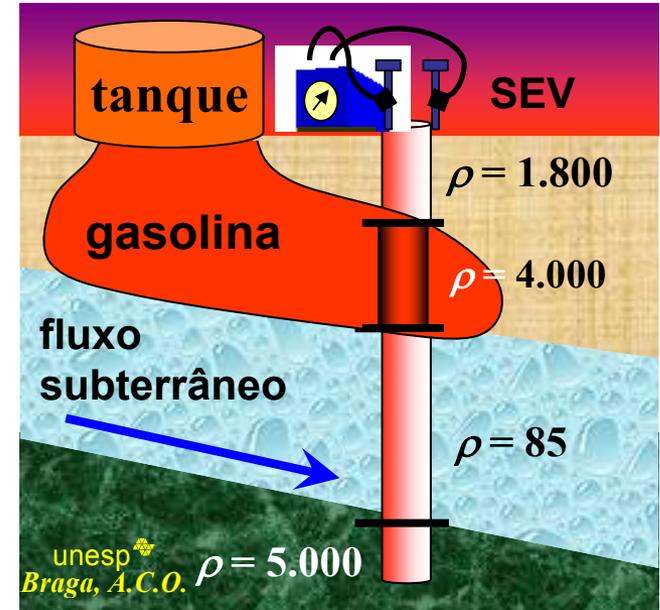
**FIGURE 7:** Historical analysis of Miracatu dump in 1991 (A), 2006 (B) and 2018 (C).

# CONTAMINAÇÃO POR COMPOSTOS ORGÂNICOS (HIDROCARBONETOS)



Fonte: HIDROPLAN

2



Hidrocarbonetos  
 $\Rightarrow$  alta resistividade elétrica

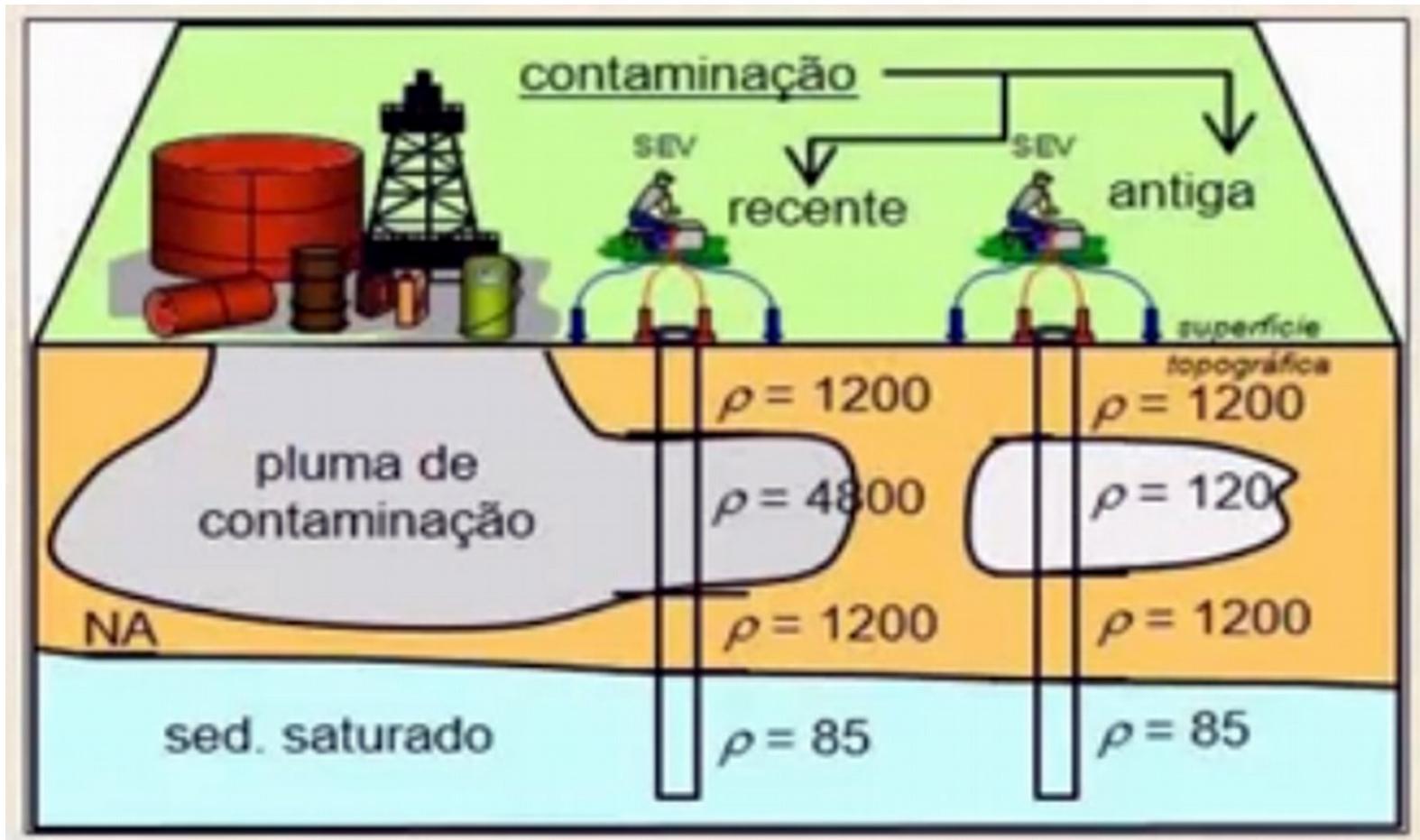
Resistividade  
Elétrica ( $\rho$ )

