

# **Mapeamento contaminação do solo com geofísica**

**Vagner Roberto Elis**  
Departamento de Geofísica  
**IAG - USP**

**Maio de 2013**

## **AGENTES CAUSADORES DE POLUIÇÃO**

A crescente produção de resíduos industriais e urbanos vem gerando problemas em todo o mundo, no sentido de sua destinação final. Como citado anteriormente, normalmente os rejeitos sólidos são concentrados, e os líquidos tratados e diluídos, sendo em seguida colocados no ambiente sob alguma forma de disposição.

Essa forma de disposição, se não observar as características do ambiente e não obedecer técnicas seguras de instalação e manejo, pode causar poluição ambiental.

## Principais Fontes de Contaminação

- Áreas de disposição de resíduos sólidos (urbanos e industriais);
- Lagoas de tratamento de efluentes industriais;
- Disposição de esgoto;
- Disposição de resíduos radioativos;
- Atividades agrícolas;
- Vazamentos de petróleo e derivados;
- Rejeitos de atividades mineradoras.

## O PROBLEMA DO AUMENTO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS

O aumento da urbanização vem gerando um crescimento na produção de resíduos industriais e urbanos dos mais variados tipos. Esses resíduos compreendem uma extensa gama de substâncias químicas e são dispostos no ambiente, muitas vezes, de forma totalmente inadequada, sem observar critérios mínimos para a proteção do ambiente.

As áreas destinadas a disposição dos mais variados tipos de resíduos necessitam, portanto, ser instaladas em locais com determinadas características que evitem a entrada de substâncias contaminantes no ambiente natural.

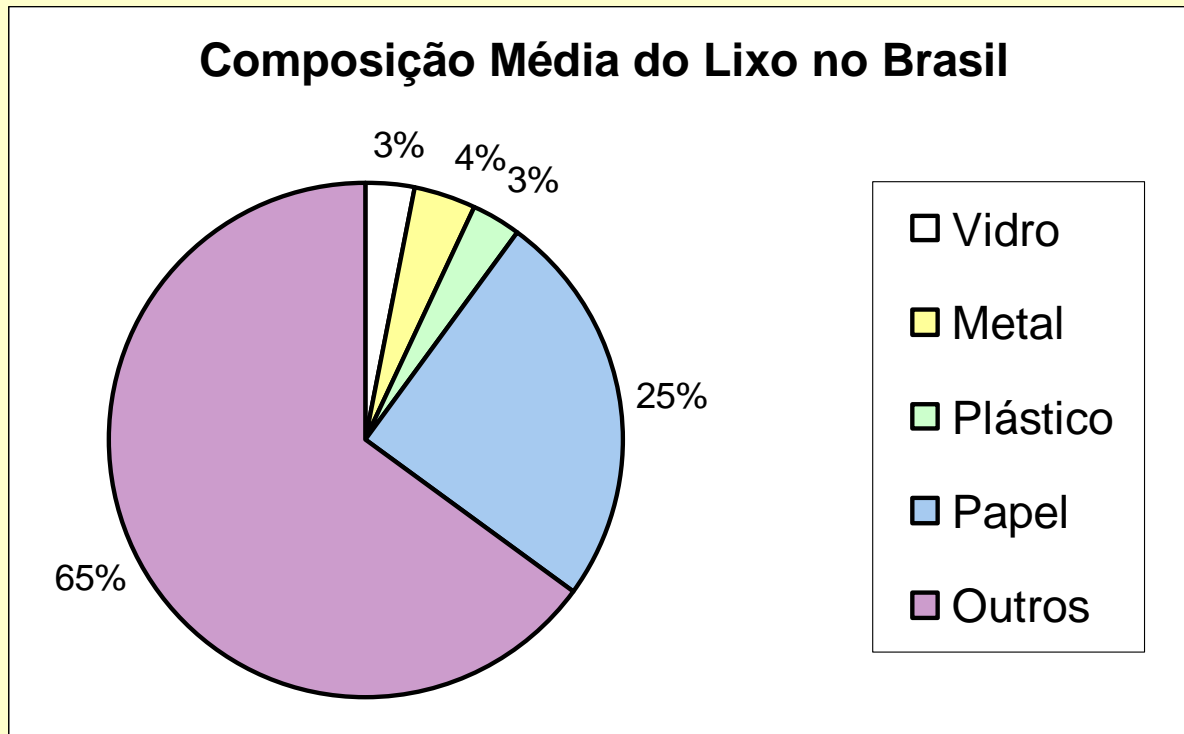
Um problema que ocorre atualmente em algumas grandes cidades brasileiras é a escassez de áreas com características adequadas para receber os resíduos.

**São Paulo**



**Rio de Janeiro**





Apenas uma parcela de 35% representa material potencialmente reciclável.

O restante do material (65%) é constituído por resíduos orgânicos (restos de animais mortos, alimentos, restos de podas de árvores e mato), rejeitos inertes de difícil reciclagem (entulho, por exemplo), lixo hospitalar e outros resíduos domésticos variados (óleos lubrificantes, tintas, pesticidas, etc.)

