

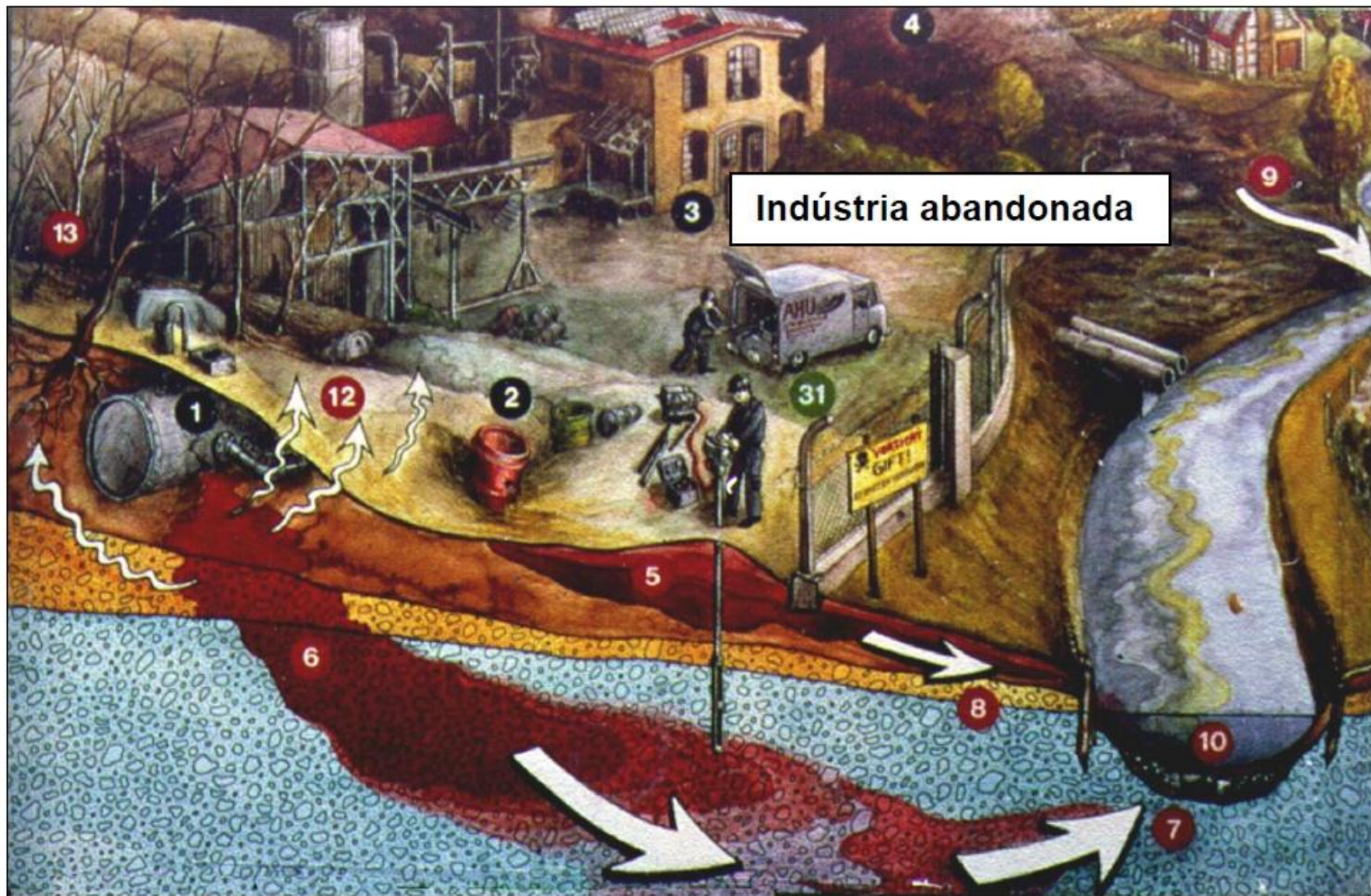
Métodos geofísicos aplicados no diagnóstico e remediação de áreas contaminadas

Otávio Coaracy Brasil Gandolfo (IPT)

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



Fonte: AHU, Consultoria em Hidrogeologia e Meio Ambiente, Alemanha, 1987



Pluma de contaminação?
Passivo ambiental?



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

**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

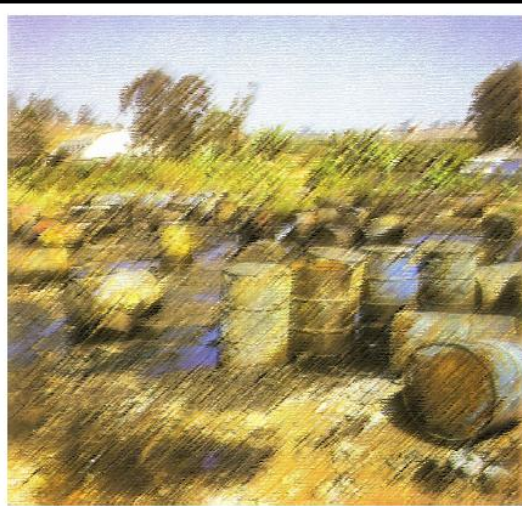
ISBN 978-85-07-02687-7



**ASSOCIAÇÃO
BRASILEIRA
DE NORMAS
TÉCNICAS**

Número de referência
ABNT NBR 15935:2011
22 páginas

© ABNT 2011



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

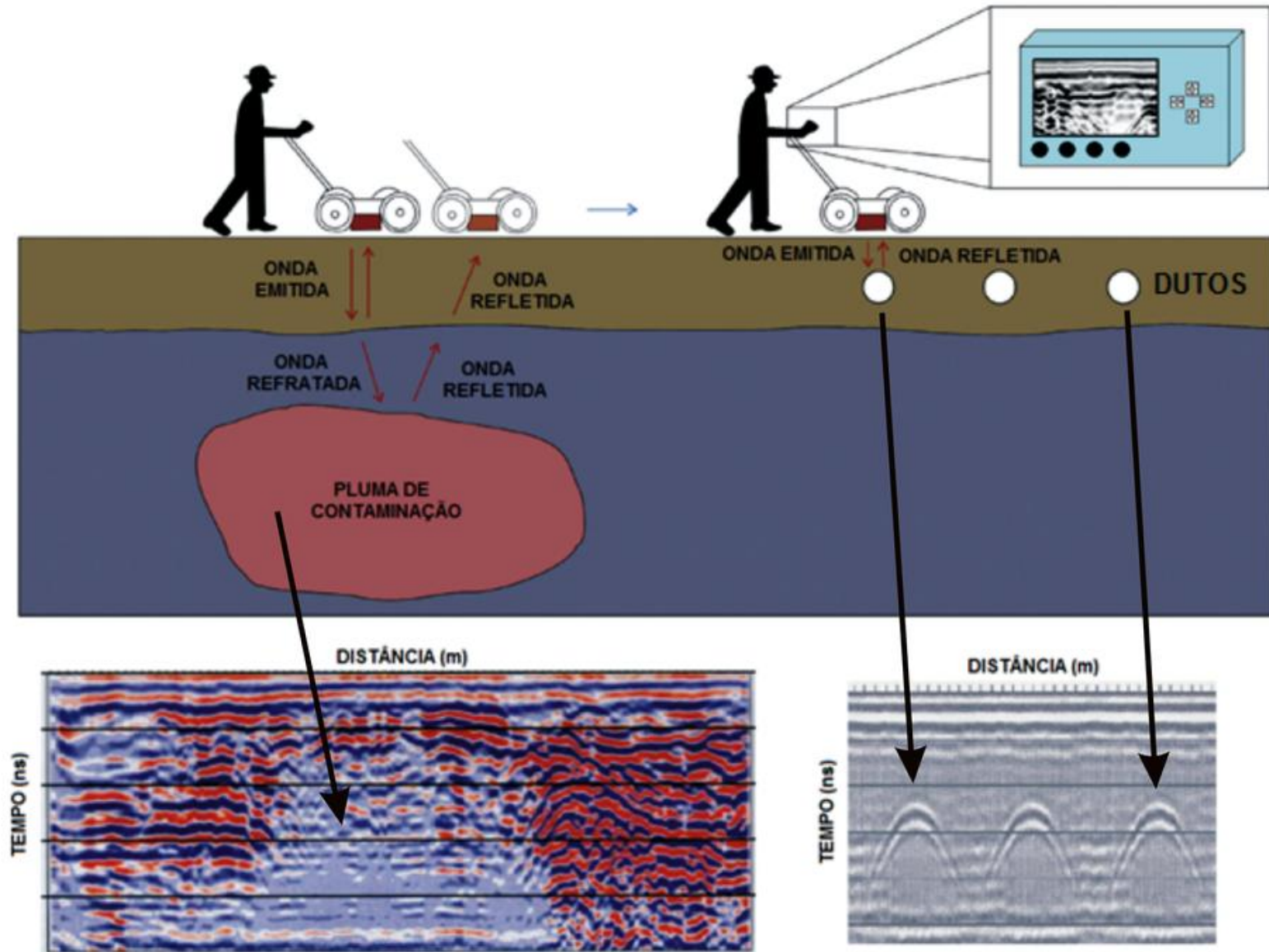
Existe uma variedade de métodos geofísicos que podem ser utilizados nos estudos ambientais, porém os principais e mais adequados métodos, que comumente são aplicados à investigação da contaminação do solo e da água subterrânea, são o geo-radar (GPR), o eletromagnético indutivo (EM), a eletrorresistividade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

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

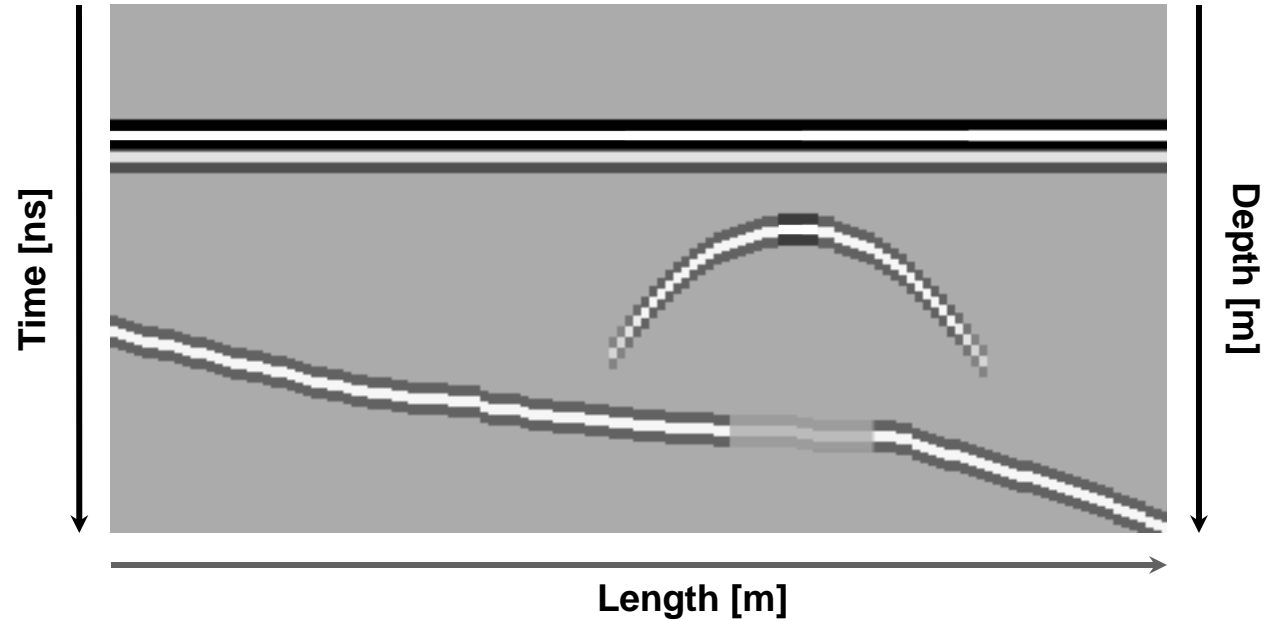
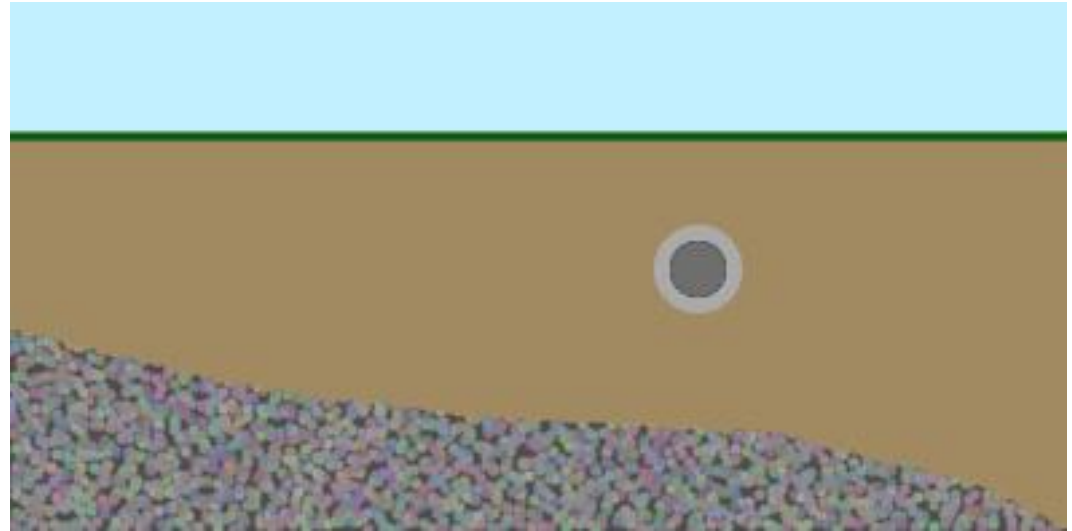
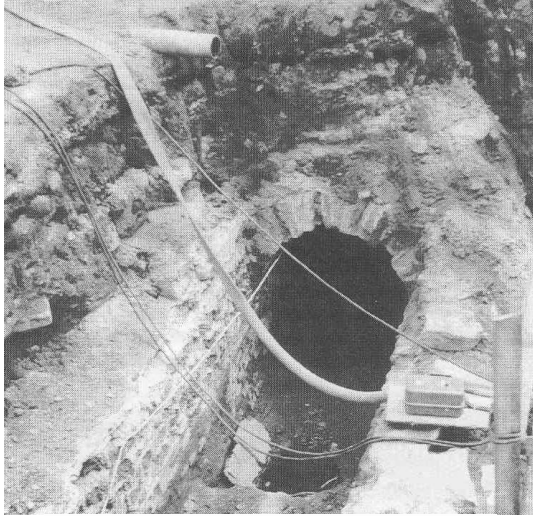
- Na etapa de investigação confirmatória, as técnicas geofísicas são utilizadas para localizar os pontos de amostragem mais adequados, através da determinação de anomalias que representam os locais com maiores concentrações de contaminantes (hot spots);
- Quando da investigação detalhada e investigação 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>Agência</i>	<i>Município</i>	<i>Total</i>	<i>contaminada sob investigação</i>	<i>contaminada com risco confirmado</i>	<i>em processo de remediação</i>	<i>em processo de monitoramento para encerramento</i>	<i>contaminada em processo de reutilização</i>	<i>reabilitada para o uso declarado</i>
		2						2
	<i>VOTUPORANGA</i>	8		1	3	3		1
	<i>Total</i>	32	4	5	4	10		9
<i>Total</i>		6.285	652	828	1.429	1.375		226 1.775