**GASOLINA  
DE AVIAÇÃO**

**$10^6 \Omega m$**

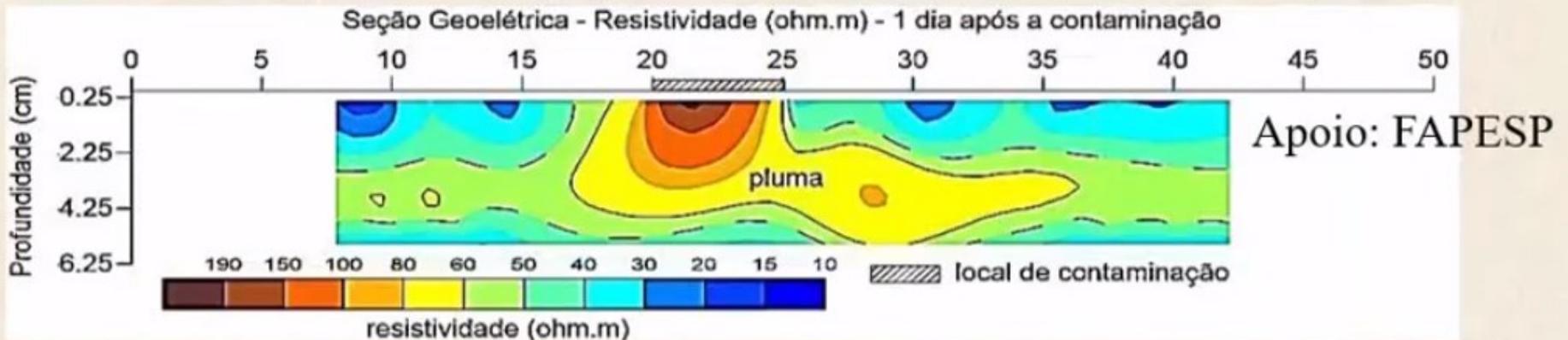
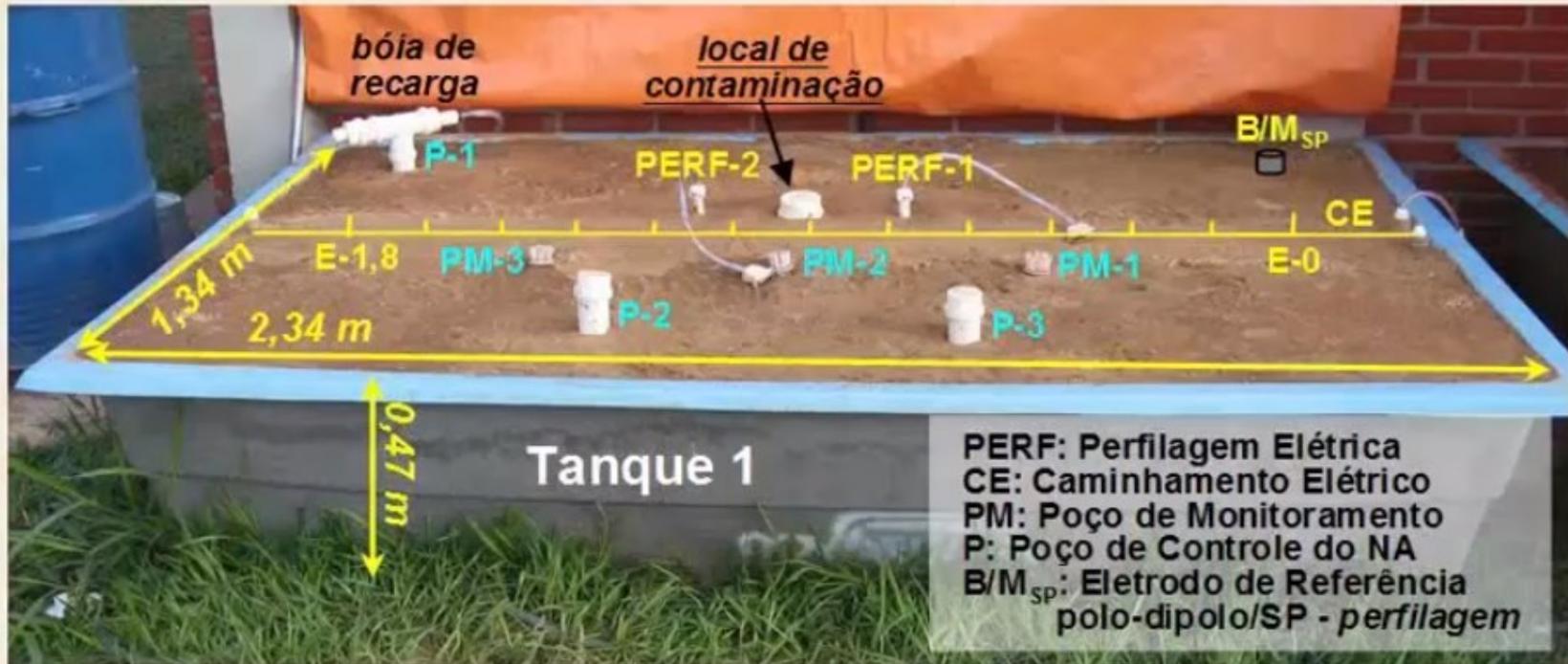
## CONTAMINAÇÃO POR COMPOSTOS ORGÂNICOS (HIDROCARBONETOS)

Observa-se que ao longo do tempo ocorre o surgimento de anomalias de **condutividade elétrica** em áreas contaminadas por hidrocarbonetos, devido a efeitos de biodegradação



# CONTAMINAÇÃO POR COMPOSTOS ORGÂNICOS (HIDROCARBONETOS)

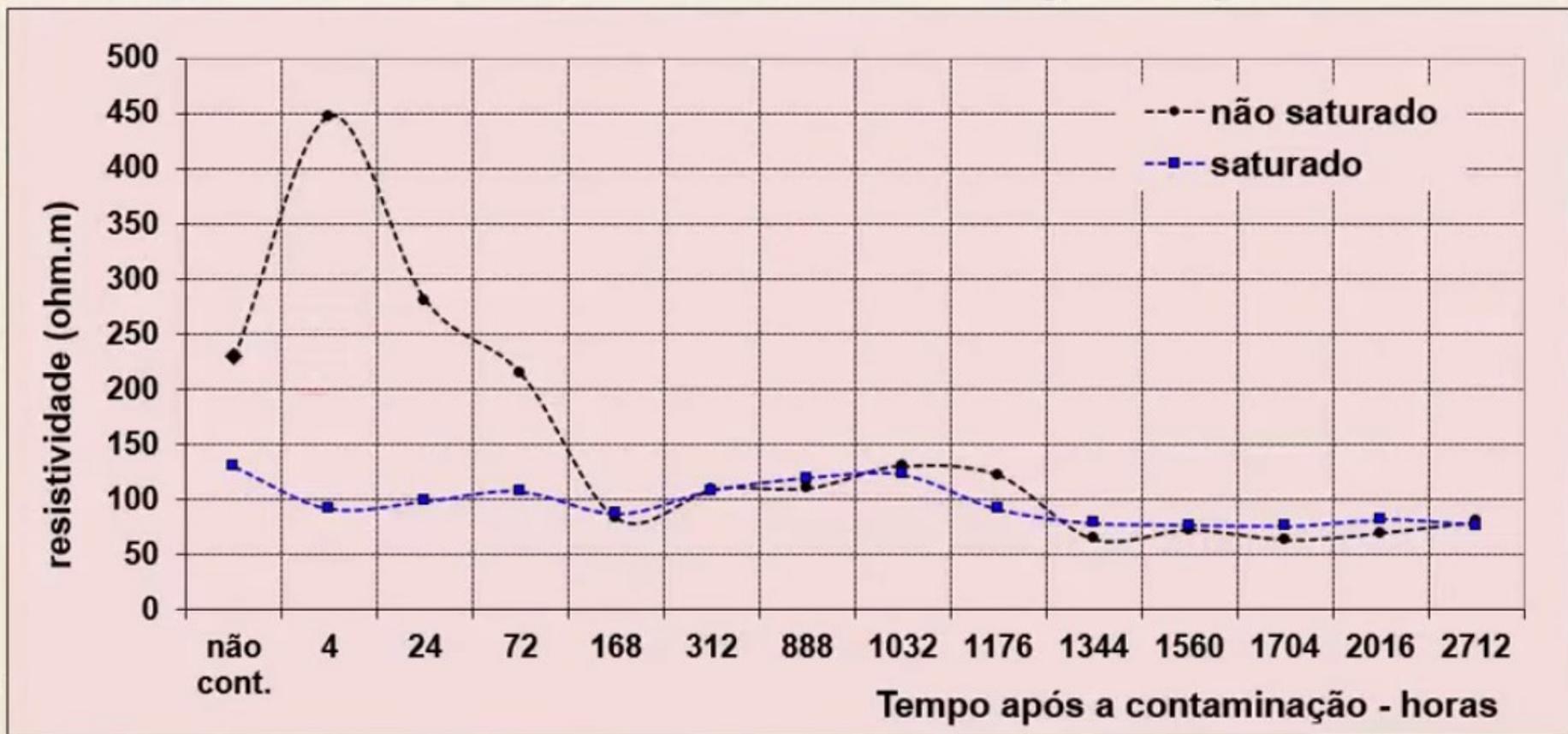
## Vazamento de Gasolina – Controlado – CE/PERF