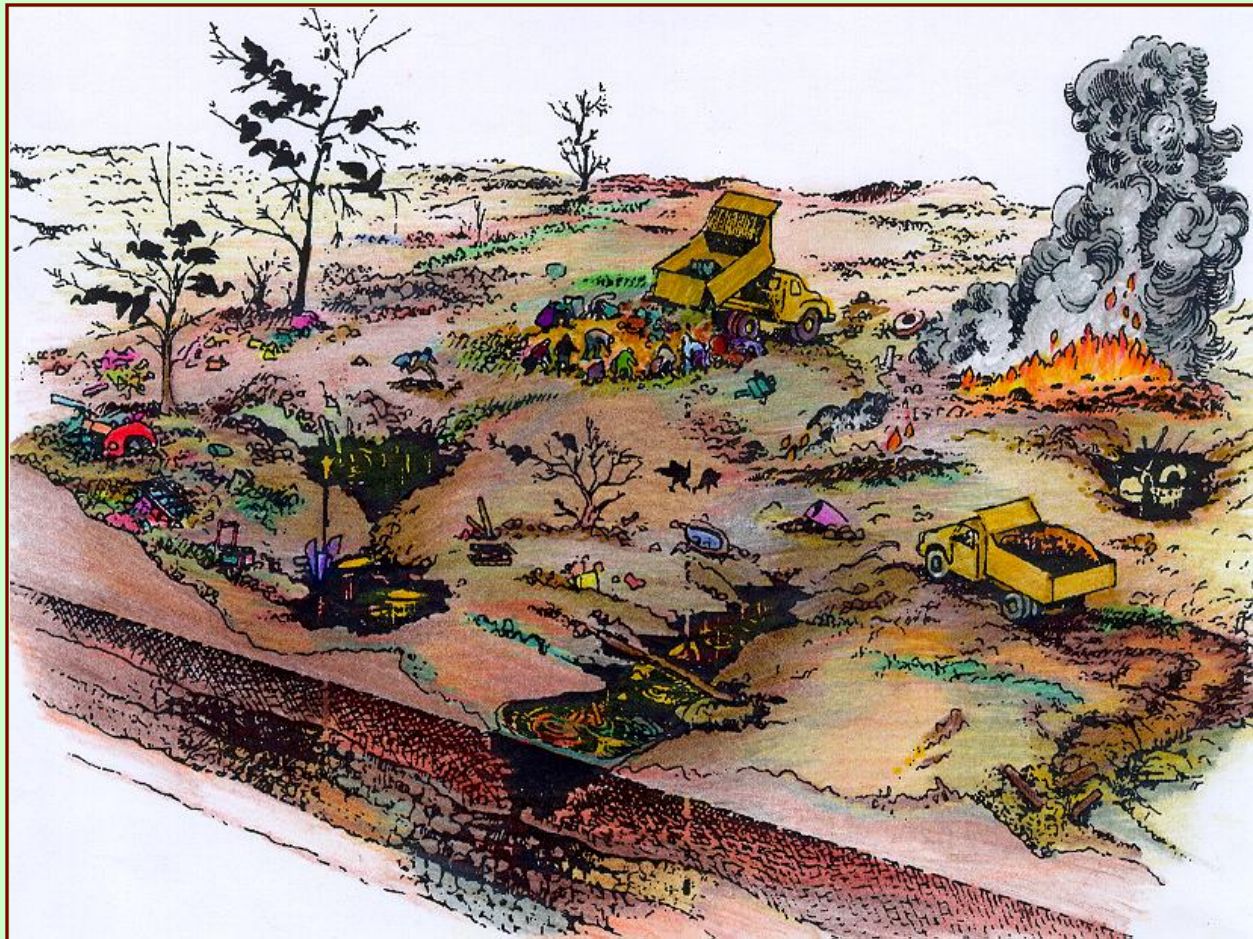
## ÁREAS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Como visto, somente uma pequena parcela dos resíduos coletados pode ser reaproveitada. O restante precisa ser colocado em um local adequado, o que na maioria das vezes não acontece.

- A disposição final dos resíduos sólidos urbanos é de responsabilidade dos órgãos governamentais, no caso, as **prefeituras municipais**.
- Esses órgãos na maioria das vezes não tratam de forma adequada os **resíduos gerados no município**, não observando as limitações impostas pelo **ambiente** e desobedecendo regras e técnicas de manejo adequado do local de disposição.
- É justamente esse descaso e a opção por alternativas de disposição de baixo custo - **lixões a céu aberto**, e em alguns casos a disposição de resíduos industriais juntamente com os domésticos - que fazem das áreas de disposição de resíduos urbanos uma das principais fontes (se não a principal) de poluição no Brasil.
- De acordo com IBGE (in IPT, 1995), o brasileiro convive com a maioria do lixo que produz, que em 1991 atingia cerca de 250 mil toneladas produzidas por dia.



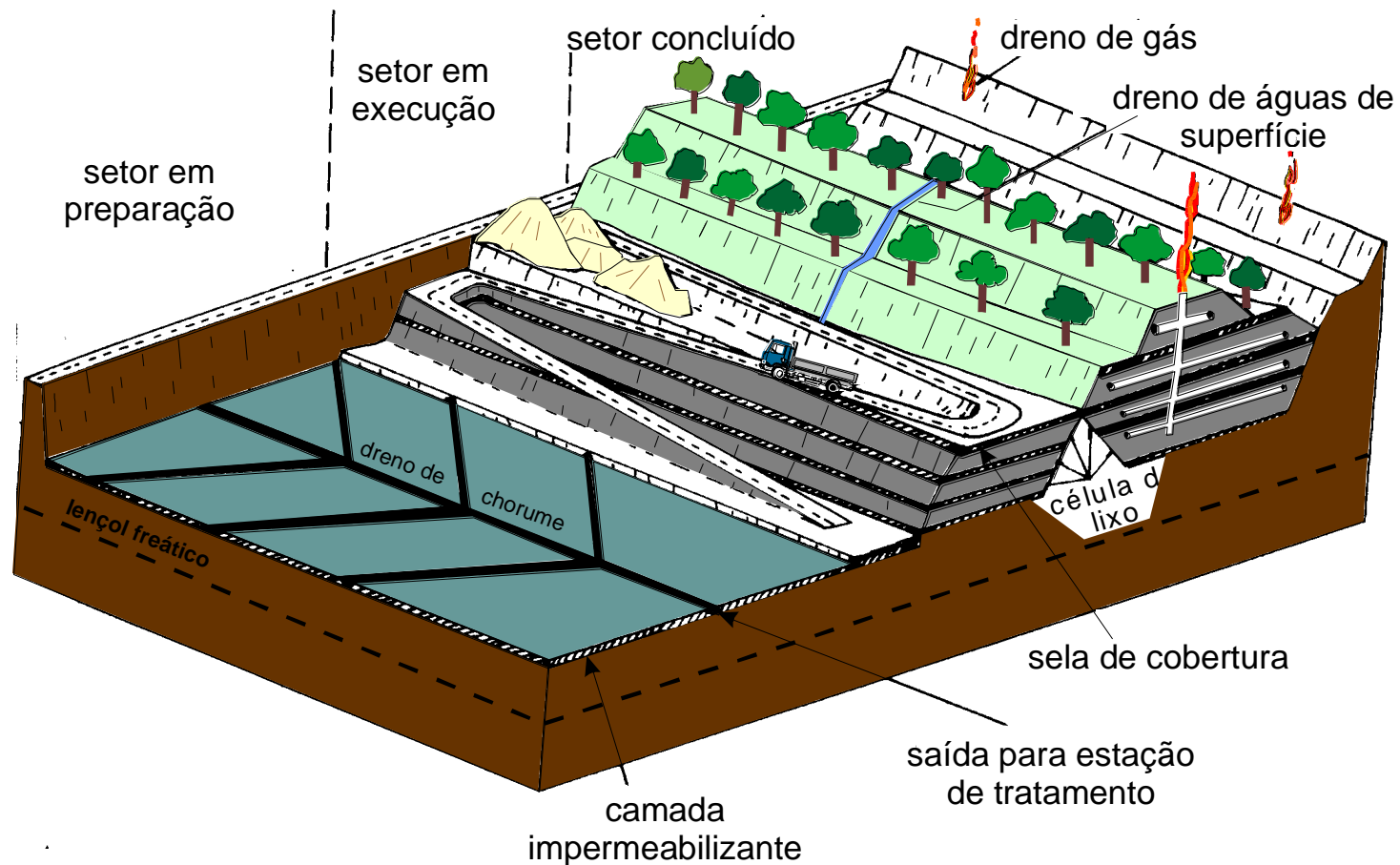
## Lixão ou vazadouro



IPT/CEMPRE. 1995. Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado.  
Publicação IPT no. 2163, Fig. 2, Pg 76.