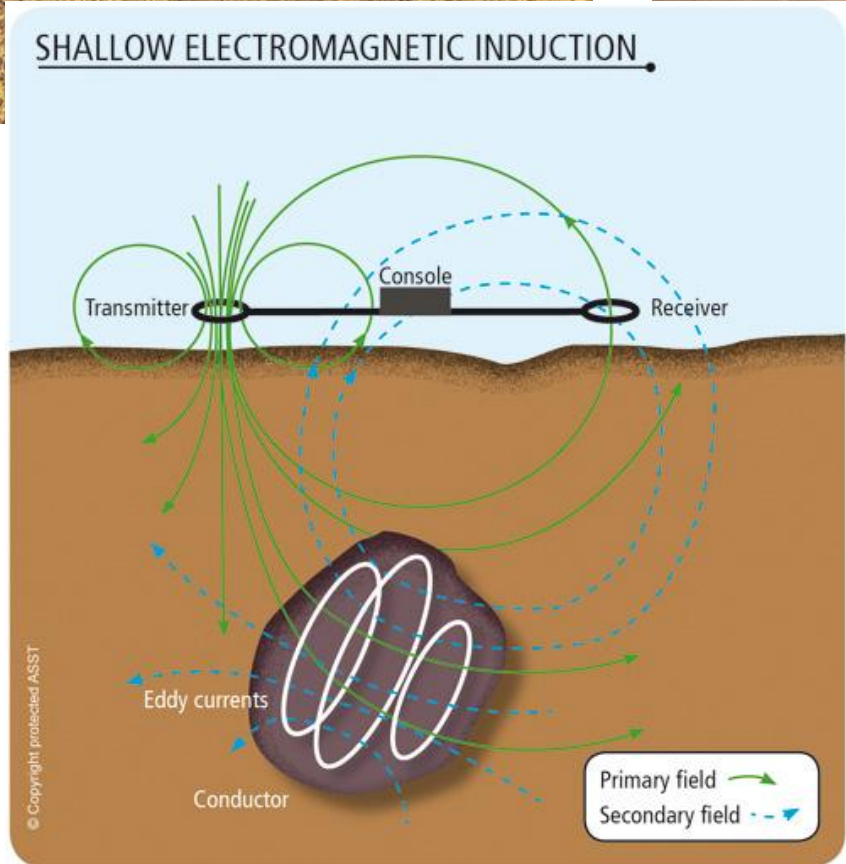
I) Georadar (GPR-Ground Penetrating Radar)



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



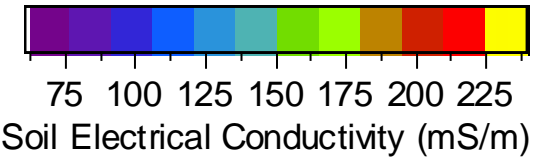
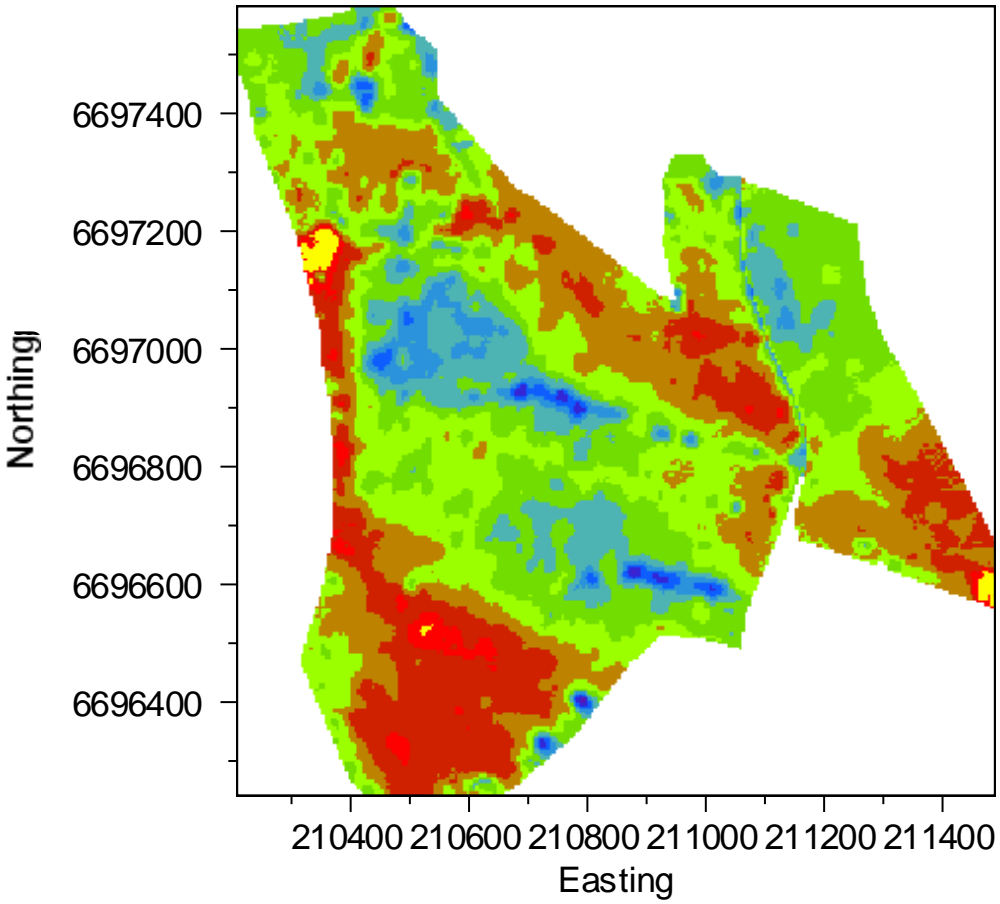
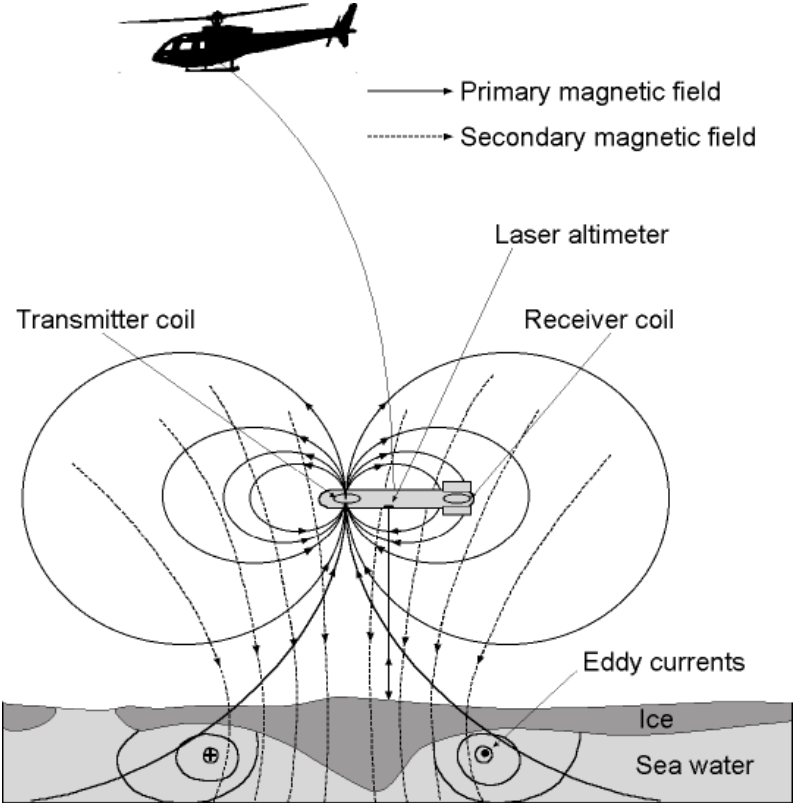
II) Eletromagnético (EM)



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

H_P = campo primário
 H_S = campo secundário

II) Eletromagnético (EM)



II) Eletromagnético (EM)

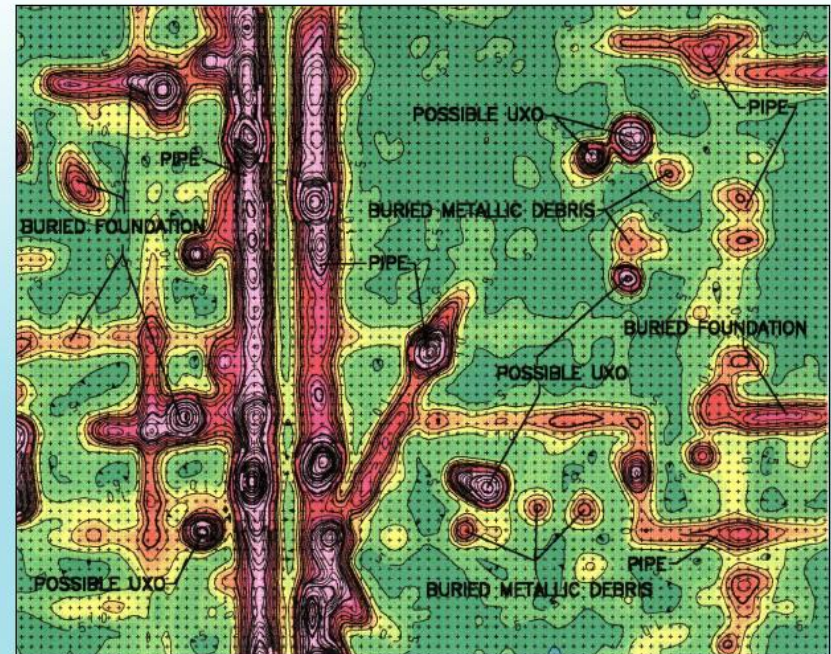
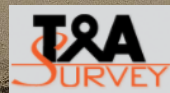
<http://www.gemsys.ca>