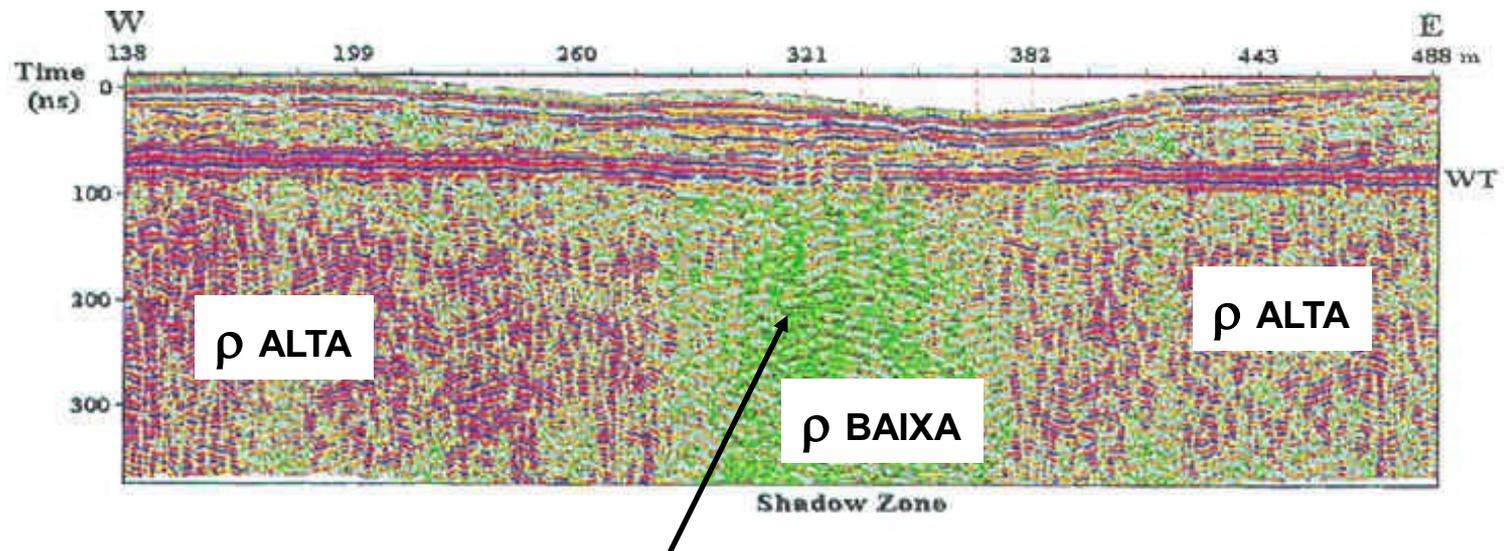
# Vazamento de Gasolina - Controlado

❖ Método da Eletrorresistividade

❖ Técnica do Caminhamento Elétrico – Dipolo-Dipolo

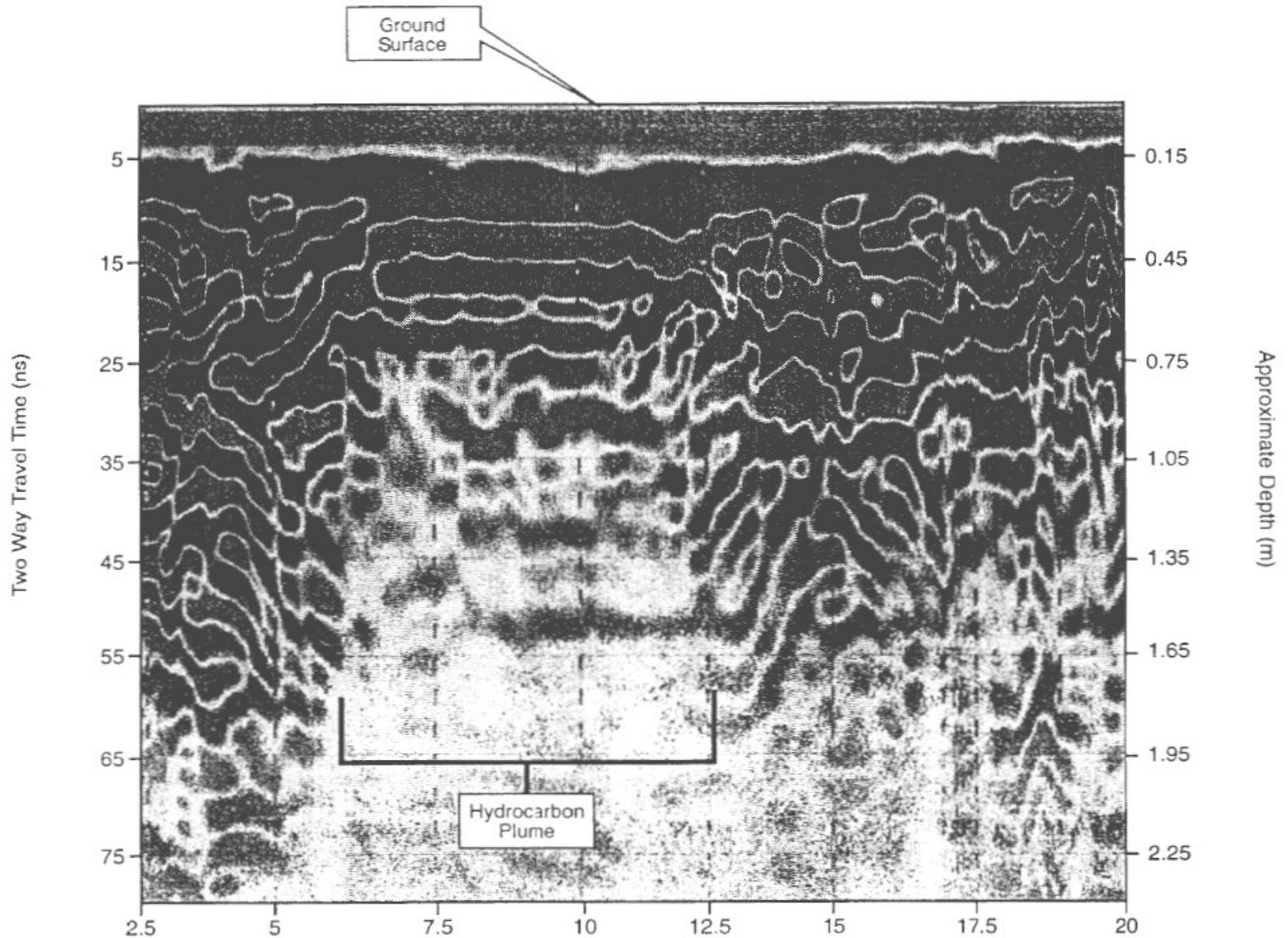


Em locais com alta condutividade elétrica ( $\sigma$ ) ou baixa resistividade elétrica ( $\rho$ ) a onda eletromagnética do GPR é fortemente atenuada