**Local inadequado sob todos os aspectos**

# ATERRO SANITÁRIO

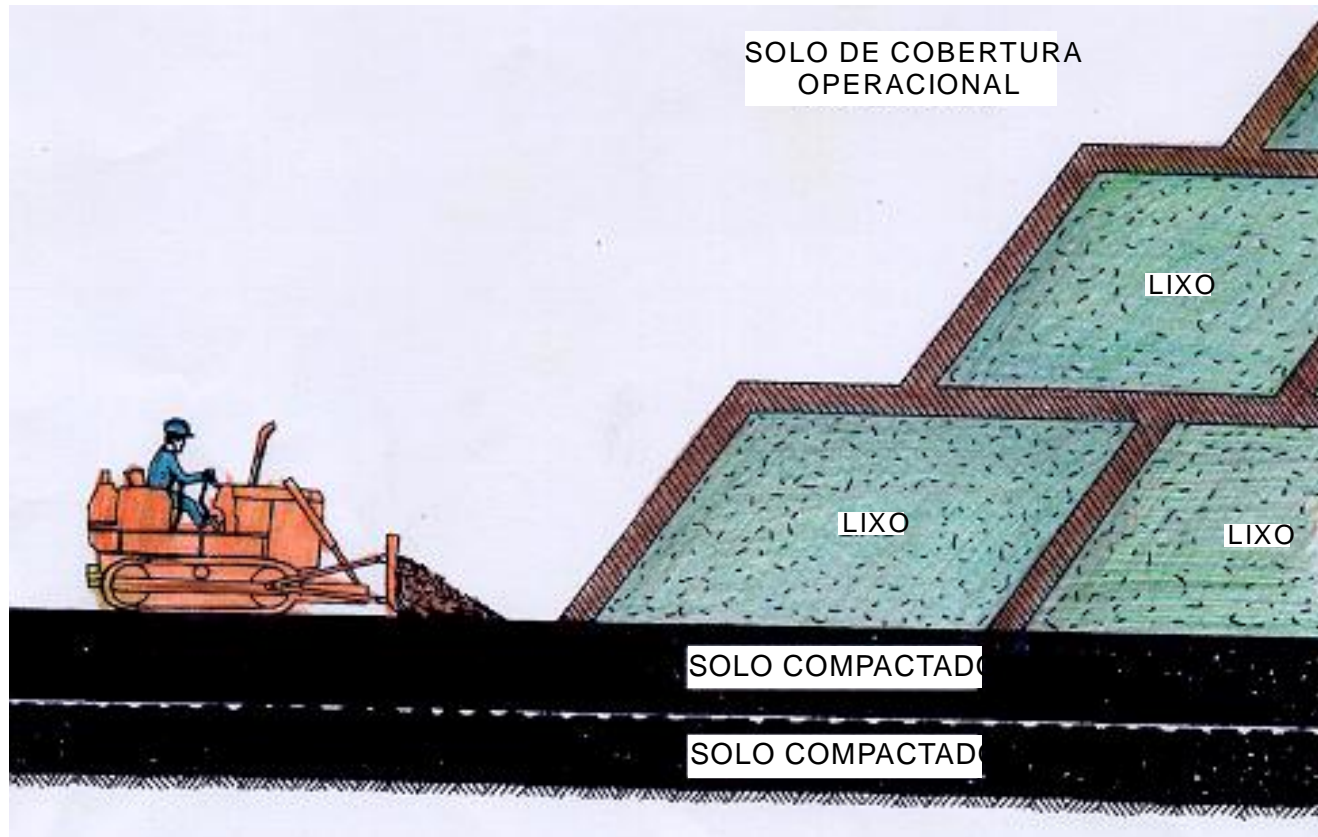


GERVASONI, S. 1991 in IPT/CEMPRE. 1995. Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado. Publicação IPT 2163. Fig. 1, Pg 75.

**Forma de disposição de resíduos instalada em local com características favoráveis e que segue normas técnicas de instalação e operação**