UXO Detection

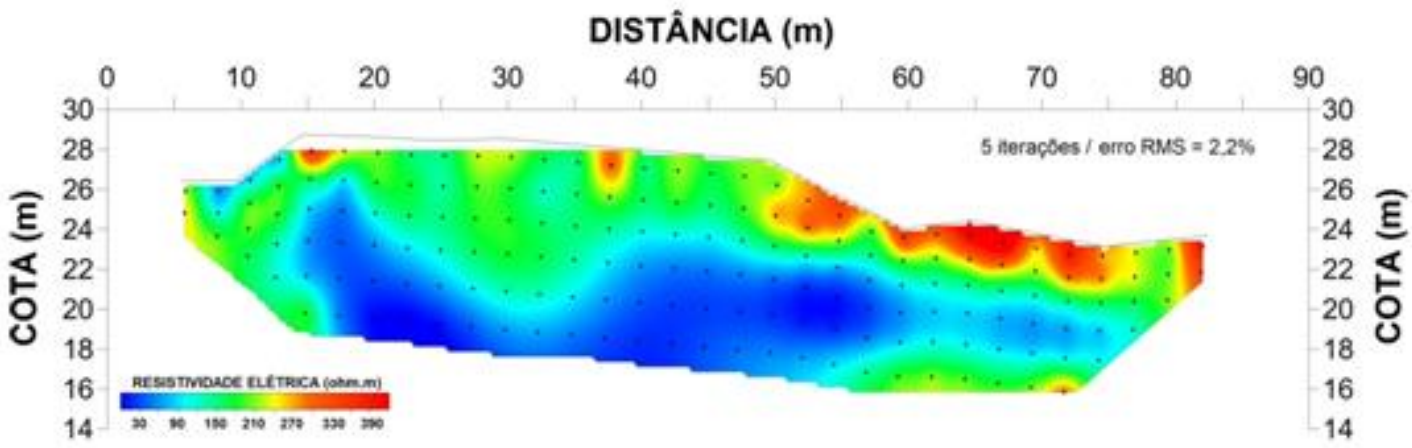
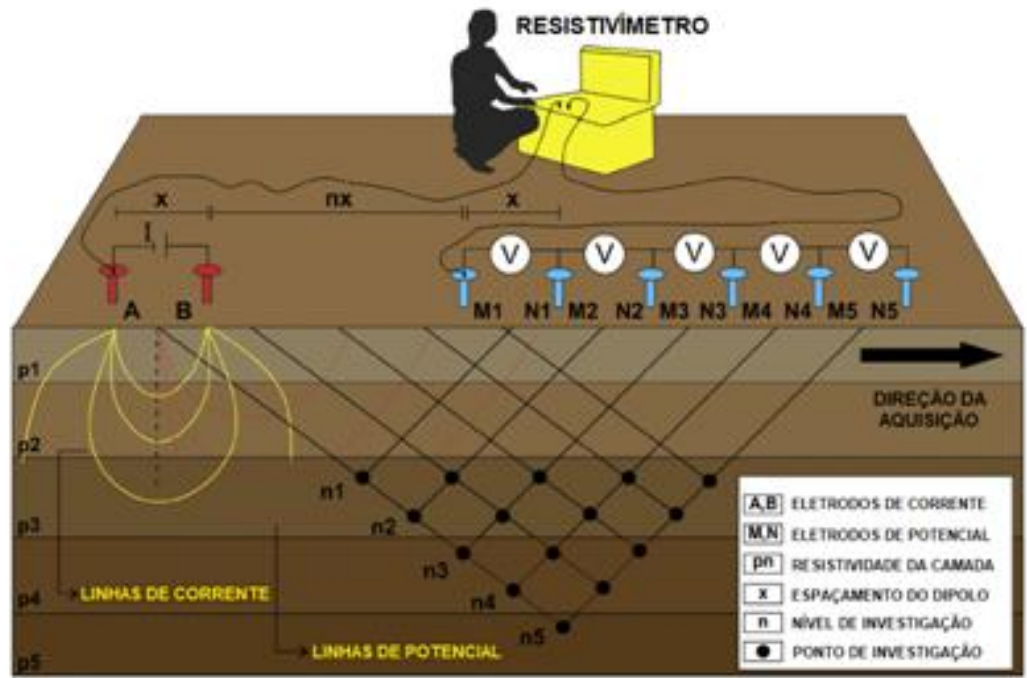


<http://www.ta-survey.nl>



www.geovision.com

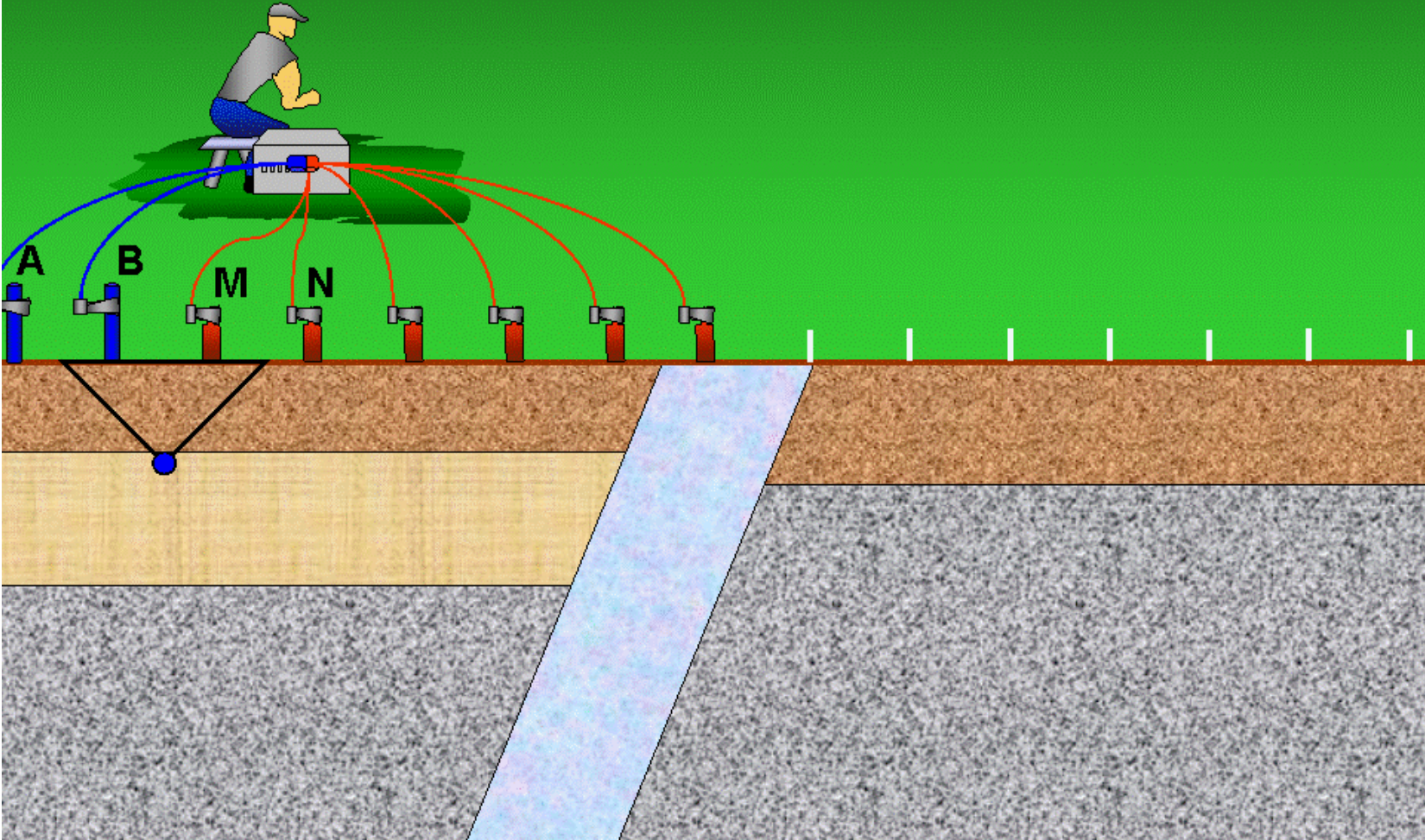
III) Eletrorresistividade (ER)



III) Eletrorresistividade (ER)

Caminhamento Eléctrico - Arranjo Dipolo-Dipolo

unesp
Braga, A.C.O.



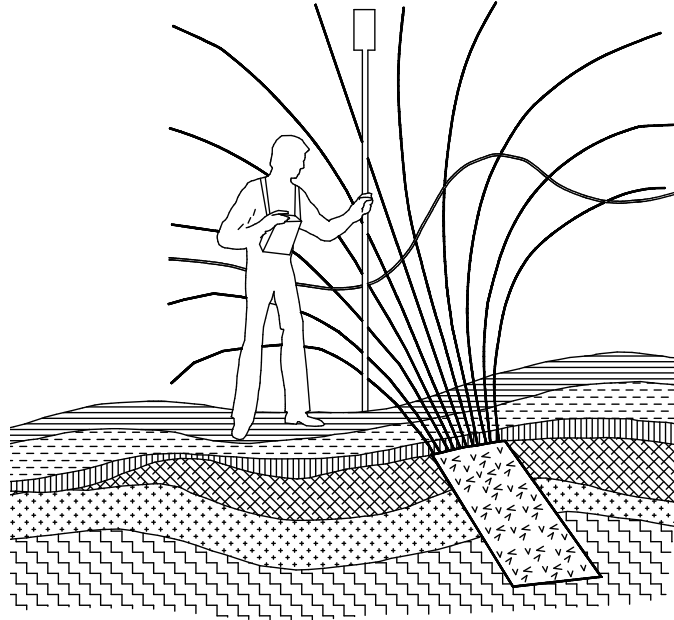
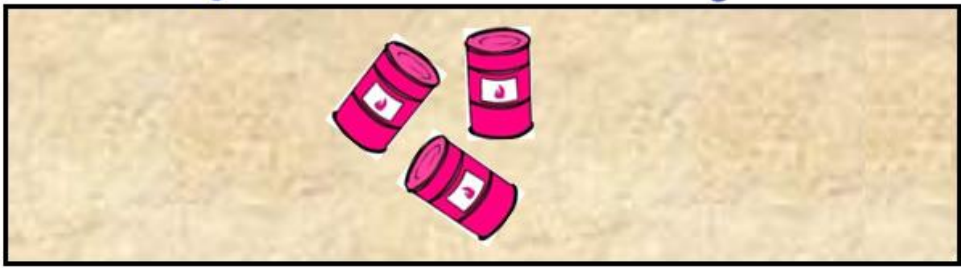
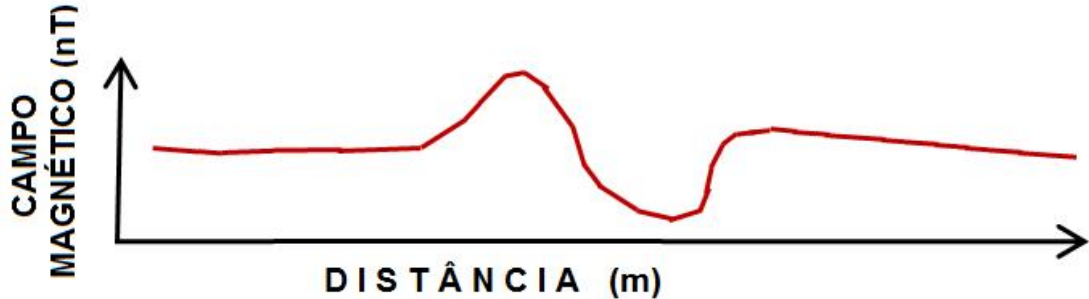
III) Eletrorresistividade (**ER**)

GPR, EM e ER respondem muito bem às variação da **condutividade elétrica (σ) / resistividade elétrica (ρ)**

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

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

IV) Magnetometria (MAG)



IV) Magnetometria (**MAG**)

A Bike Built for Magnetic Mapping

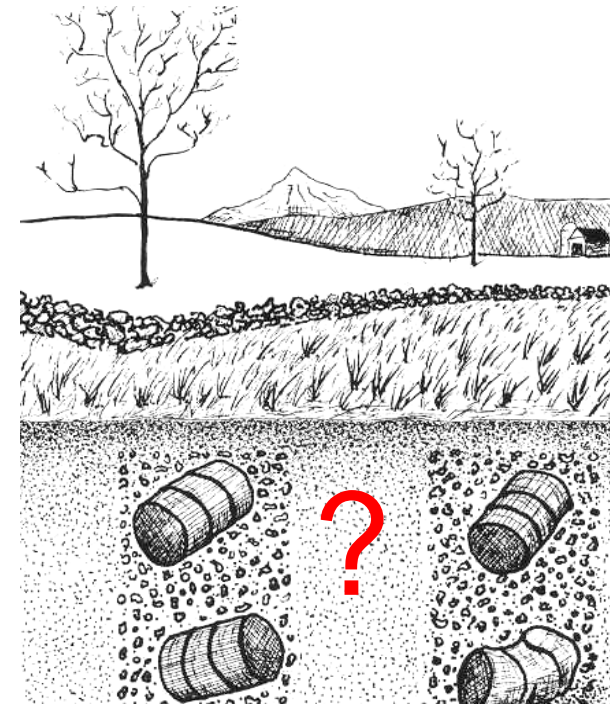
Mounting a magnetic sensor on a bicycle offers an efficient, low-cost method of collecting ground magnetic field data over rough terrain where conventional vehicles dare not venture.