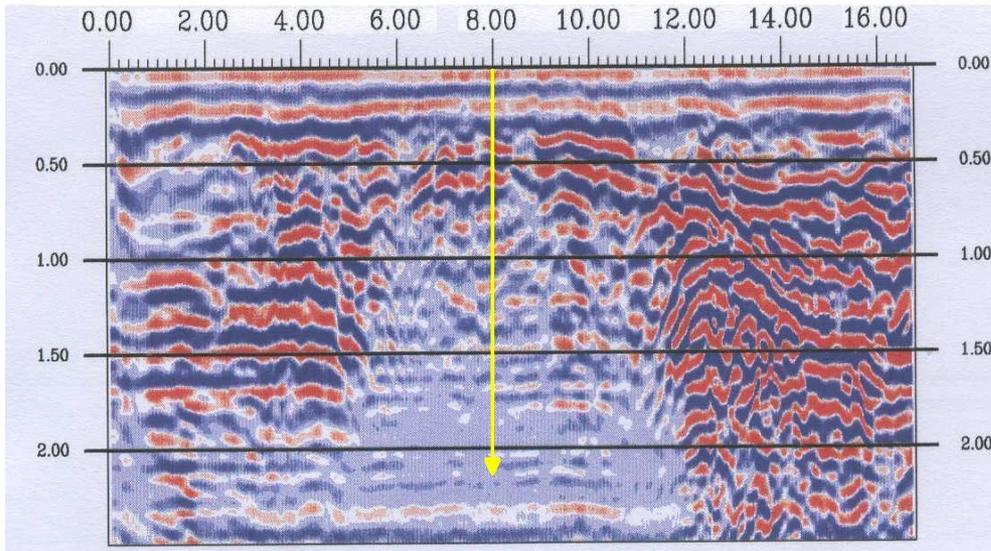


ANOMALIA DE CONDUTIVIDADE ASSOCIADA À UMA PLUMA DE CONTAMINAÇÃO CONDUTIVA

# CONTAMINAÇÃO POR COMPOSTOS ORGÂNICOS (HIDROCARBONETOS)



# CONTAMINAÇÃO POR COMPOSTOS ORGÂNICOS (HIDROCARBONETOS)



Concentrações de TPH (*Total Petroleum Hydrocarbons*) :

Matriz Água : 286 mg/l (Valor I: 0,6 mg/l, Norma Holandesa)  
⇒ Superior a 470 vezes o padrão estabelecido para I (intervenção)

Matriz Solo : 88 mg/Kg (Valor S: 50 mg/Kg, Norma Holandesa)  
⇒ quase 2 vezes o Valor S (referência)



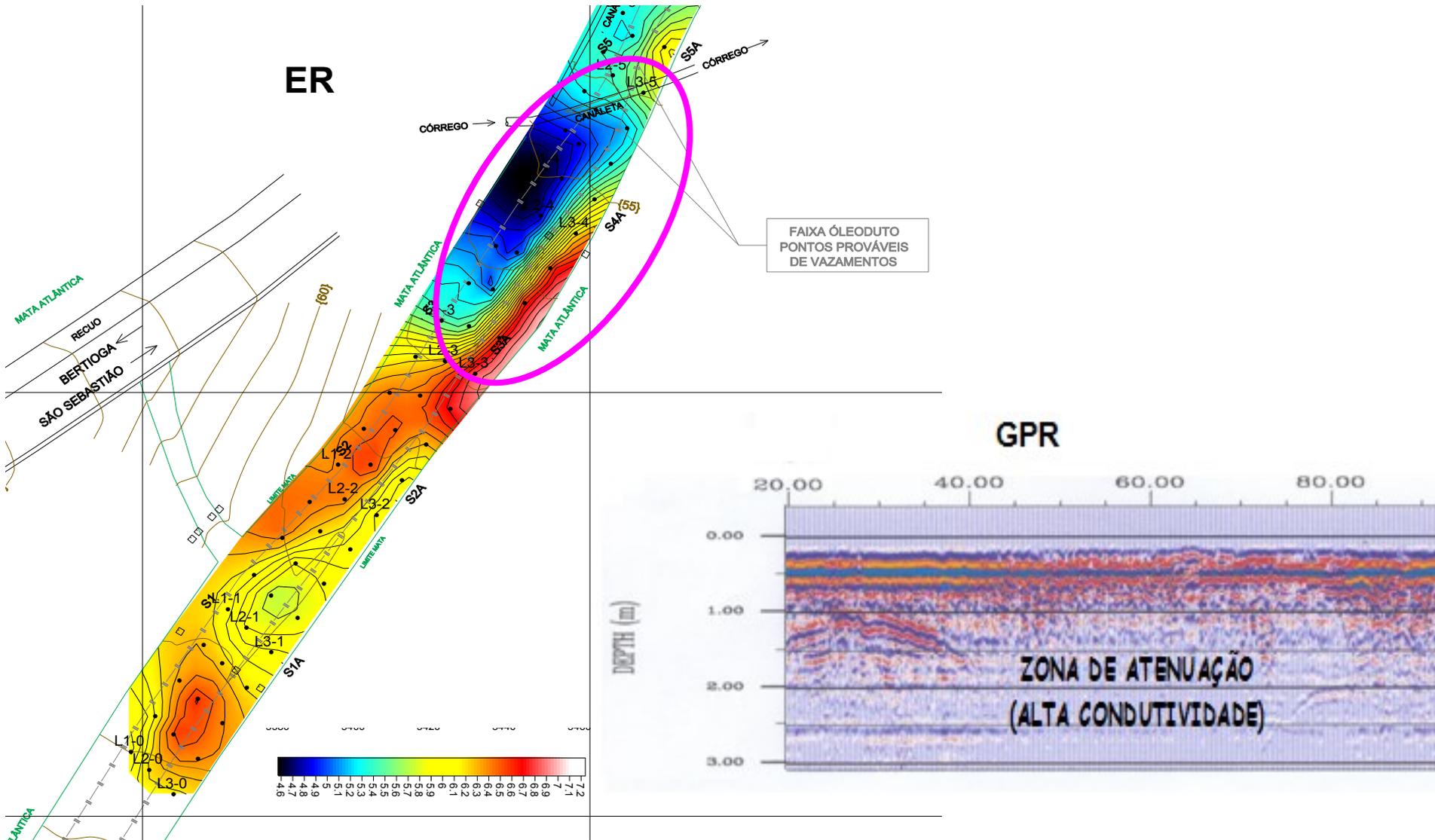
# CONTAMINAÇÃO POR COMPOSTOS ORGÂNICOS (HIDROCARBONETOS)

Local: Faixa de duto próximo a Guaecá, São Sebastião-SP



# CONTAMINAÇÃO POR COMPOSTOS ORGÂNICOS (HIDROCARBONETOS)

Local: Faixa de duto próximo a Guaecá, São Sebastião-SP



## UTILIZAÇÃO DA GEOFÍSICA NA REMEDIAÇÃO DE UMA ÁREA

- No Brasil, os levantamentos geofísicos são utilizados no diagnóstico de áreas contaminadas
- Porém, ainda não são muito utilizados na etapa de remediação destas áreas

Remediação → a área deve ser monitorada

### **"Time-lapse" ou 4D**

→ dados geofísicos adquiridos no mesmo local e no decorrer do tempo (3D + dimensão de tempo = 4D)

Geofísica 4D / Monitoramento geofísico



# **Estudo GPR 4D de um Derrame de Óleo Isolante em Laboratório: Resultados Preliminares**

Luciana Bertolla <sup>1</sup>, Jorge Luís Porsani <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pós-Graduação em Geofísica (IAG/USP). E-mail: [bertolla@iag.usp.br](mailto:bertolla@iag.usp.br)