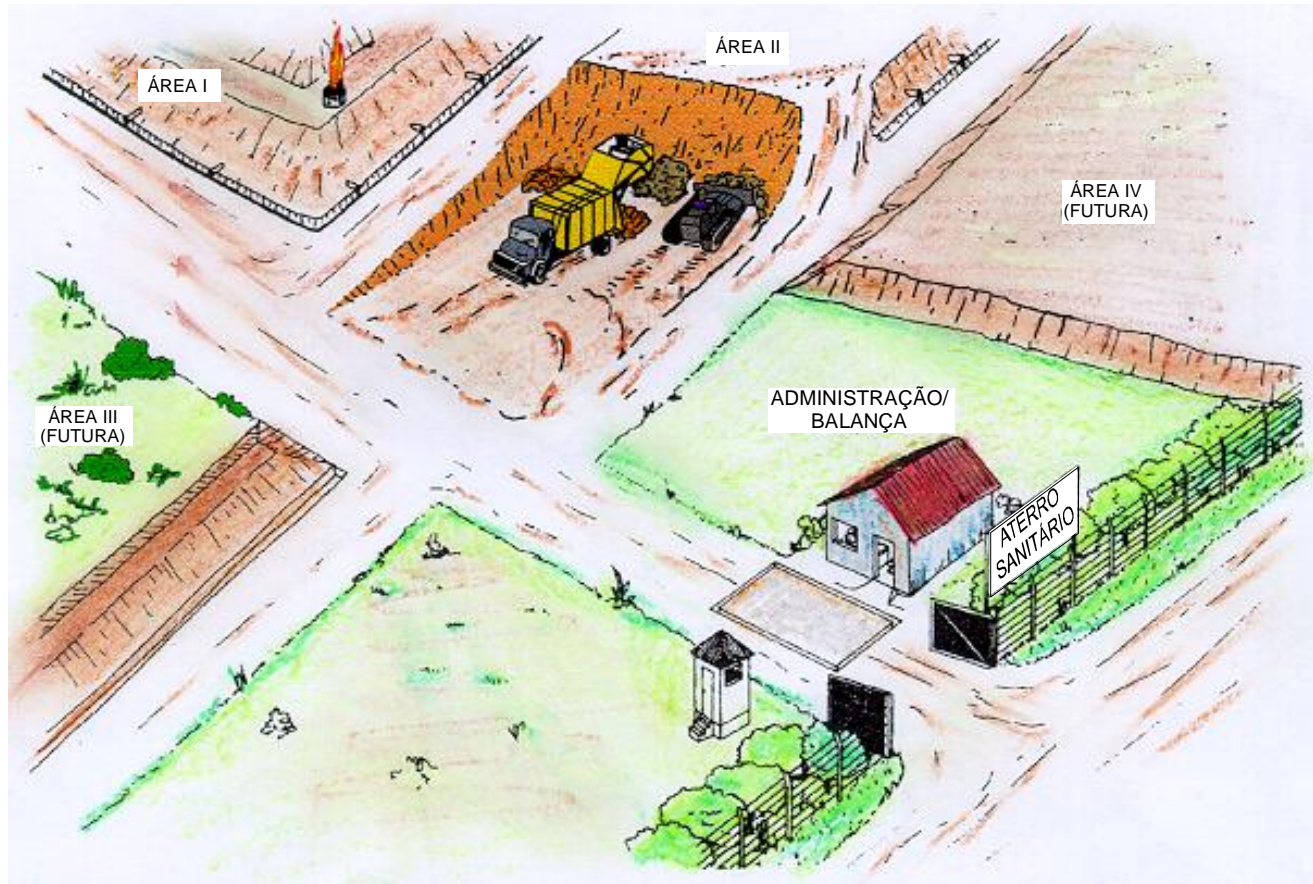


## **IMPERMEABILIZAÇÃO DA BASE (FUNDAÇÃO) DO ATERRO SANITÁRIO**

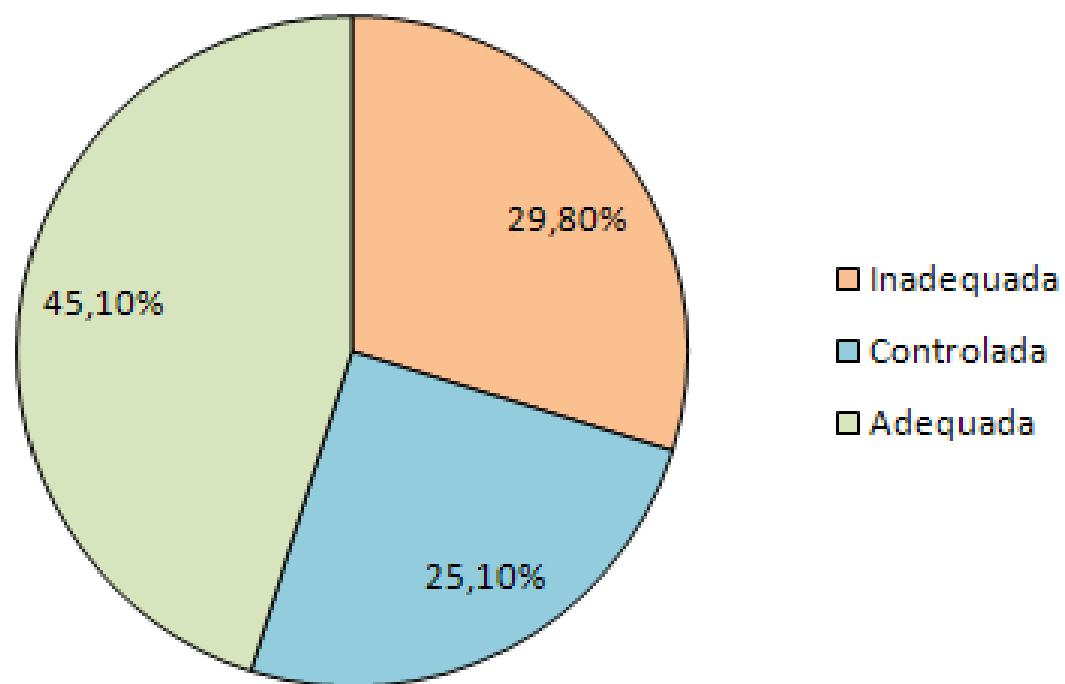


IPT/CEMPRE. 1995. Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado.  
Publicação IPT no. 2163. Fig. 9, Pg 91.

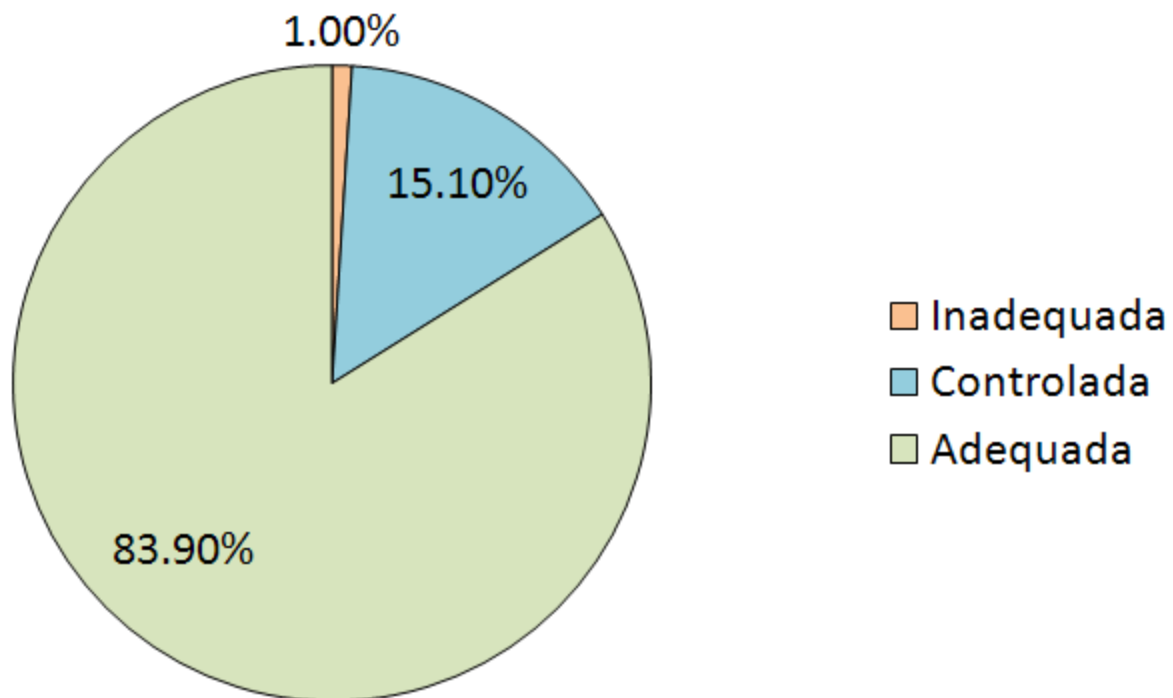
## **ASPECTOS OPERACIONAIS DO ATERRO SANITÁRIO COM CRITÉRIOS DE ÁREA, RECEBIMENTO DOS RESÍDUOS INSPEÇÕES, MANEJO ADEQUADO E COBERTURA DIÁRIA**