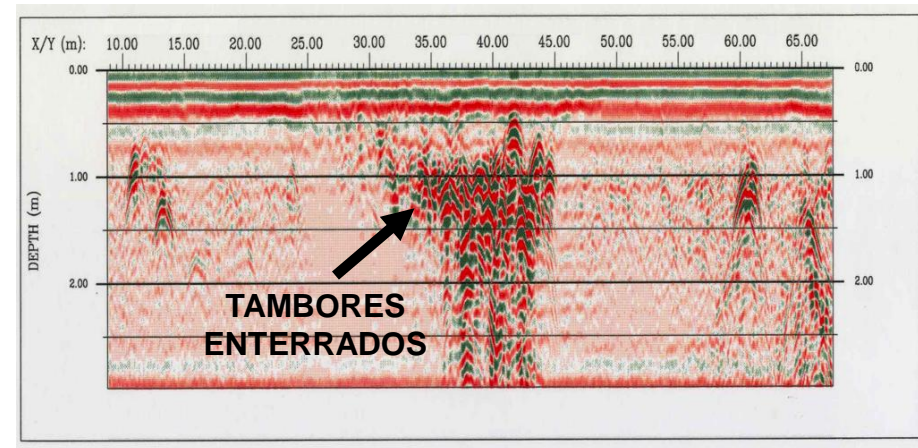
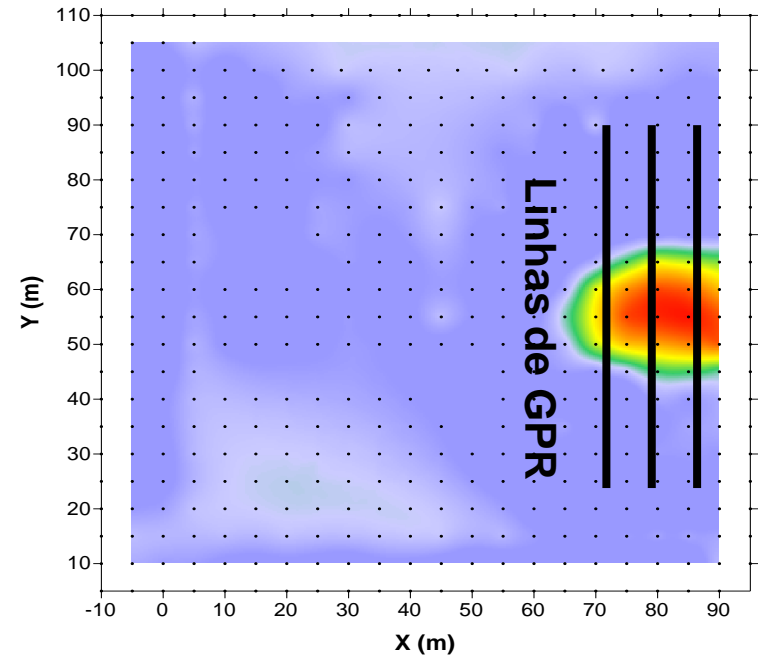
Uri Schattner (the author) tests the bike-mag system, a mountain bike equipped with a magnetic sensor and GPS capabilities, across the shoulder of the Dead Sea fault valley in northeastern Israel. Such a bike offers a simple, efficient, cost-effective alternative to walking for making local magnetic measurements. Credit: Amit Segev (Geological Survey of Israel)

LOCALIZAÇÃO DE TAMBORES ENTERRADOS

Área com suspeita da existência de tambores enterrados



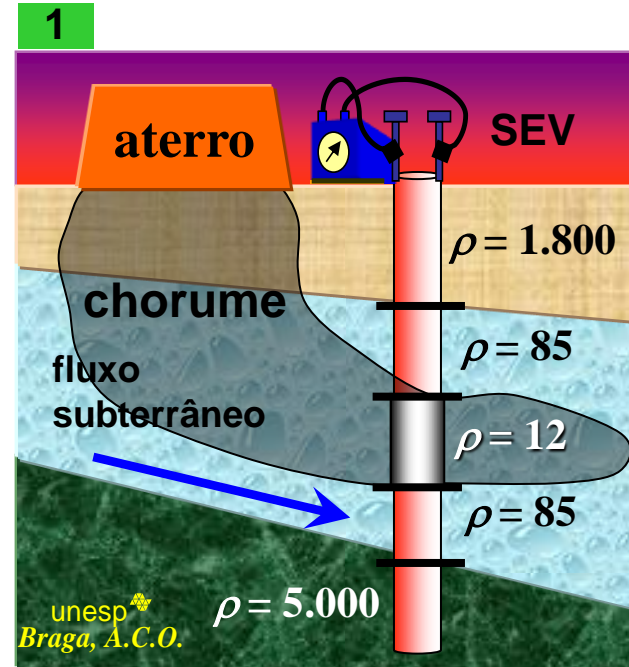
LOCALIZAÇÃO DE TAMBORES ENTERRADOS



LOCALIZAÇÃO DE TAMBORES ENTERRADOS



LIXÕES E ATERROS SANITÁRIOS



CHORUME → condutivo eletricamente

LIXÕES E ATERROS SANITÁRIOS

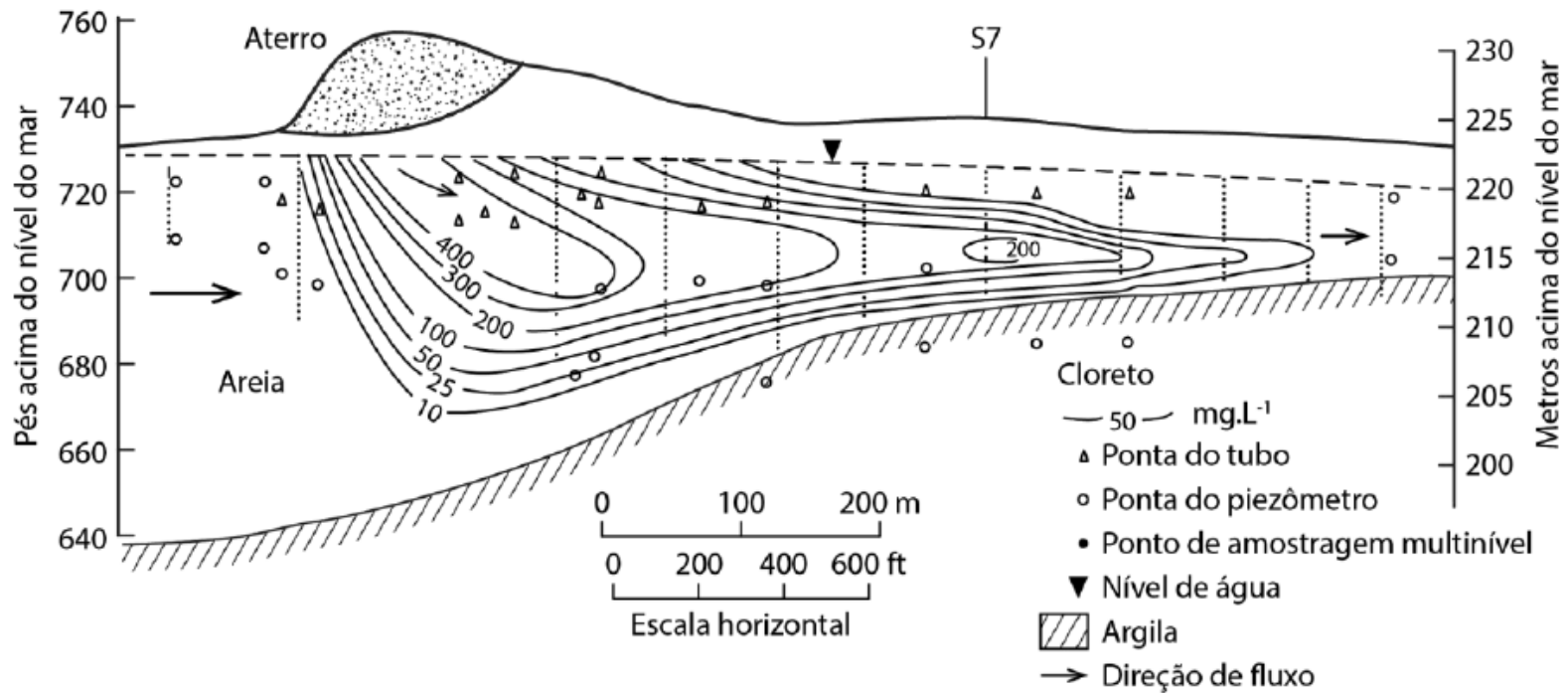


Figura 9.25 Pluma de lixiviado migrando de um aterro sanitário em um aquífero arenoso; a zona contaminada é representada por contornos de concentração de Cl⁻ em água subterrânea.

Fonte: Água subterrânea (tradução). 2017. Freeze, R.A ; Cherry, J.A.