<sup>2</sup> Universidade de São Paulo. Departamento de Geofísica (IAG/USP). E-mail: [porsani@iag.usp.br](mailto:porsani@iag.usp.br)



ELSEVIER

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SCIENCE @ DIRECT®

Journal of Applied Geophysics 54 (2003) 127–144

JOURNAL OF  
APPLIED  
GEOPHYSICS

[www.elsevier.com/locate/jappgeo](http://www.elsevier.com/locate/jappgeo)

## 4-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: a case history

David Lopes de Castro\*, Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco

Laboratório de Geofísica-Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará Campus Universitário do Pici, Bloco 913 60455-760, Fortaleza-CE, Brazil

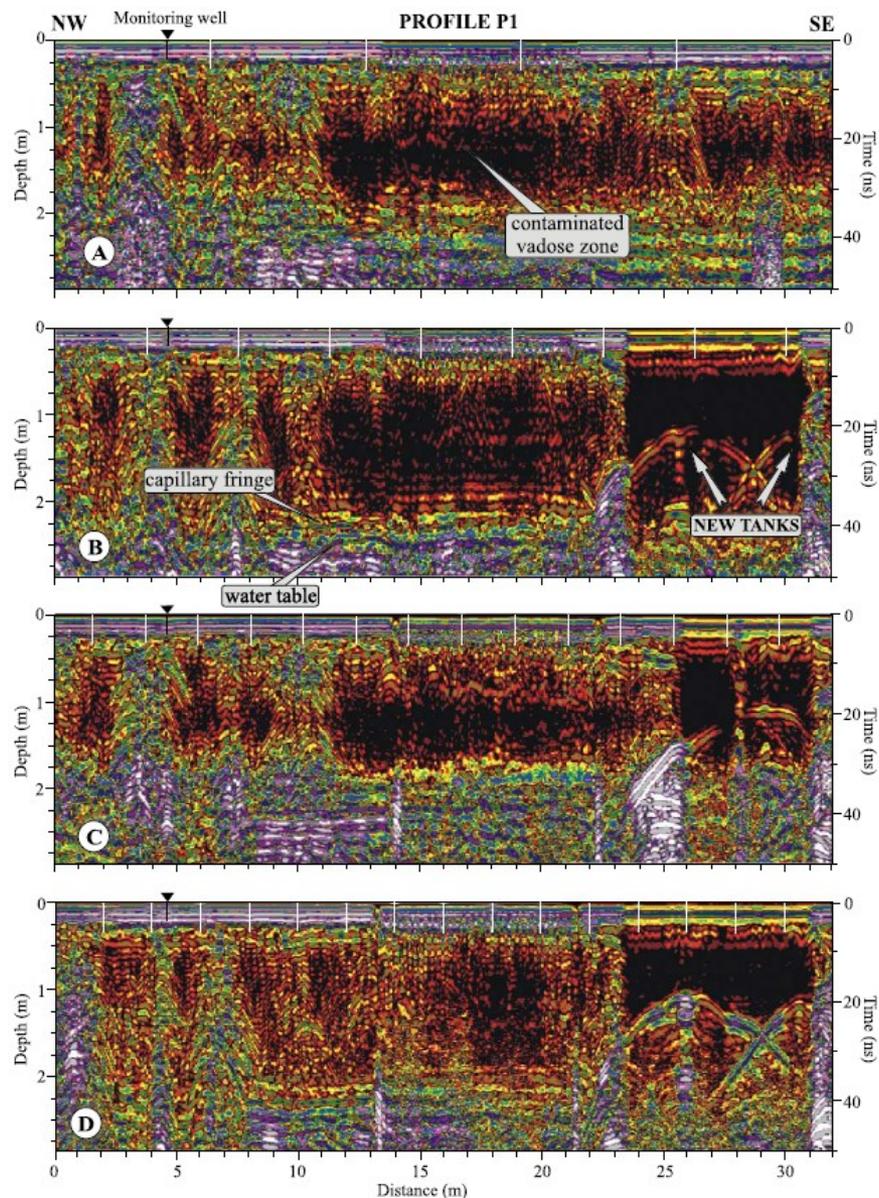
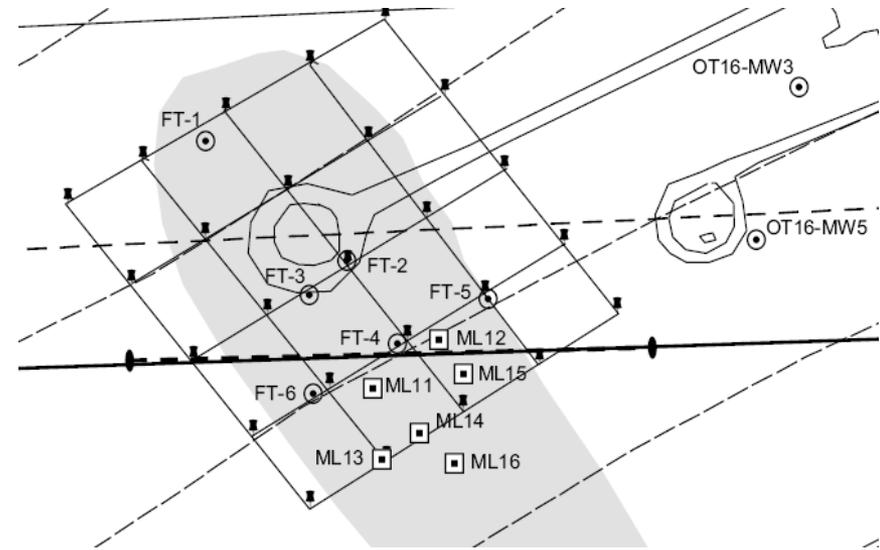


Fig. 8. GPR sections at profile P1 show changes in the electromagnetic signal during the remediation process. Antenna frequency is centered in 400 MHz. (A) January 2001, (B) May 2001, (C) September 2001, and (D) March 2002. Vertical scale exaggeration = 3.5.

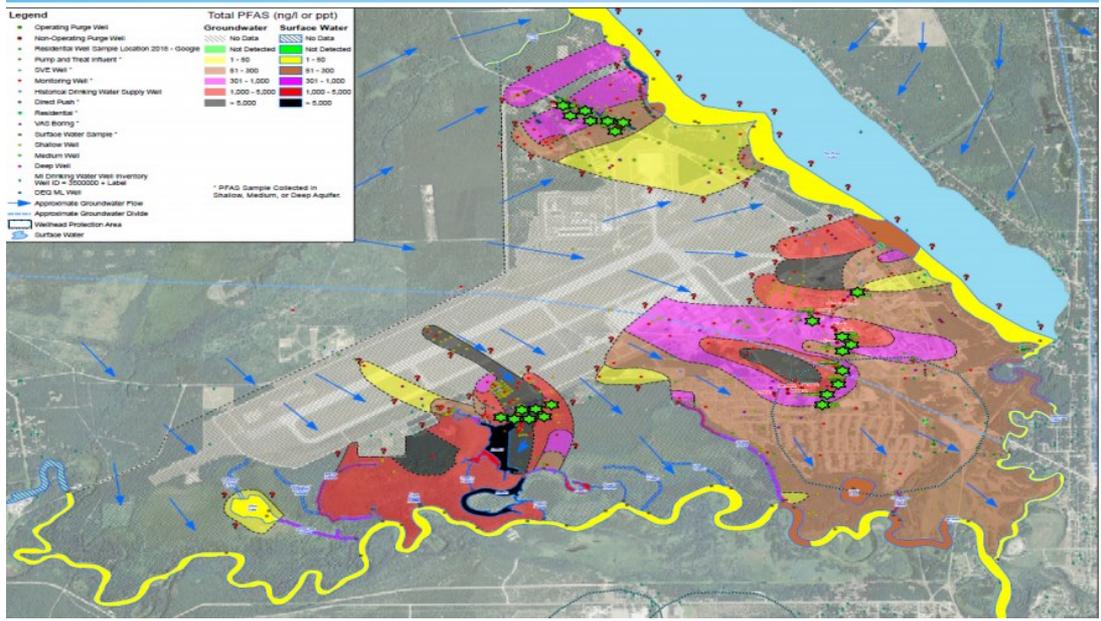
# Fire Training Area 2 FT-02 Wurtsmith Air Force Base (decommissioned) Oscoda, Michigan, U.S.A..