**Situação das áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos do Estado de São Paulo (CETESB, 2002)**



**Situação das áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos do Estado de São Paulo (CETESB, 2009)**

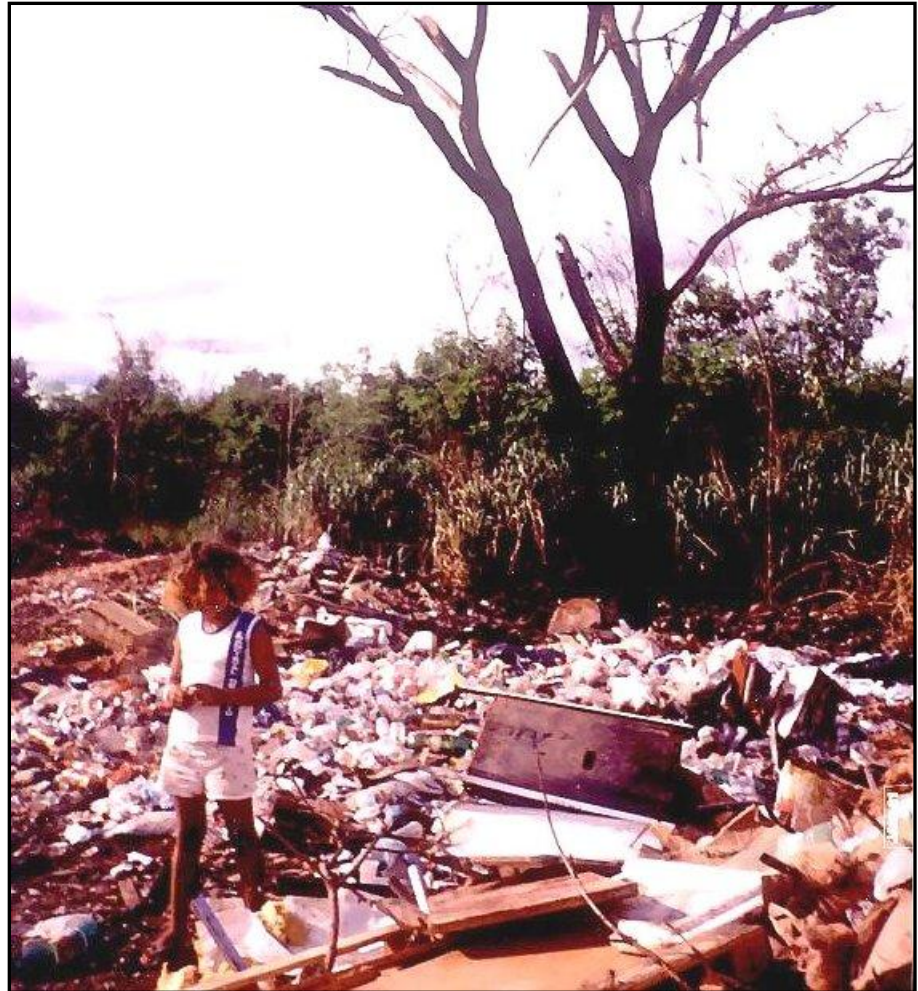




# Problemas da disposição inadequada

## **Presença de catadores**

Contato com resíduos  
perigosos e vetores de  
doenças





RESÍDUOS A CÉU ABERTO

VAZAMENTO DE CHORUME



## Contaminação de cursos d'água superficiais





## Aparência de um “Lixão”



## **Materiais dispostos inadequadamente**

Restos de animais e resíduos de  
serviços de saúde





## **Lixão - Resíduos dispostos a céu aberto**



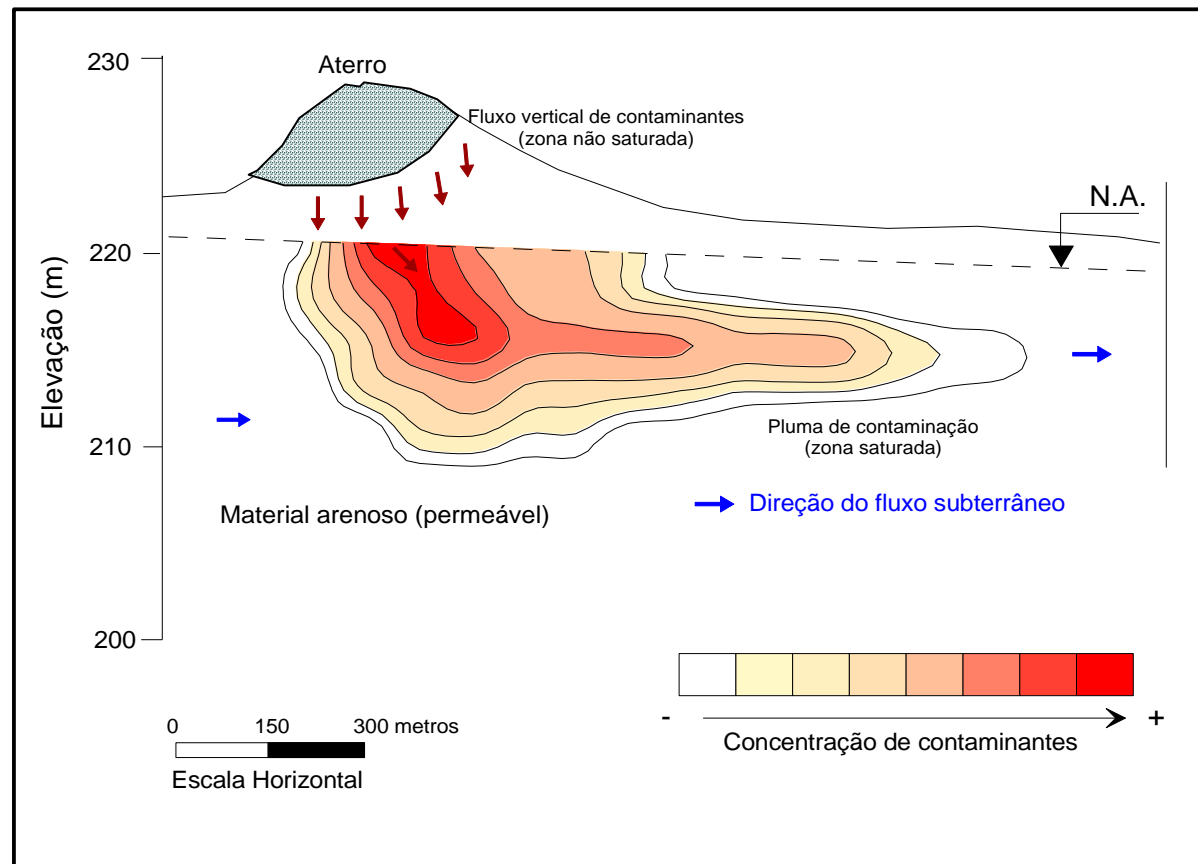
## Aparência de um “Lixão”