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

H⁺: 36.2 * 10⁻⁸

K⁺: 7.6 * 10⁻⁸

SO₄⁻: 8.3 * 10⁻⁸

NO₃⁻: 7.4 * 10⁻⁸

Na⁺: 5.2 * 10⁻⁸

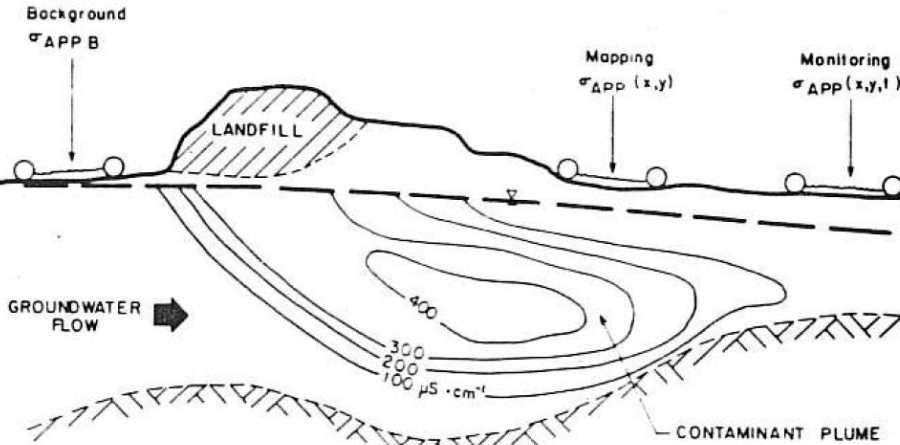
OH⁻: 20.5 * 10⁻⁸

Cl⁻: 0.9 * 10⁻⁸

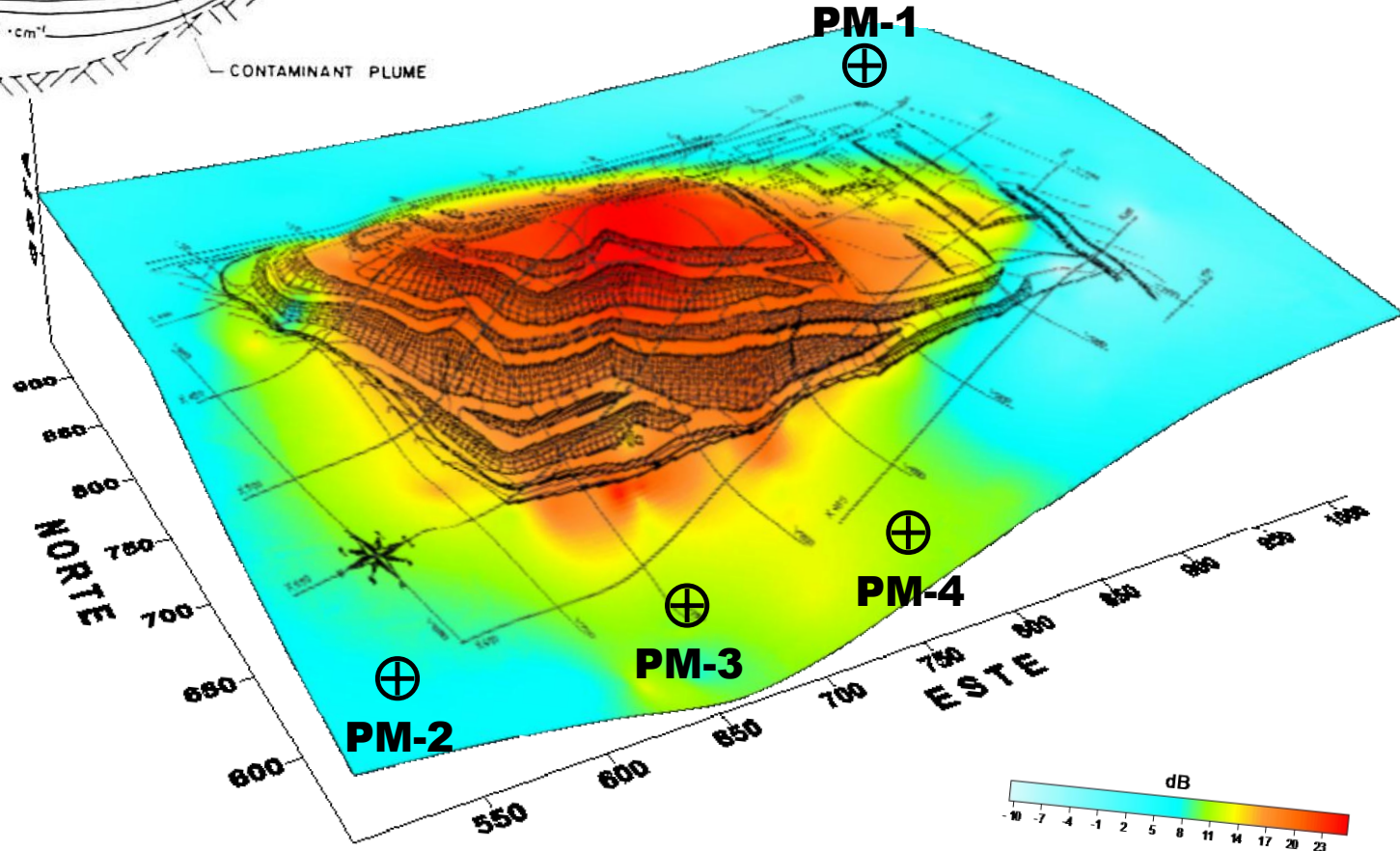
HCO₃⁻: 4.6 * 10⁻⁸



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

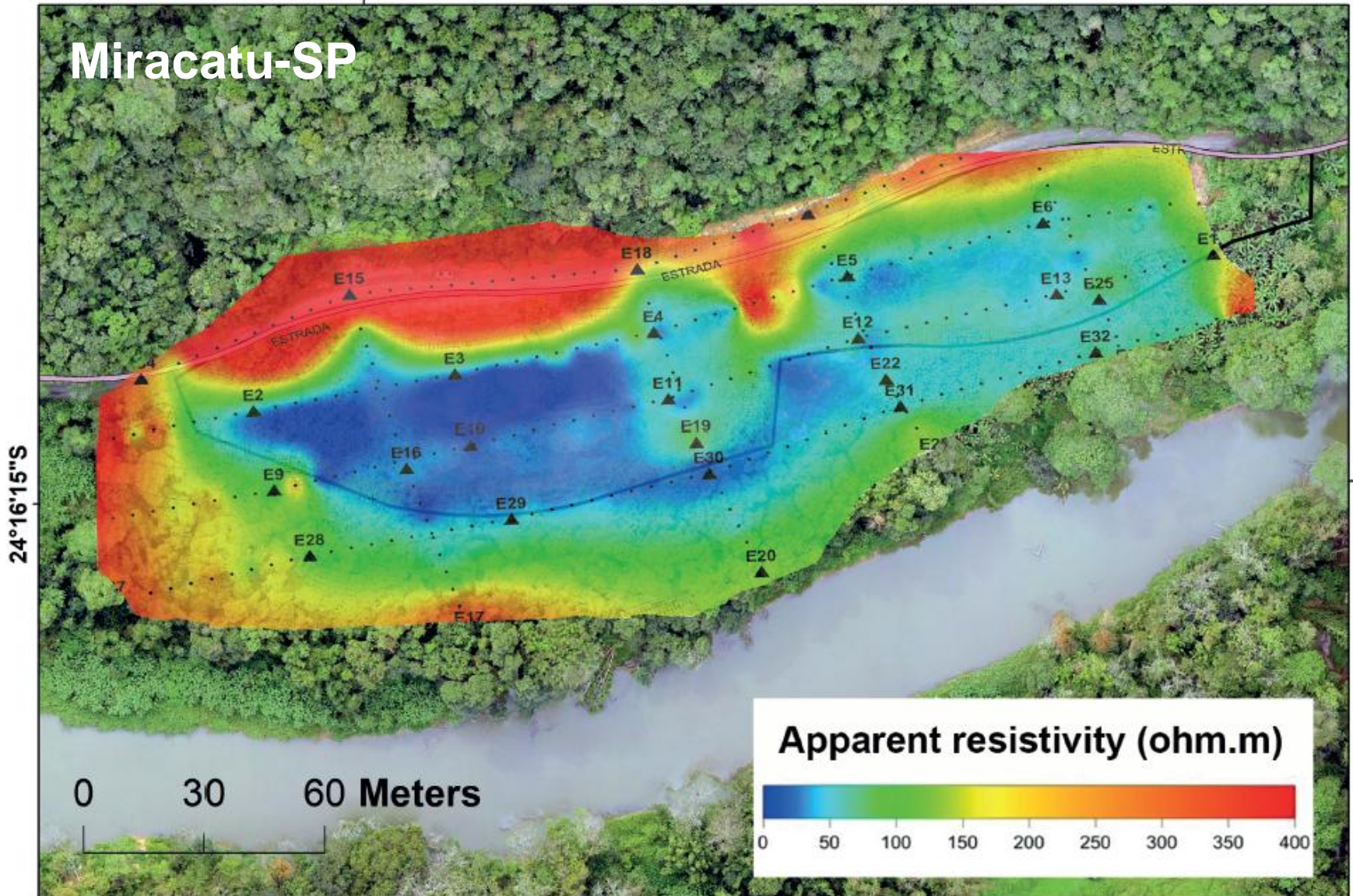


FIGURE 8: Geophysical results in Miracatu dump expressed in scales of electrical resistivity in the subsoil.

LIXÕES E ATERROS SANITÁRIOS

Miracatu-SP

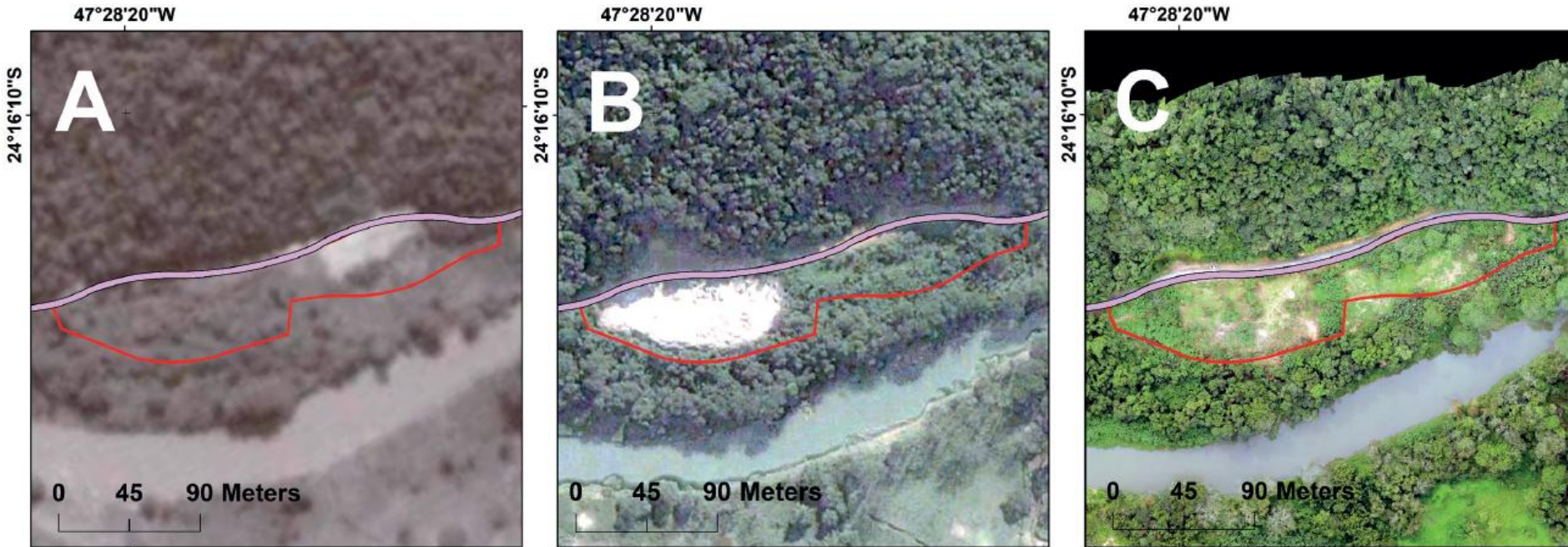
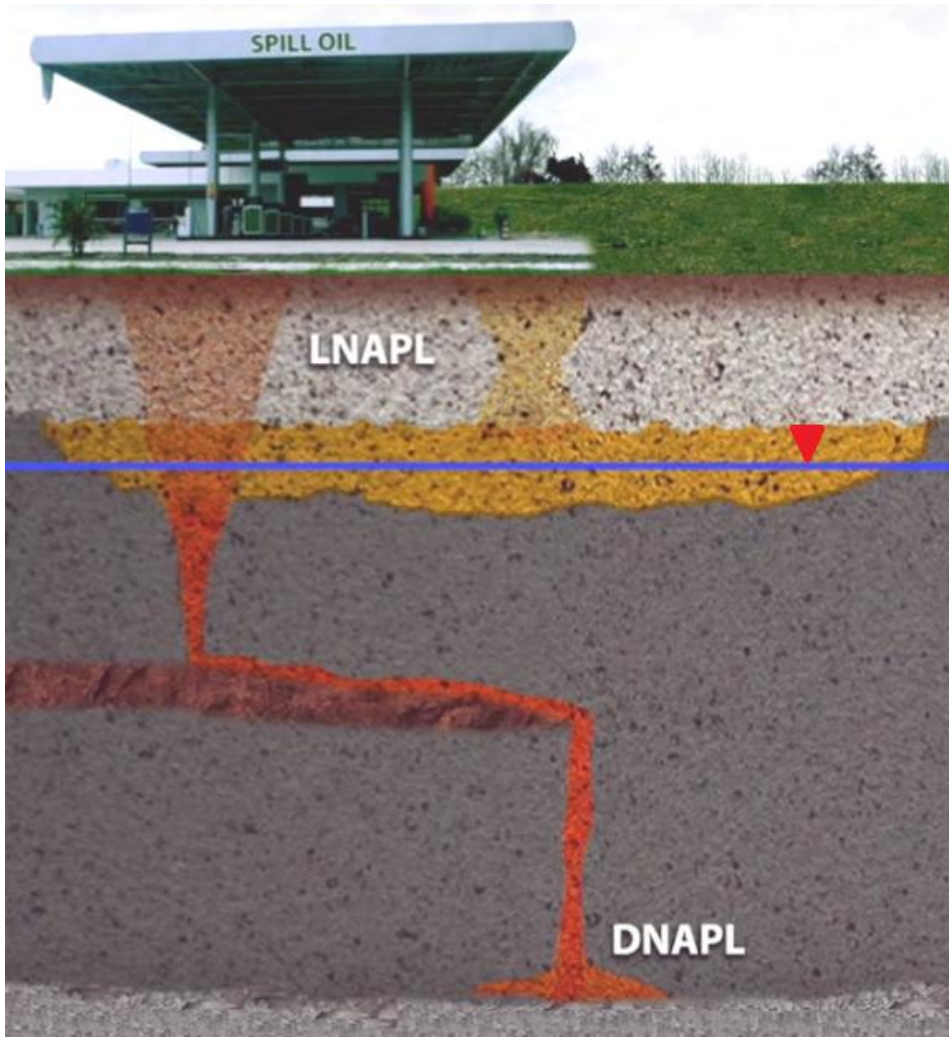


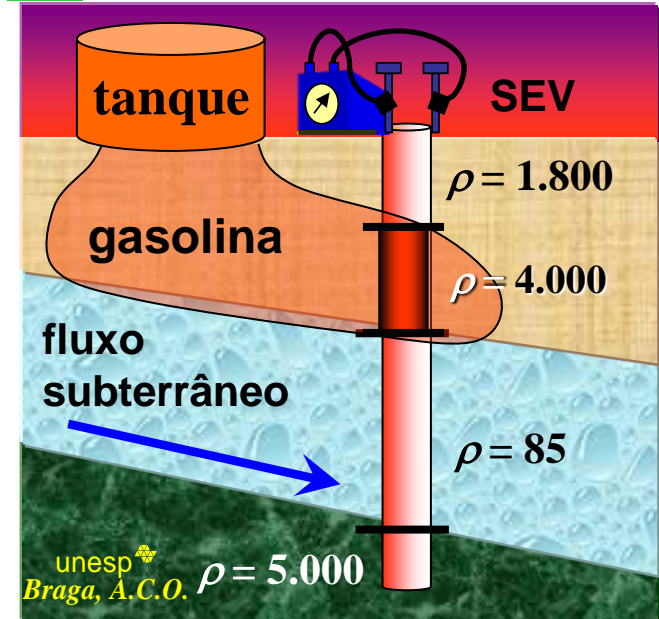
FIGURE 7: Historical analysis of Miracatu dump in 1991 (A), 2006 (B) and 2018 (C).

CONTAMINAÇÃO POR COMPOSTOS ORGÂNICOS (HIDROCARBONETOS)



Fonte: HIDROPLAN

2



Hidrocarbonetos
⇒ alta resistividade elétrica

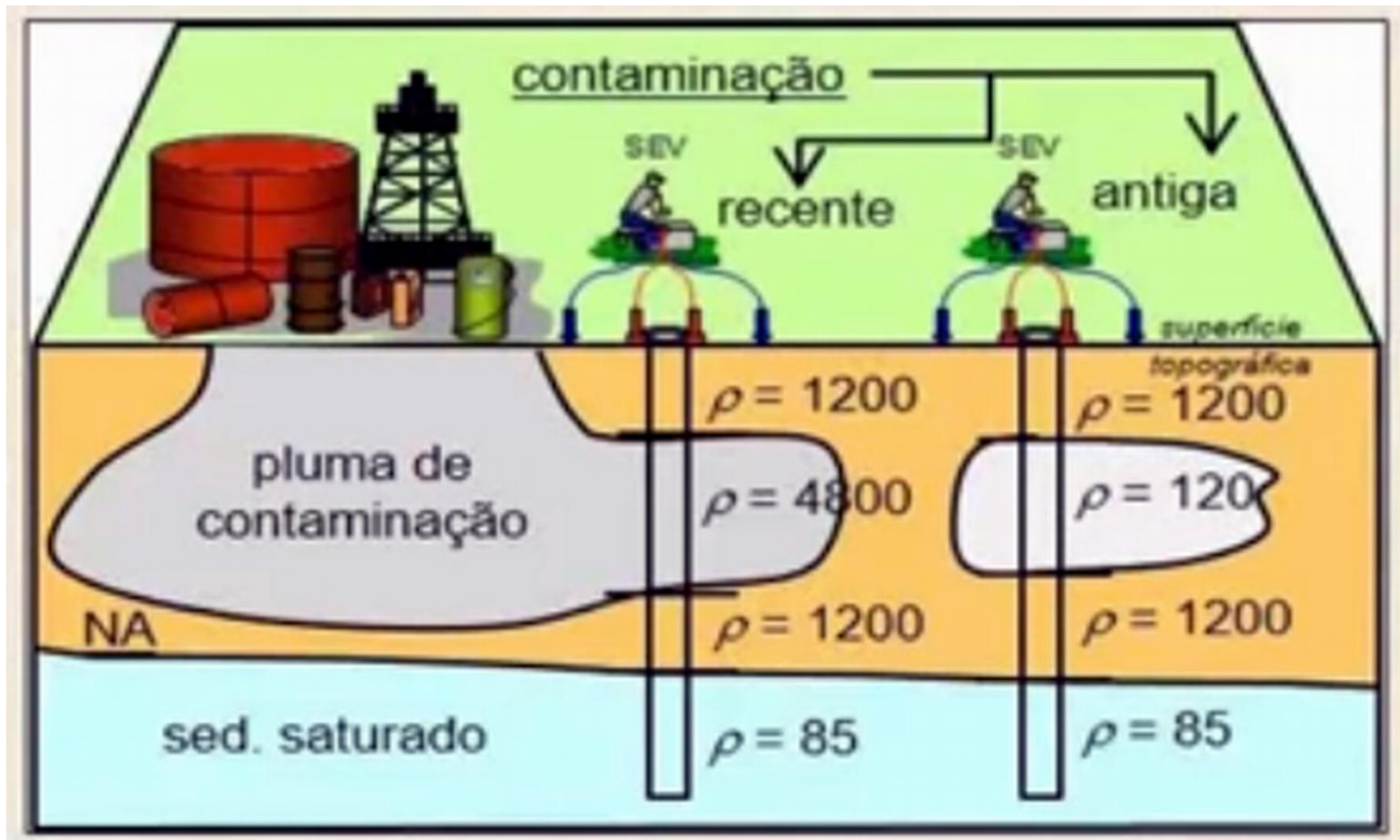
Resistividade
Elétrica (ρ)