Wurtsmith Air Force Base. Image: Wikimedia Commons.



## Approximate Extent of PFC Groundwater Contamination



Fire Training Pad - Site FT02

## Case History

### Temporal geophysical signatures from contaminant-mass remediation

Vukenkeng Che-Alota<sup>1</sup>, Estella A. Atekwana<sup>1</sup>, Eliot A. Atekwana<sup>1</sup>, William A. Sauck<sup>2</sup>, and D. Dale Werkema Jr.<sup>3</sup>

#### Geophysical response to remediation

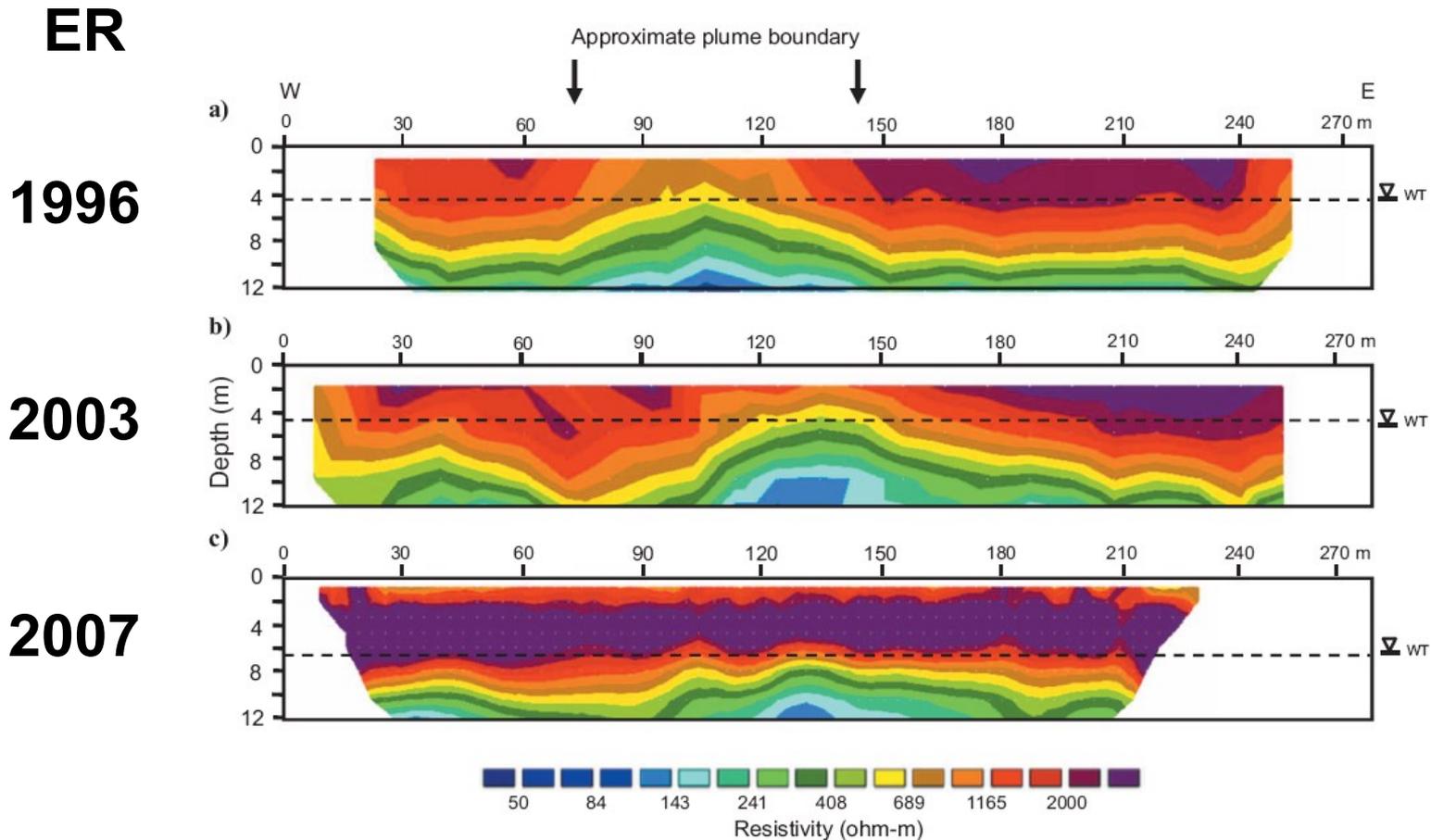
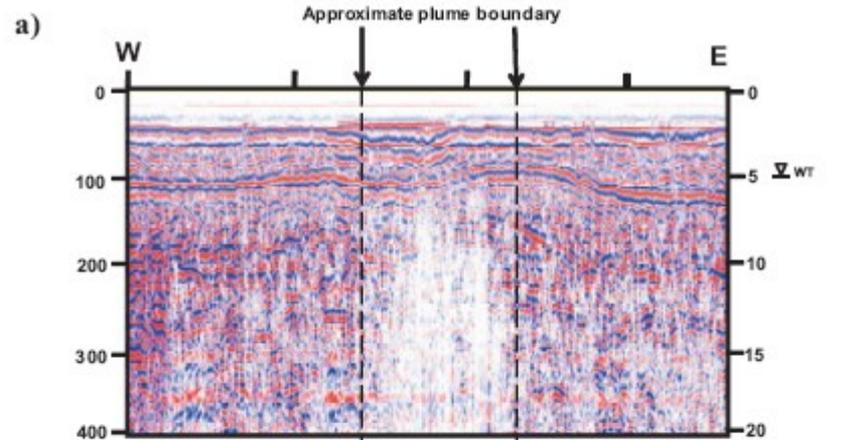


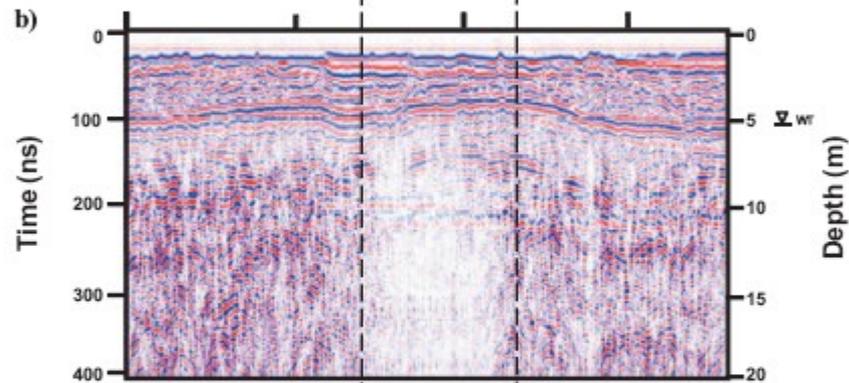
Figure 3. Inverted dipole-dipole resistivity profiles along the contaminant plume for (a) 1996, (b) 2003, and (c) 2007, respectively. Arrows indicate the approximate lateral extent of the contaminant plume. Note the change in conductivity in the contaminant plume over time.