Vazamento de chorume para curso d'água superficial  
risco de contaminação de águas superficiais e subterrâneas



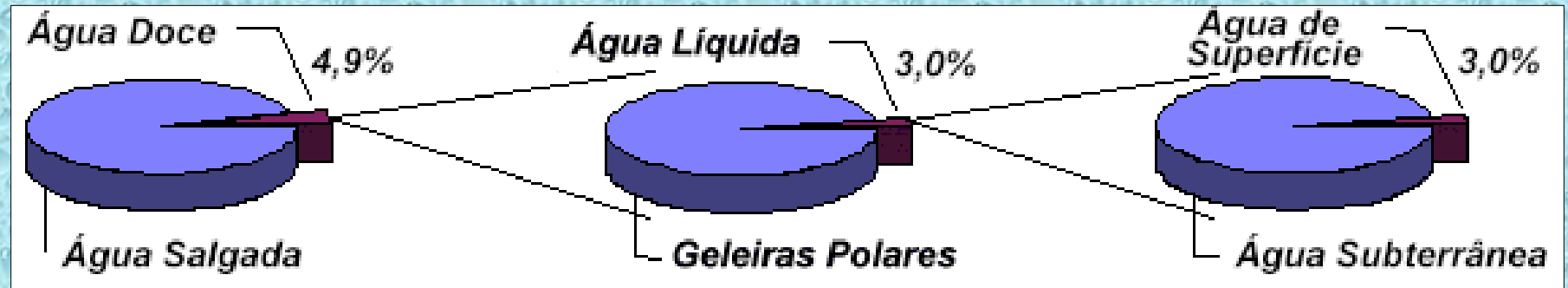
## Contaminação de águas subterrâneas

Em áreas de disposição de resíduos inadequadas a contaminação das águas subterrâneas pode ocorrer por meio da percolação de águas pluviais e outros líquidos gerados pela própria degradação dos resíduos, que por infiltração no solo sob o aterro atingem o nível d'água. O líquido derivado desse processo de percolação através dos resíduos é denominado de chorume. Esse líquido, em locais onde a colocação do lixo é feita sem observar se existem características geológicas favoráveis, pode infiltrar no solo e atingir o lençol freático, gerando uma pluma de contaminação que acompanha o fluxo das águas subterrâneas e se espalha por uma área muito maior que a ocupada pelos resíduos, causando a poluição das águas.





# Distribuição da Água no Planeta Terra



# **Importância das Águas Subterrâneas**

- 1) Reserva estratégica para o abastecimento populacional a nível mundial.**
- 2) Grande parte das águas de superfície estão poluídas, devidos aos impactos de minerações, refinarias e lixões.**
- 3) As águas subterrâneas estão mais protegidas da poluição, são geralmente de boa qualidade para o consumo humano, sem necessidade de tratamentos especiais.**

## Parâmetros físico-químicos de percolados (chorumes) de aterros sanitários de São Paulo

Parâmetro	Valores	Parâmetro	Valores
pH	5,9 - 8,7	P total	3,7 - 14,3 mg/l
Sólidos totais diss.	3100 - 26300 mg/l	Fe	2 - 6000 mg/l
N amoniacal	6 - 2900 mg/l	Cu	0,01 - 1,2 mg/l
Nitrito	0 - 0,04 mg/l	Pb	0 - 2,3 mg/l
Nitrato	0,03 - 5,53 mg/l	Zn	0,12 - 35,6 mg/l
DBO (5 dias, 20°C)	480 - 19800 mg/l	Mn	0,09 - 26 mg/l
DQO	966 - 2800 mg/l	Cd	0 - 0,2 mg/l
Cl <sup>-</sup>	50 - 11000 mg/l	Cr Hexav.	0,01 - 0,014 mg/l
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	0 - 1800 mg/l	Cr total	0,01 - 3,85 mg/l

Fonte: Boian (1993)