**GASOLINA
DE AVIAÇÃO**

$10^6 \Omega m$

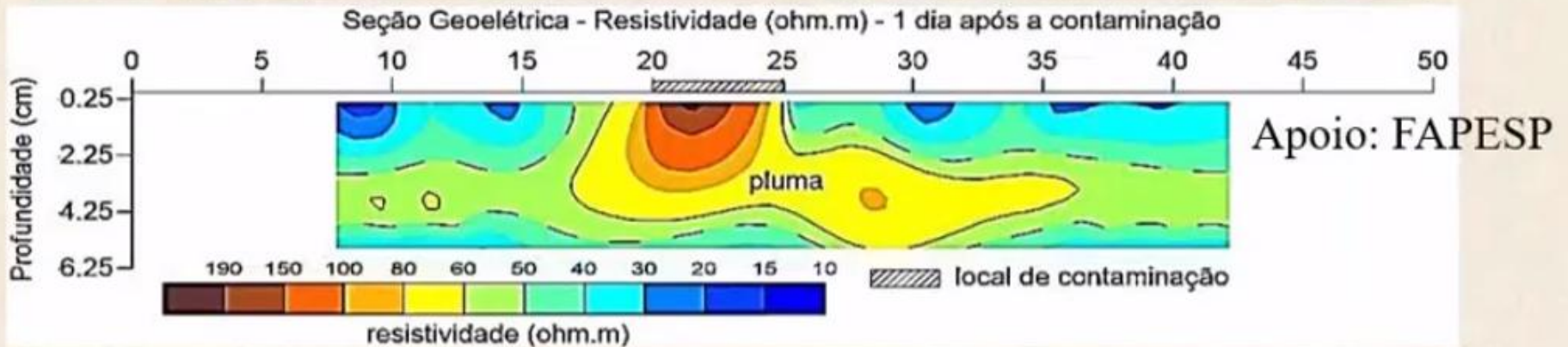
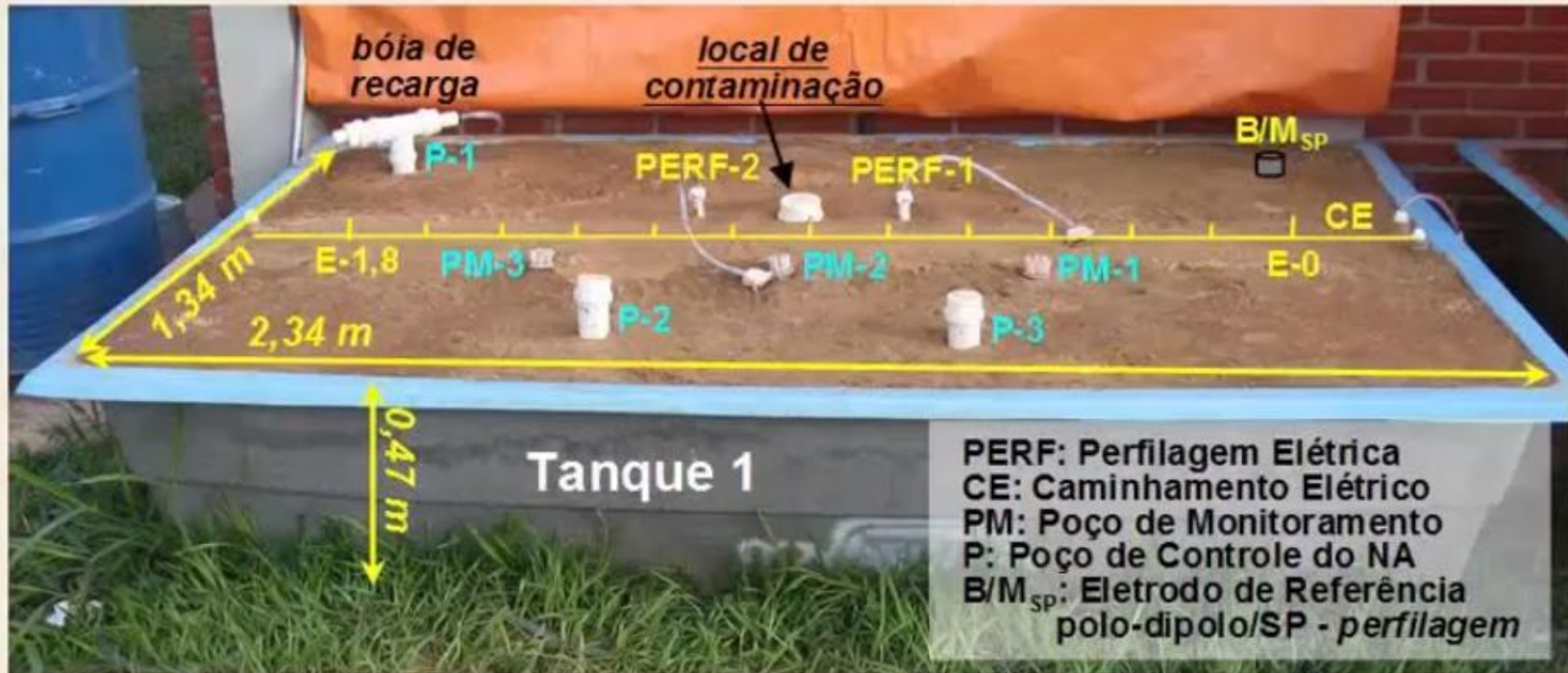
CONTAMINAÇÃO POR COMPOSTOS ORGÂNICOS (HIDROCARBONETOS)

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)

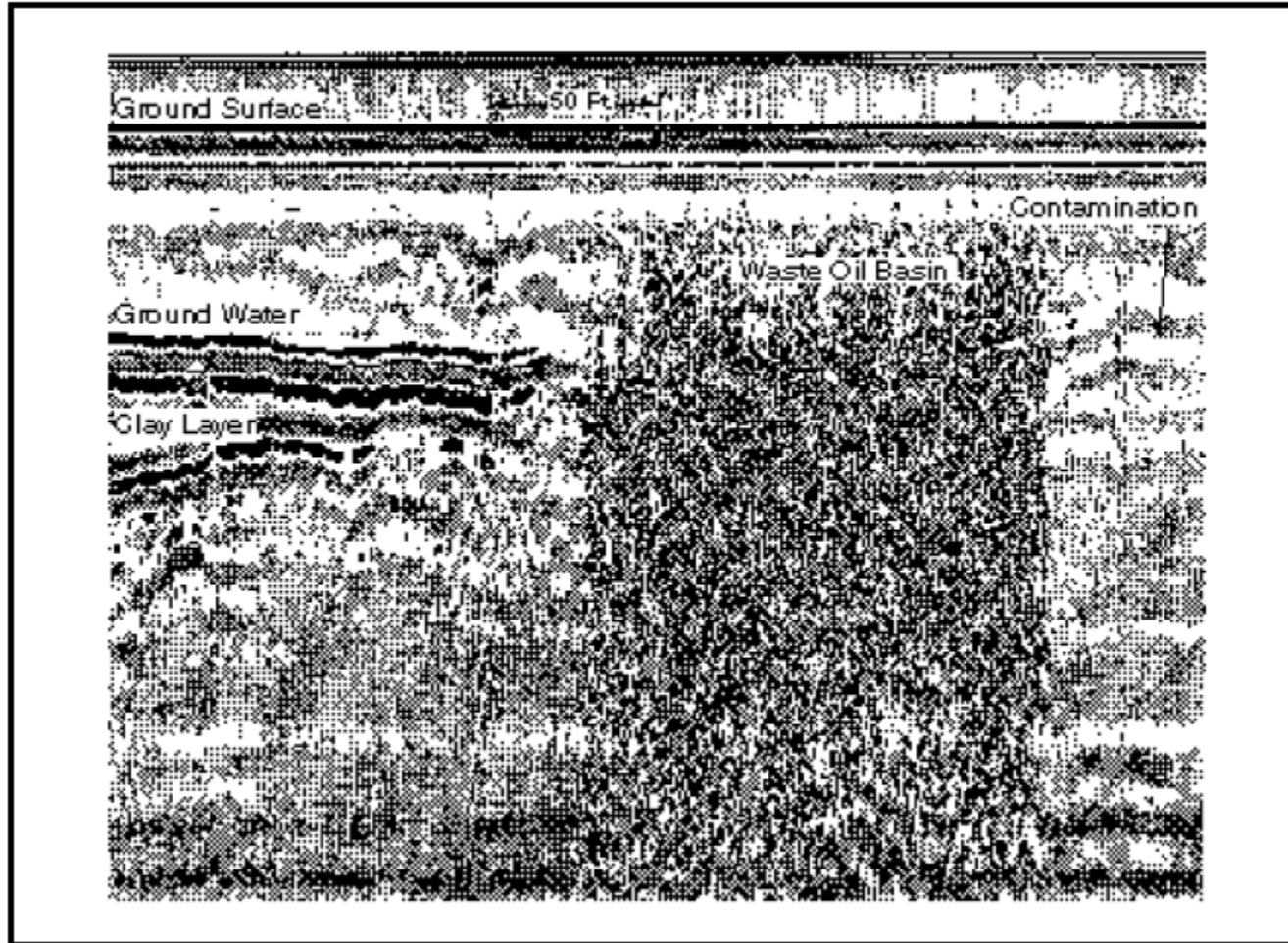
Vazamento de Gasolina – Controlado – CE/PERF



CONTAMINAÇÃO POR COMPOSTOS ORGÂNICOS (HIDROCARBONETOS)