# GPR

1996



2003



2007

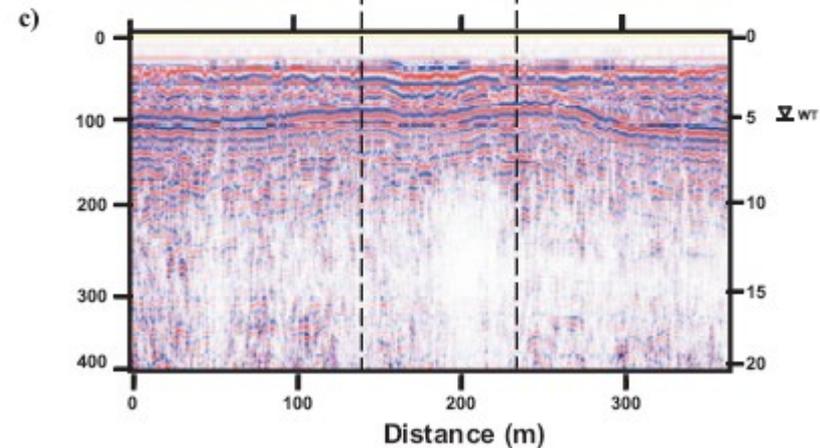
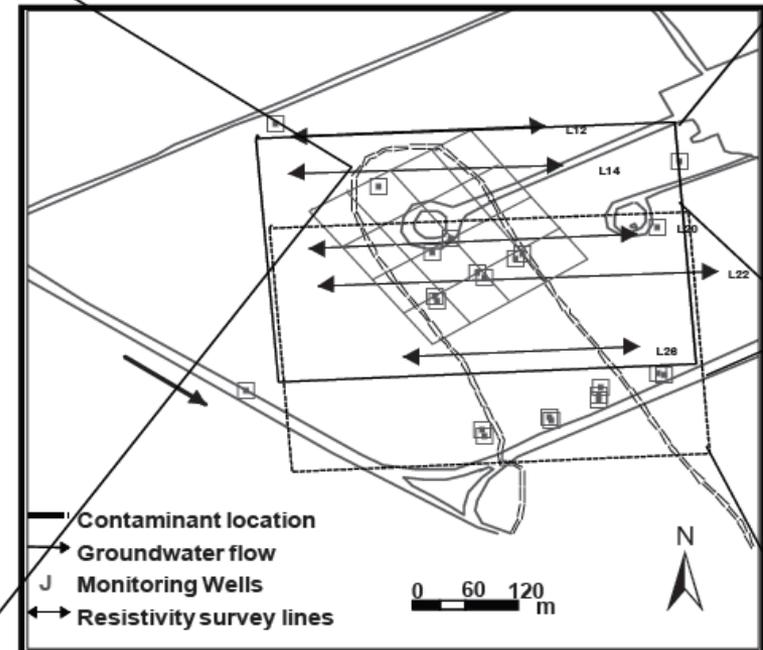
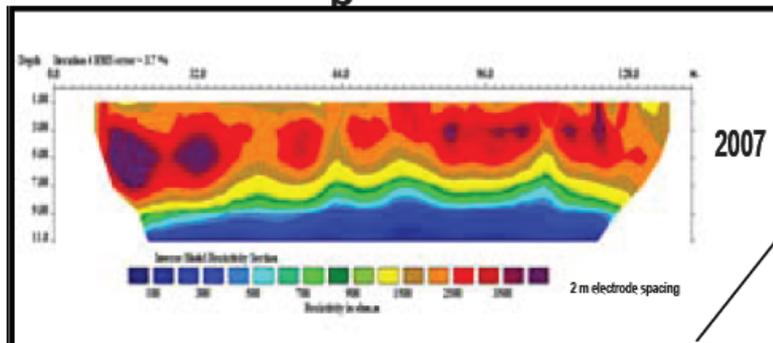
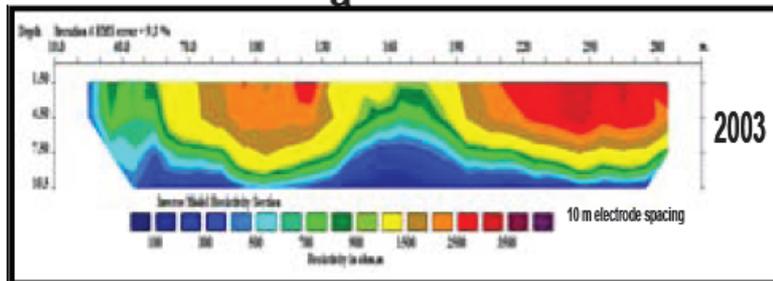
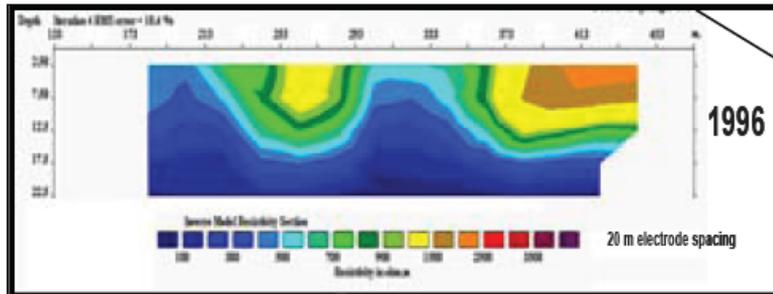
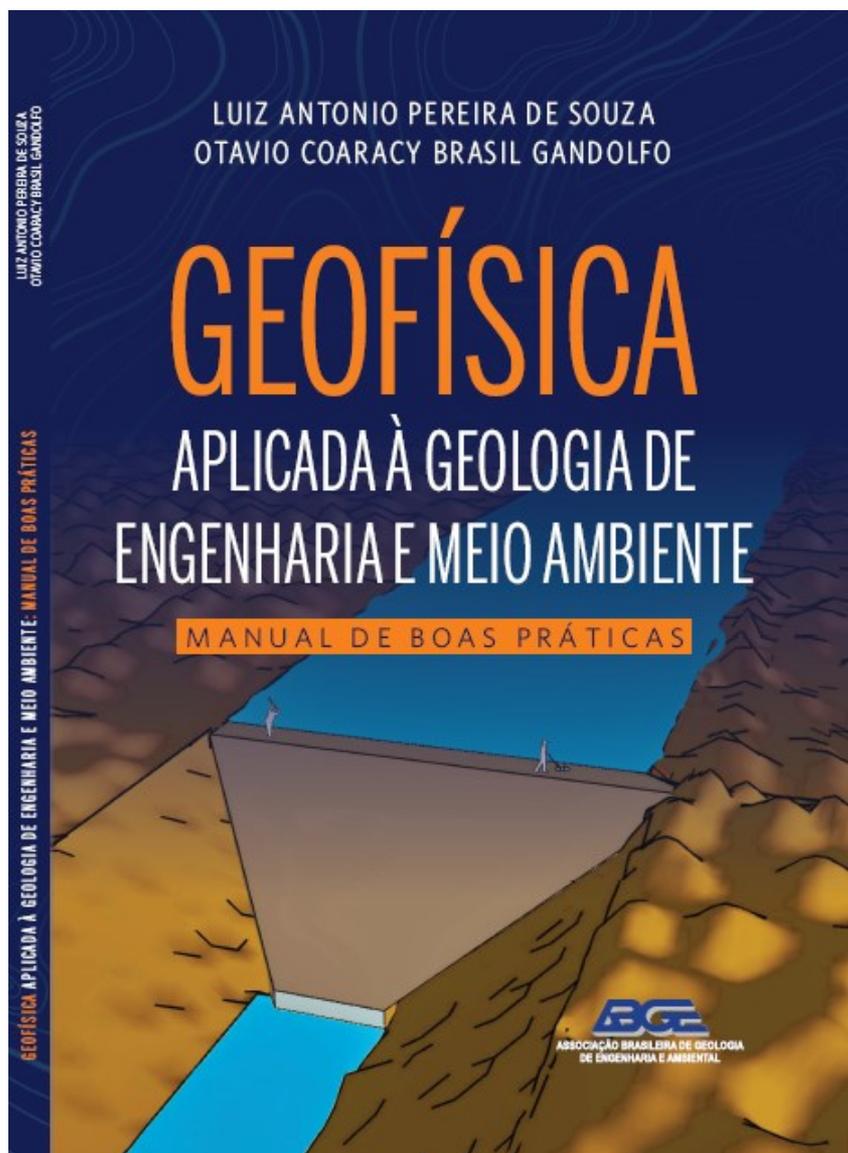