# Localização de “Plumas” de Contaminação

Metodos Geofisicos: Elétricos e Eletromagnéticos

→ Método da Eletrorresistividade

# Método da Eletorresistividade.

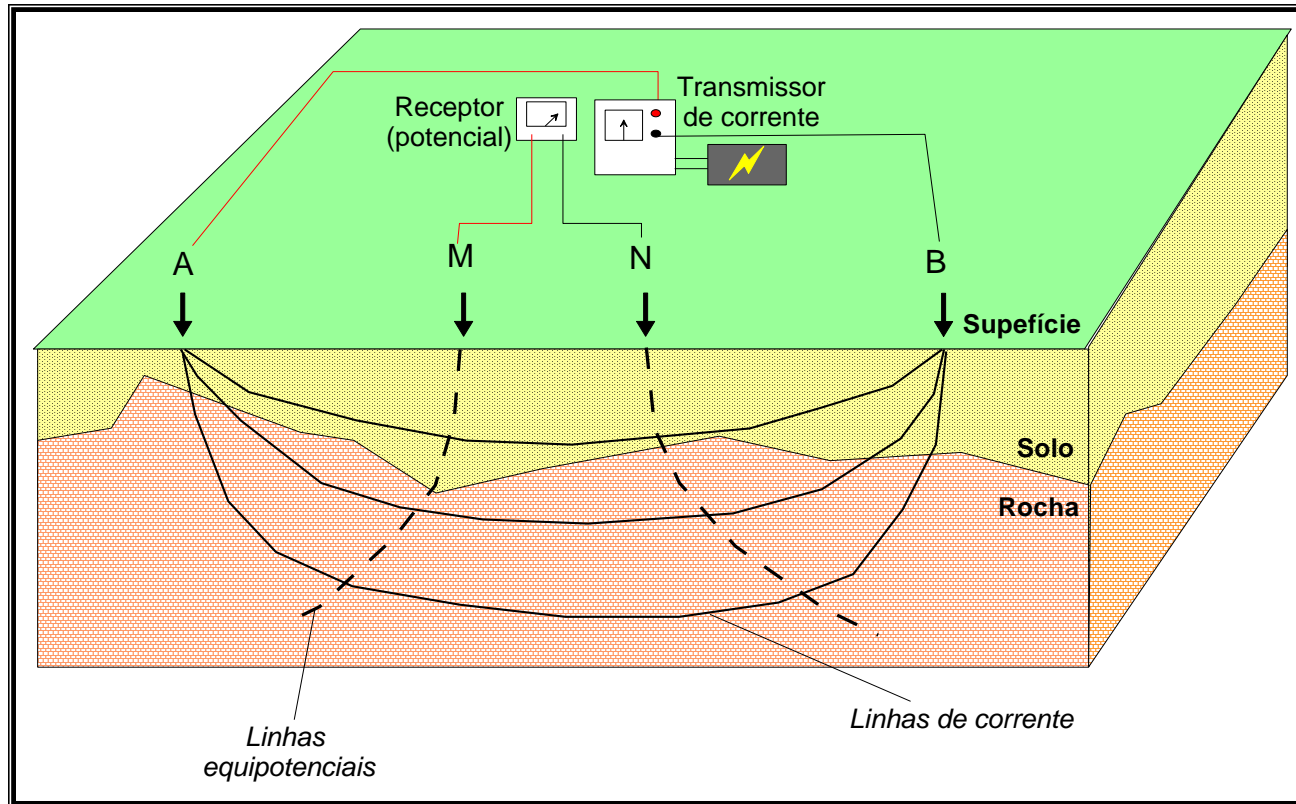
O que é o método da eletorresistividade?

É um método de prospecção elétrica que usa o parâmetro físico resistividade (o inverso da condutividade elétrica) para investigar indiretamente alvos geológicos de interesse.

Esse método utiliza uma **corrente elétrica** artificial que é introduzida no terreno através de dois eletrodos (denominados de **A** e **B**), com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos (denominados de M e N) nas proximidades do fluxo de corrente, permitindo assim calcular a resistividade real ou aparente em subsuperfície

Profundidade de investigação depende da abertura entre **eletrodos de corrente** e potência do equipamento - varia de alguns metros até centenas de metros

# Princípios do método



Os valores de corrente são lidos na unidade de transmissão em mA e os potenciais gerados no meio são lidos na unidade de recepção em mV. Utilizando um fator K que é função do arranjo geométrico dos eletrodos a resistividade elétrica  $\rho$  pode ser calculada.

$$\rho = K \cdot \Delta V / I \text{ (}\Omega \cdot \text{m)}$$



# Princípios do método

A resistividade elétrica (e seu inverso, a condutividade elétrica) relacionam-se aos mecanismos de propagação de corrente elétrica nos materiais.

**Condutividade eletrônica** - é devida a presença de minerais metálicos e grafita (condutores) na rocha

**Condutividade eletrolítica** - é devida ao deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras dos solos e rochas.

Em geral, a condutividade é eletrolítica, pois apenas em casos específicos os minerais condutores ocorrem em rochas em quantidades suficientes para aumentar sua condutividade global.

A resistividade dos solos e rochas que possuem condutividade eletrolítica é afetada principalmente por quatro fatores:

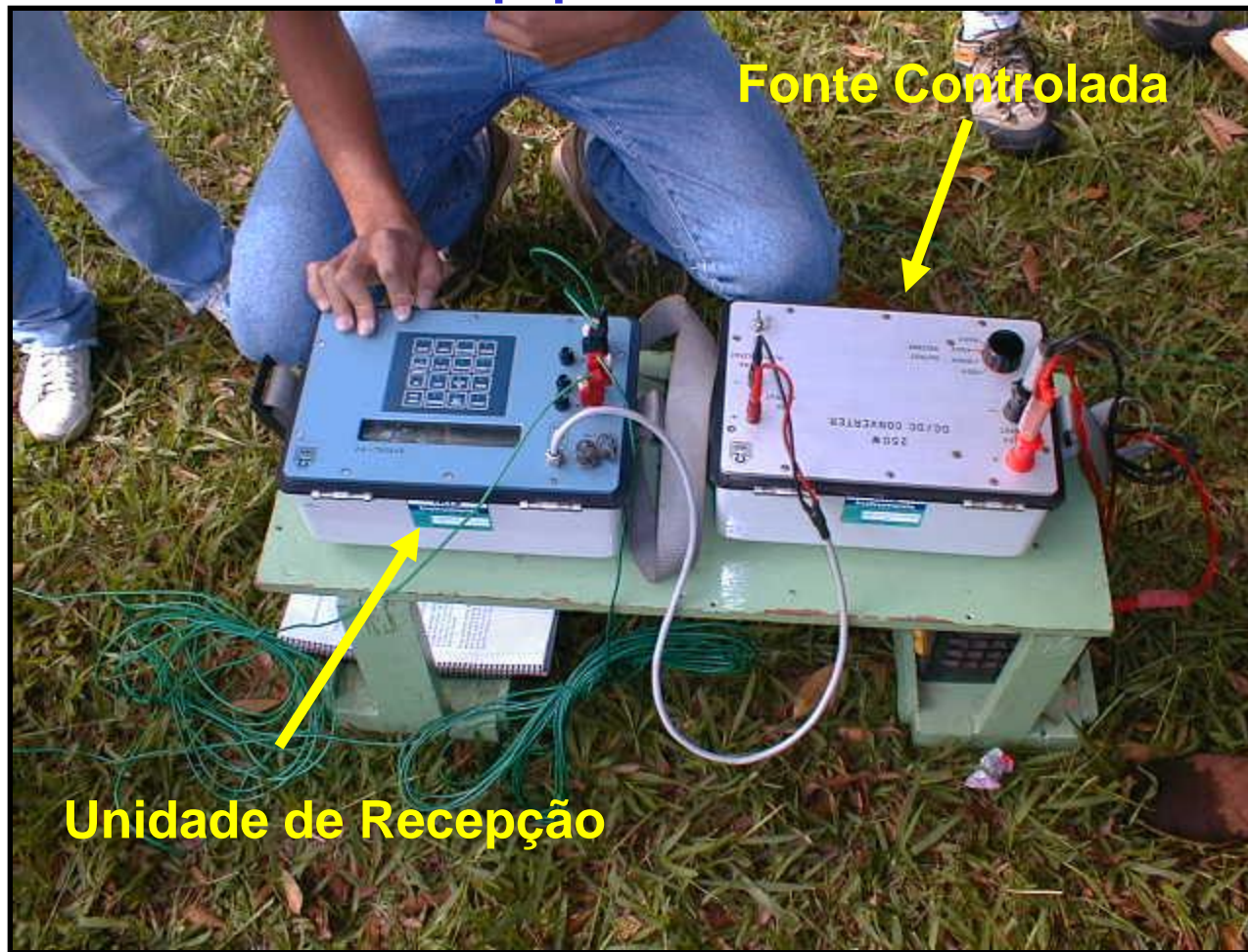
- composição mineralógica;
- porosidade;
- teor em água;
- quantidade e natureza dos sais dissolvidos.