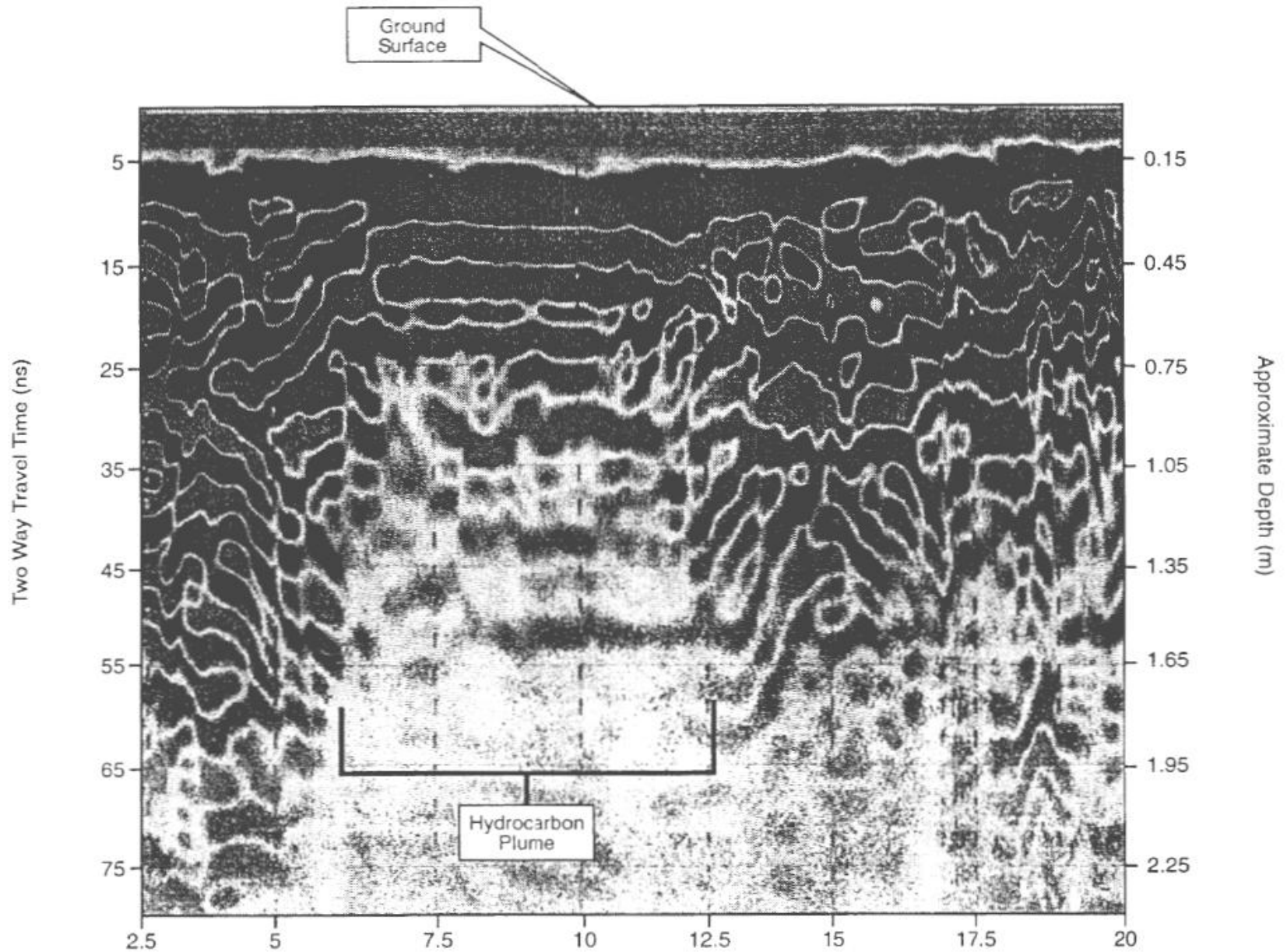
Exhibit III-18

Petroleum Contamination Detected With Ground Penetrating Radar

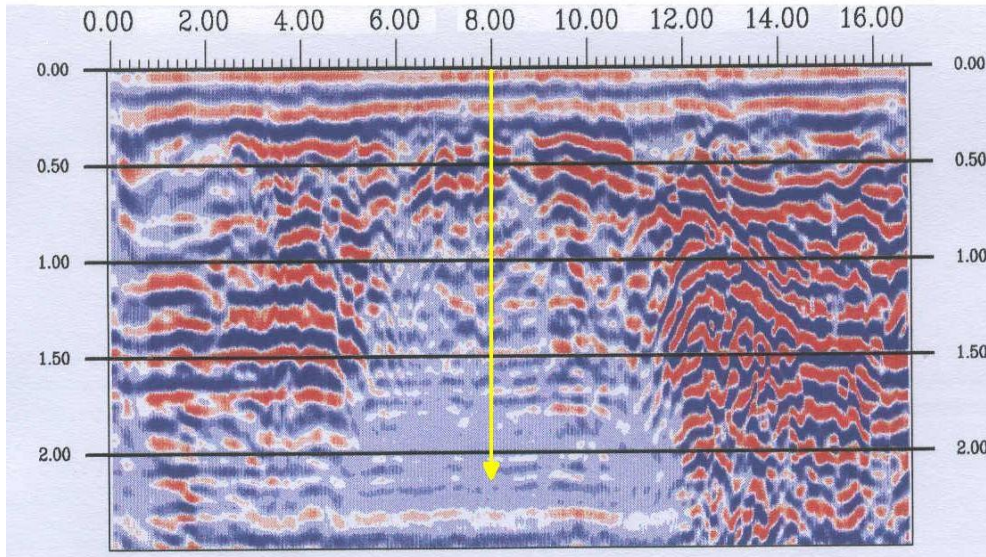


Source: U.S. EPA, 1995

CONTAMINAÇÃO POR COMPOSTOS ORGÂNICOS (HIDROCARBONETOS)



CONTAMINAÇÃO POR COMPOSTOS ORGÂNICOS (HIDROCARBONETOS)



Concentrações de TPH (*Total Petroleum Hydrocarbons*) :

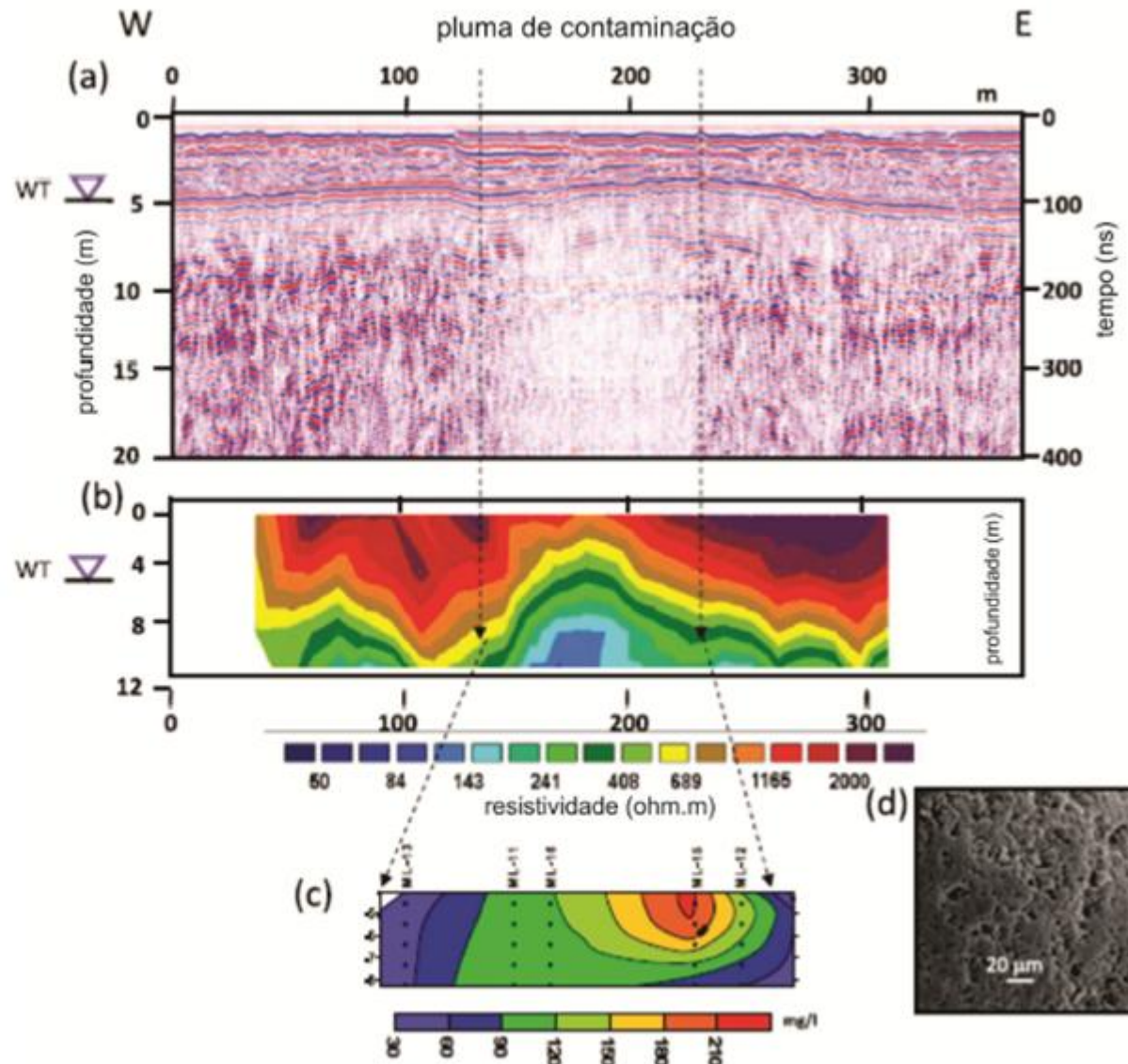
Matriz Água : 286 mg/l (Valor I: 0,6 mg/l, Norma Holandesa)
⇒ Superior a 470 vezes o padrão estabelecido para I (intervenção)

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

CONTAMINAÇÃO POR COMPOSTOS ORGÂNICOS (HIDROCARBONETOS)

GPR

ER



Modificado de Che-Alotta et al. (2009) (Atekwana e Slater, 2009)

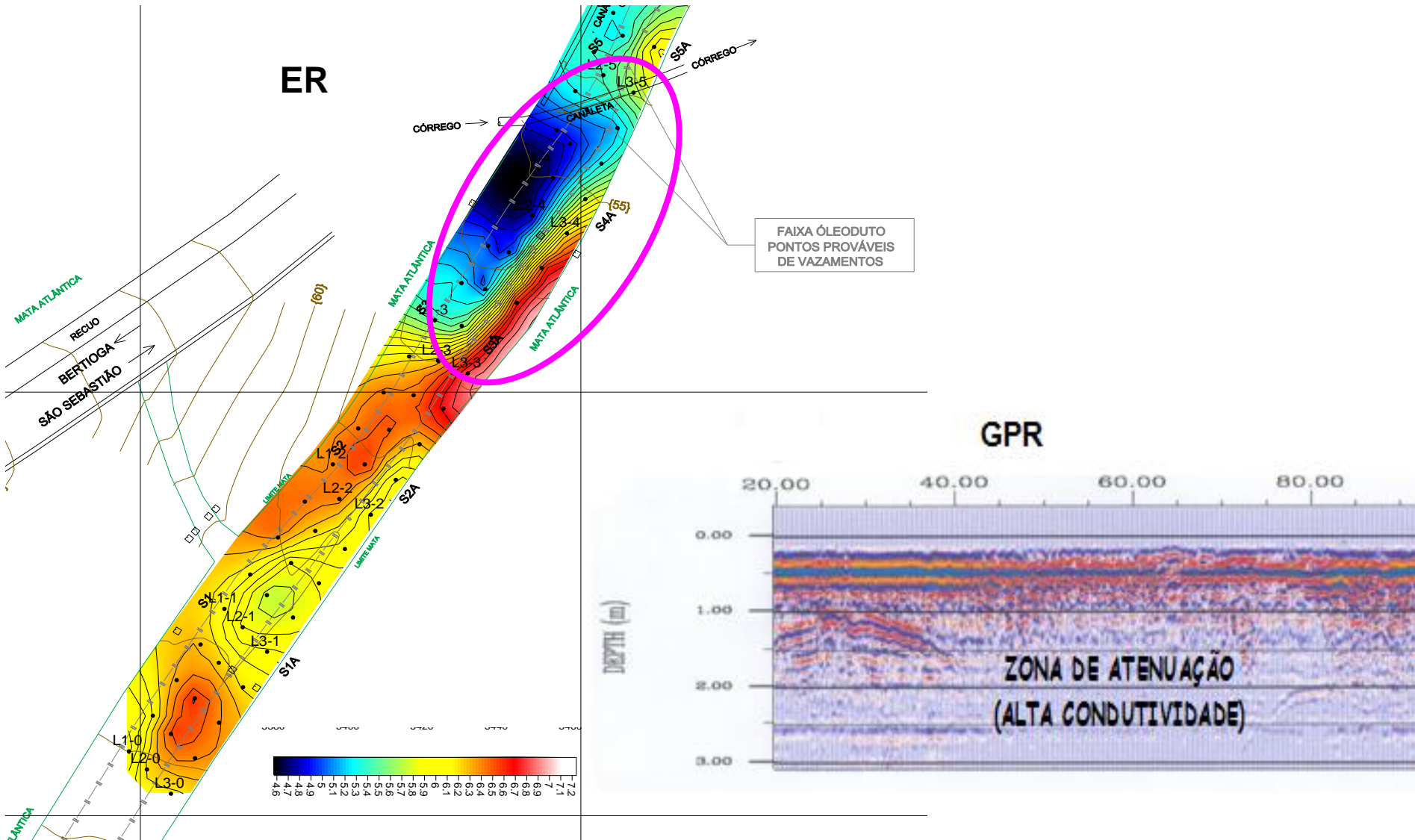
CONTAMINAÇÃO POR COMPOSTOS ORGÂNICOS (HIDROCARBONETOS)

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 ¹, Jorge Luís Porsani ²

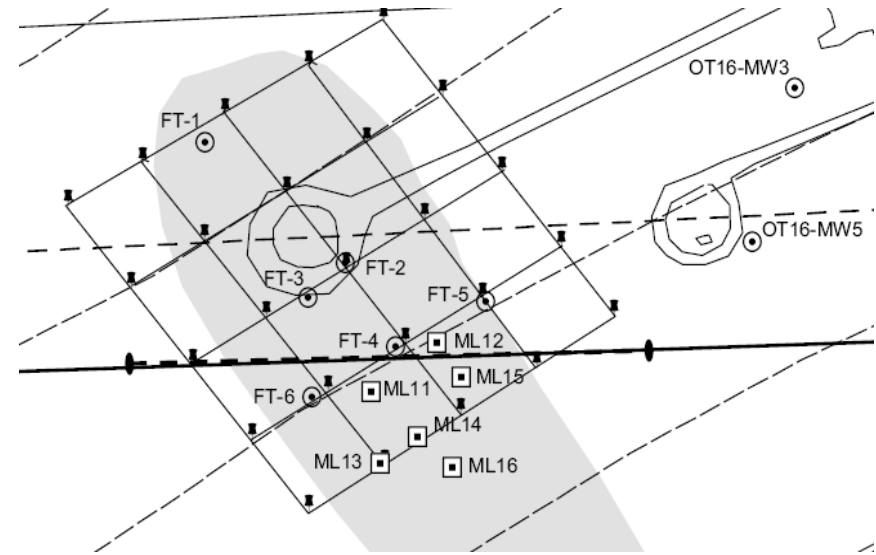
¹ Pós-Graduação em Geofísica (IAG/USP). E-mail: bertolla@iag.usp.br

² Universidade de São Paulo. Departamento de Geofísica (IAG/USP). E-mail: porsani@iag.usp.br

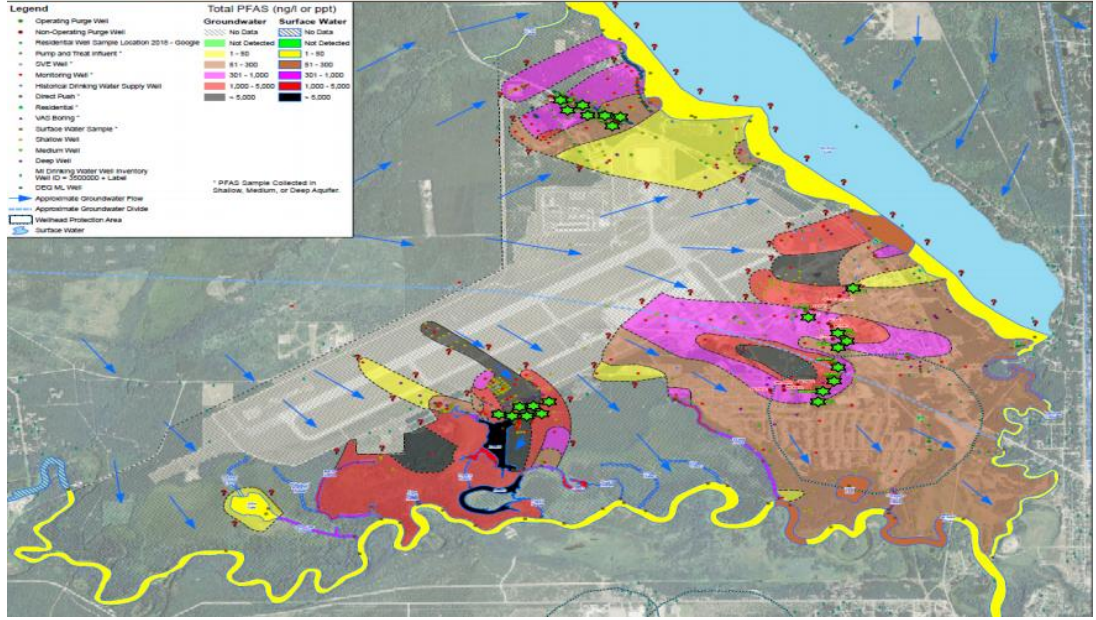
Fire Training Area 2 FT-02 Wurtsmith Air Force Base (decommissioned) Oscoda, Michigan, U.S.A..