Figure 5. GPR profile over FT-02 contaminant plume measured in (a) 1996, (b) 2003, and (c) 2007. Arrows indicate the approximate lateral extent of the contaminant plume. Note the change in water-table reflectors around 100 ns and the change in depth of the shadow zone in the contaminant plume over time.

# Geophysical and geochemical attenuated signatures associated with hydrocarbon contaminated site undergoing bioremediation

Vukenkeng Che-Alota\*, Estella Atekwana and Eliot Atekwana, Oklahoma State University, William A. Sauck and Silvia Rossbach, Western Michigan University, Caroline Davis, University of Missouri Rolla, Jay Nolan and Lee Slater, Rutgers University, Dale Werkema, U.S. EPA, ORD, NERL, ESD, CMB, Las Vegas, Nevada





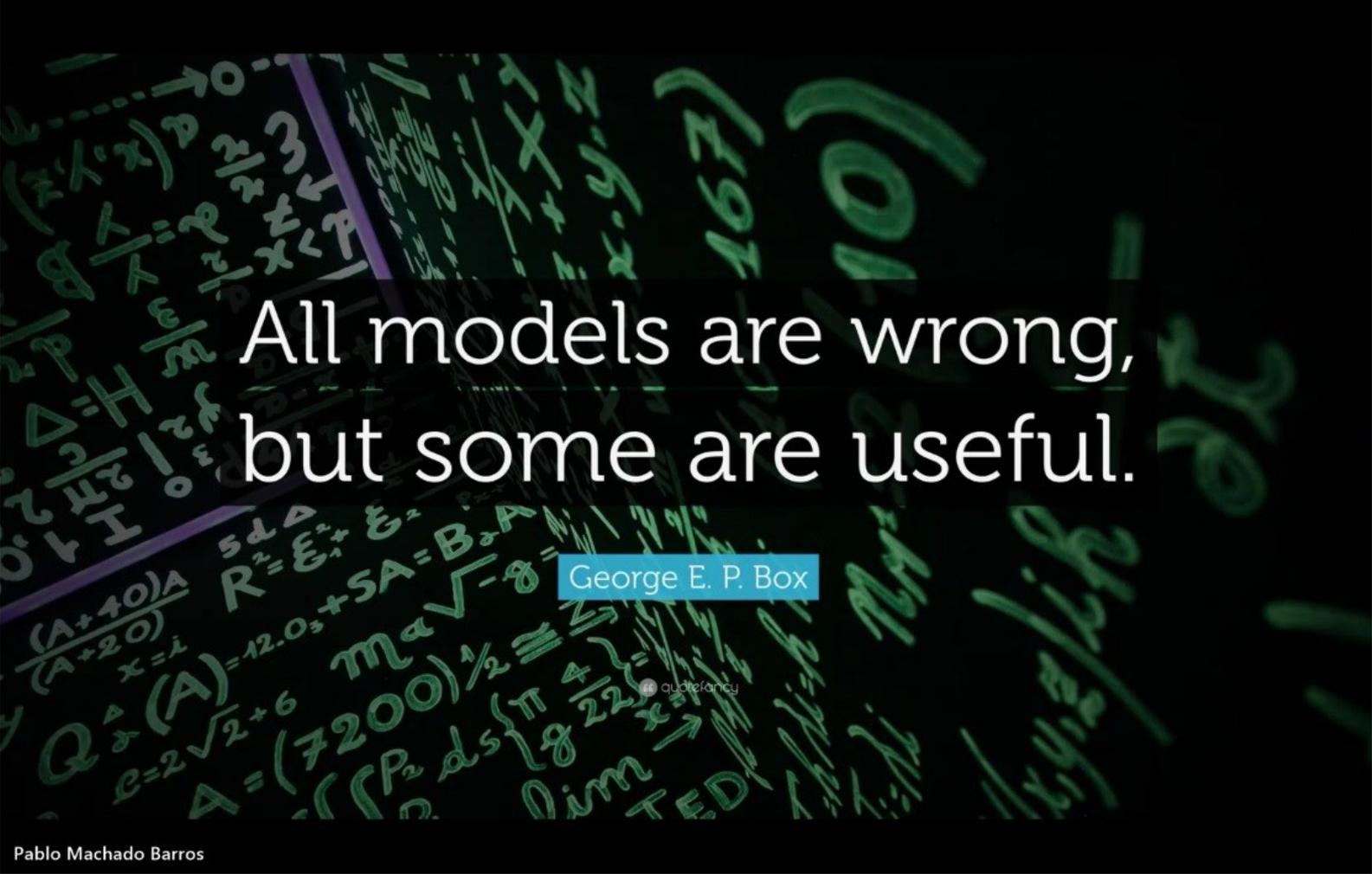


APLICAÇÕES	MÉTODOS SÍSMICOS						MÉTODOS ELÉTRICOS				MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS			MÉTODOS POTENCIAIS		PERFILAGEM
	REFRA	REFLEX	SW	CH	DH	TOMO	CE/Im	SEV	SP	IP	GPR	FDEM	TDEM	MAG	GRAV	PERF
<b>Contaminantes e fontes de contaminação</b>																
Identificação e mapeamento de plumas de contaminantes inorgânicos							A			B	A	A	B			
Identificação e mapeamento de plumas de contaminantes orgânicos							B			B	A	B				
Delimitação de valas, cavas, trincheiras e aterros							A			B	A	B				
Identificação de salinidade nos solos							B			B	B	A	B			

**A** primeira escolha (método preferencial);

**B** segunda escolha (método alternativo);

o método não é recomendado ou é aplicável em situações muito particulares e, neste caso, a possibilidade de sua utilização deve ser discutida com o geofísico executor do trabalho.



All models are wrong,  
but some are useful.

George E. P. Box

Pablo Machado Barros