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-Alota¹, Estella A. Atekwana¹, Eliot A. Atekwana¹, William A. Sauck², and D. Dale Werkema Jr.³

Geophysical response to remediation

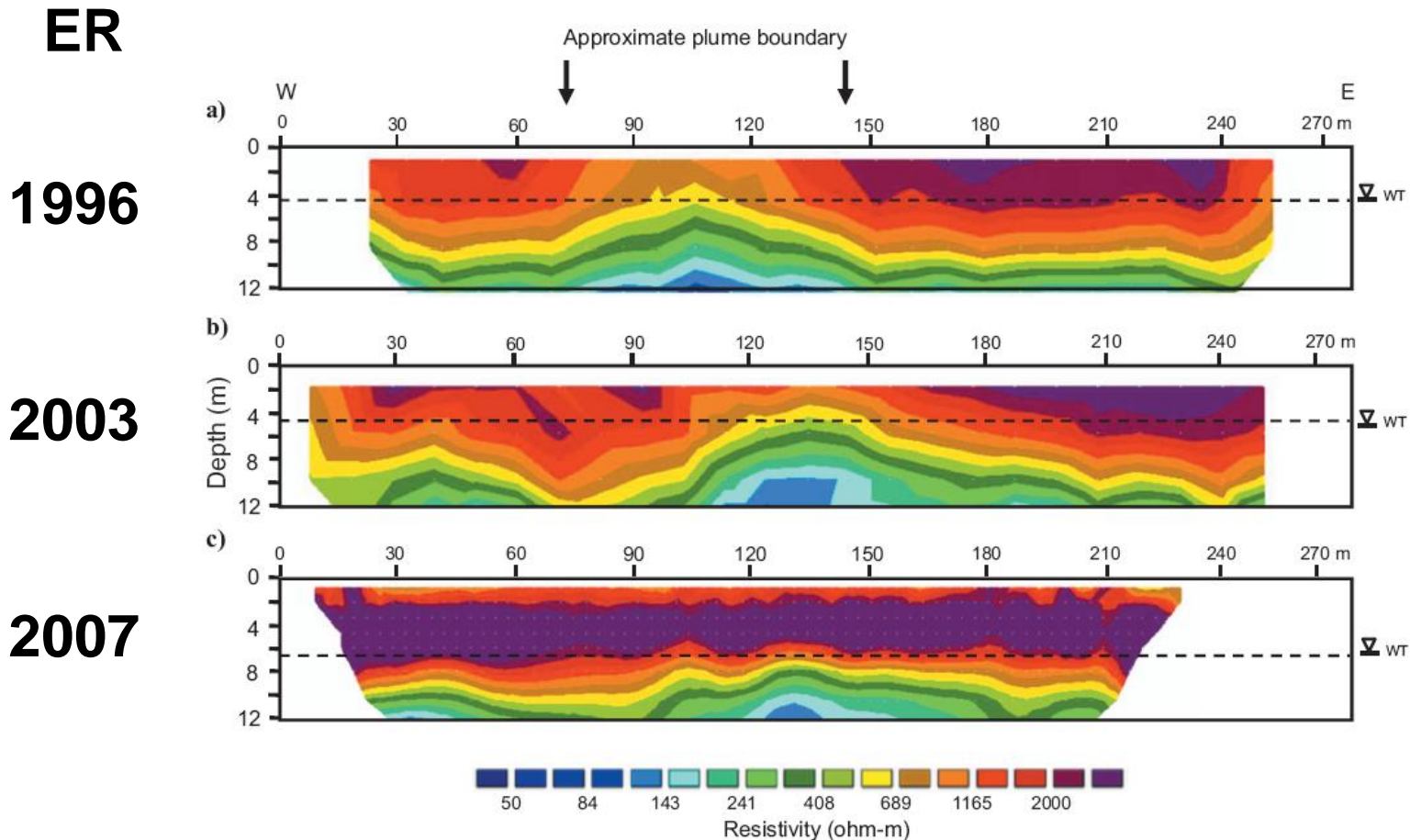
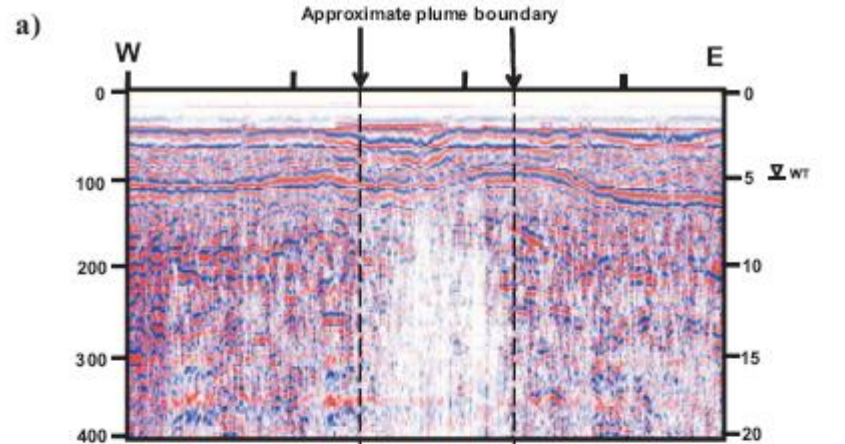


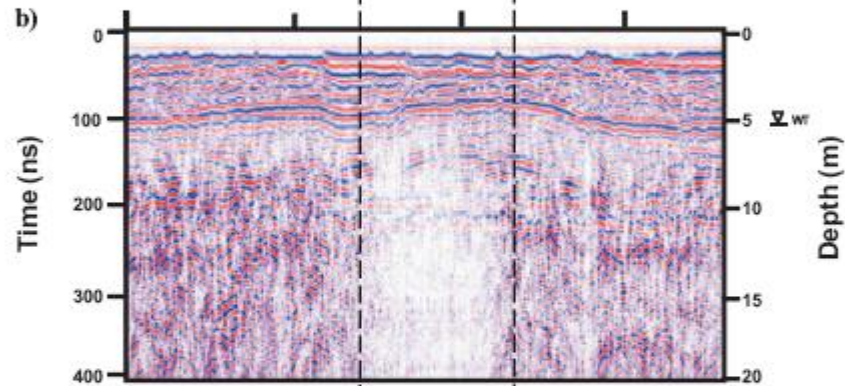
Figure 3. Inverted dipole-dipole resistivity profiles along the contaminant plume for (a) 1996, (b) 2003, and (c) 2007, respectively. Arrows indicate the approximate lateral extent of the contaminant plume. Note the change in conductivity in the contaminant plume over time.

GPR

1996



2003



2007

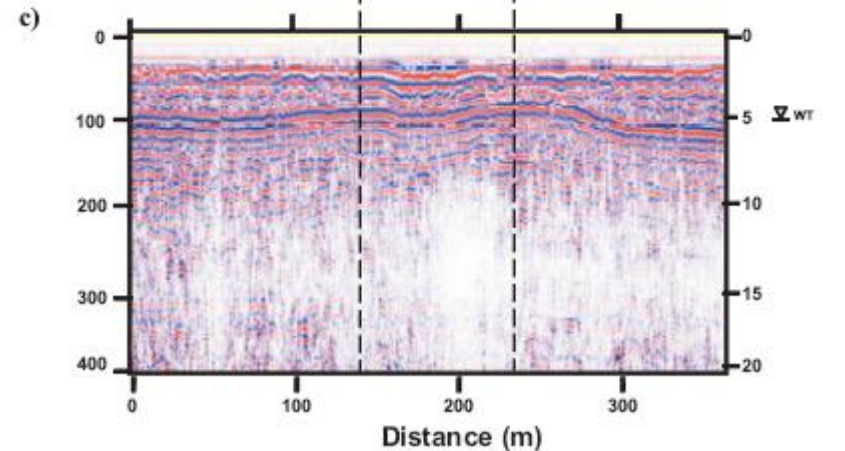
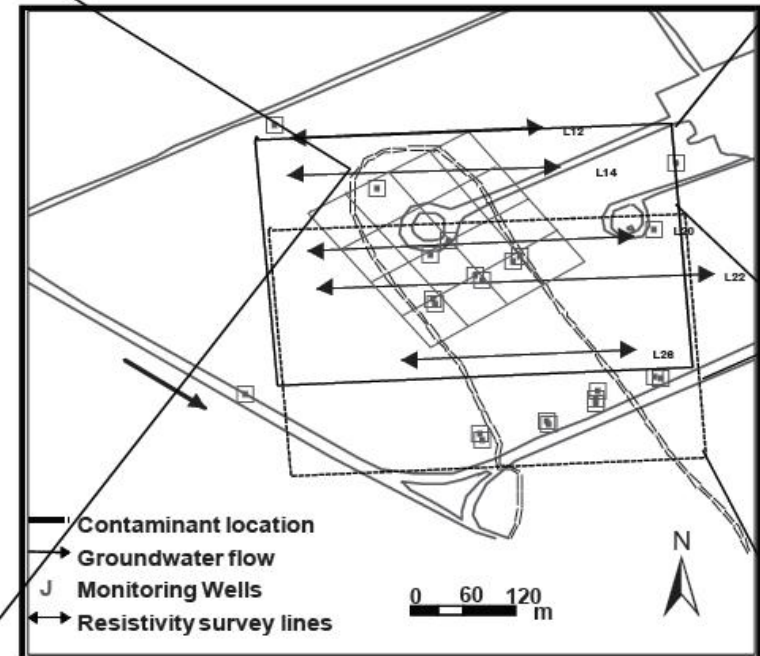
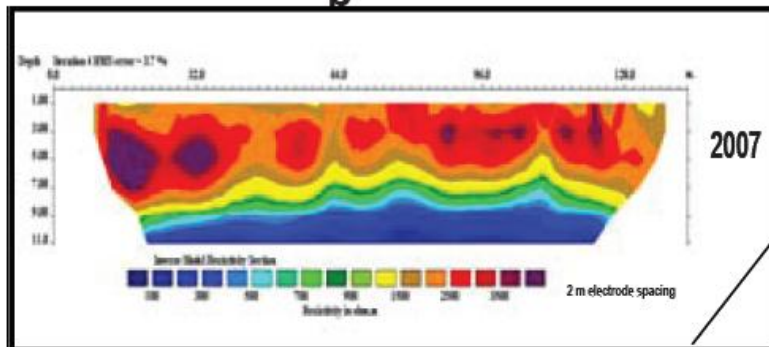
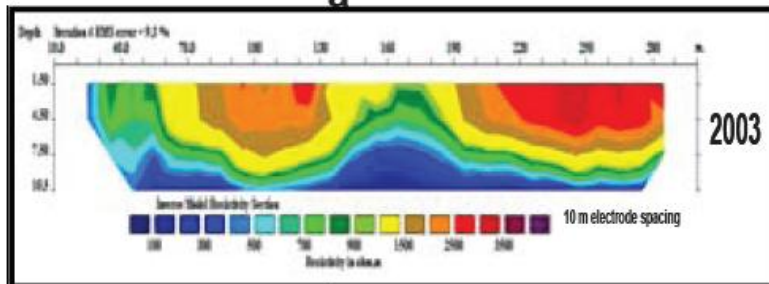
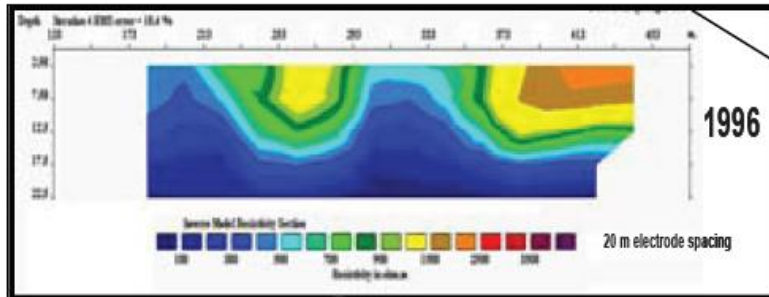


Figure 5. GPR profile over FT-02 contaminant plume measured in (a) 1996, (b) 2003, and (c) 2007. Arrows indicate the approximate lateral extent of the contaminant plume. Note the change in water-table reflectors around 100 ns and the change in depth of the shadow zone in the contaminant plume over time.

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*



C