# Princípios do método

Dentre os fatores que afetam a resistividade, os mais importantes são, sem dúvida, a quantidade de **água** contida e a **salinidade** dessa água. O aumento do valor desses fatores, teor de umidade e quantidade de sais dissolvidos, leva a uma diminuição dos valores de resistividade. Devido a essa série de fatores, o parâmetro resistividade varia entre largos limites, mesmo para um único tipo de rocha, como pode ser observado na tabela ao lado

Material	Resistividade (ohm.m)
ar	$\infty$
→ águas doces superficiais	$10 - 10^3$
→ águas marinhas	0,2
argilas	$10 - 10^2$
→ areias	$10^2 - 10^4$
→ areia saturada com água mineral	$10^{-1} - 10$
aluvião	$10 - 10^3$
conglomerados	$10 - 10^4$
arenitos	$10 - 10^8$
margas arenosas	$10 - 10^2$
calcários	$10^2 - 10^4$
basaltos	$10^2 - 10^5$
granitos	$10^2 - 10^5$
xistos	$10 - 10^3$
gnaisses	$10^2 - 10^4$

## Equipamento

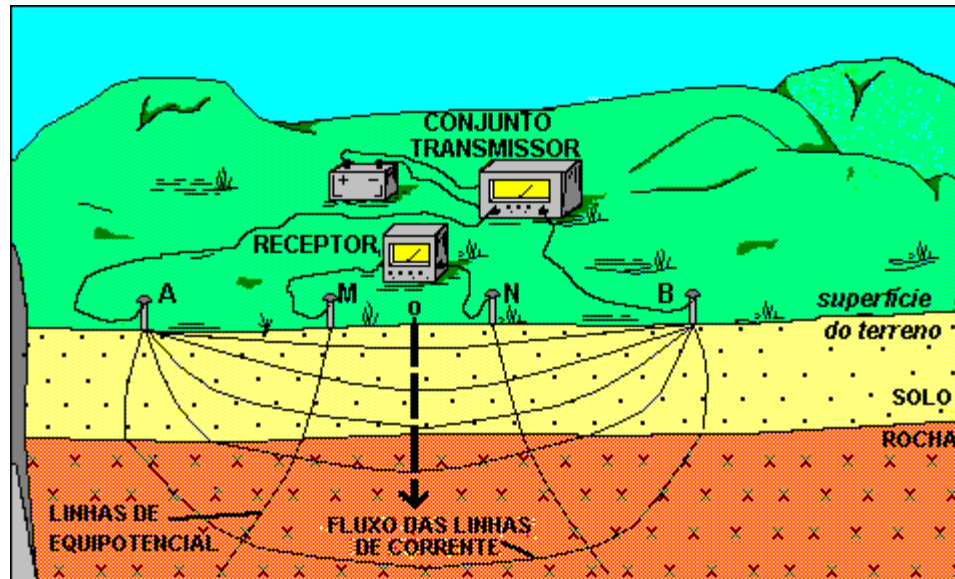


Equipamento Syscal R2, composto por uma fonte controlada de corrente elétrica e unidade de recepção para leitura de potencial.

# Ensaio de Campo - Sondagem Elétrica

Existem duas formas principais de aplicações dos ensaios no campo - sondagem elétrica e caminhamento elétrico.

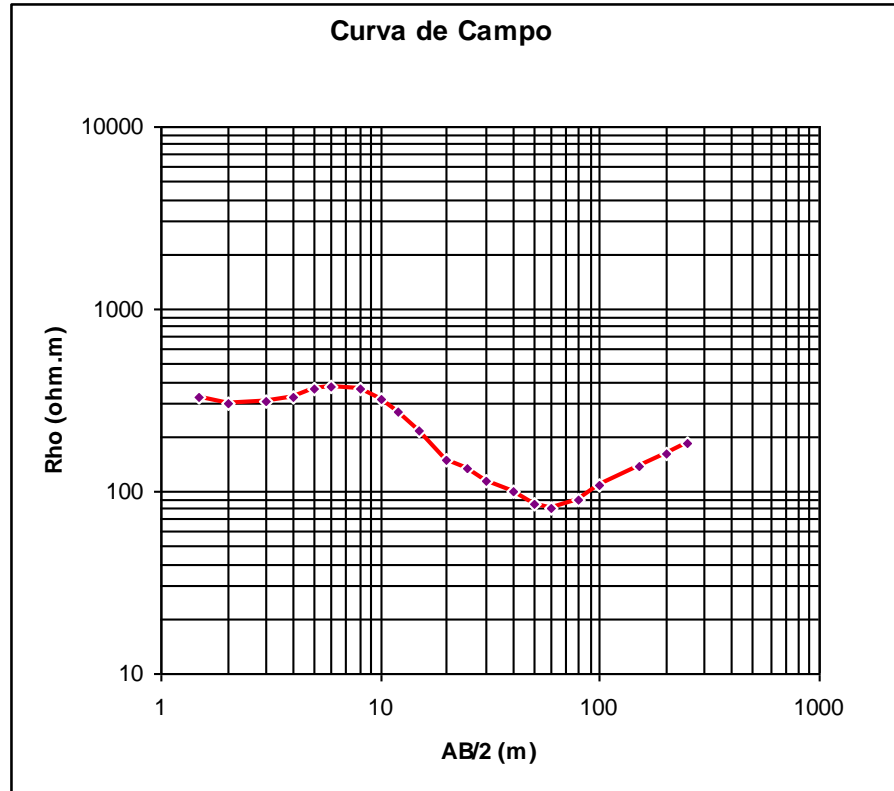
Os ensaios de sondagem elétrica são aplicados quando é desejada uma informação pontual com observação da variação vertical da resistividade. Na prática é escolhido o ponto de interesse e o ensaio é conduzido com o afastamento sucessivo dos eletrodos de corrente, possibilitando assim que a corrente penetre profundidades cada vez maiores.



# Ensaio de Campo - Sondagem Elétrica

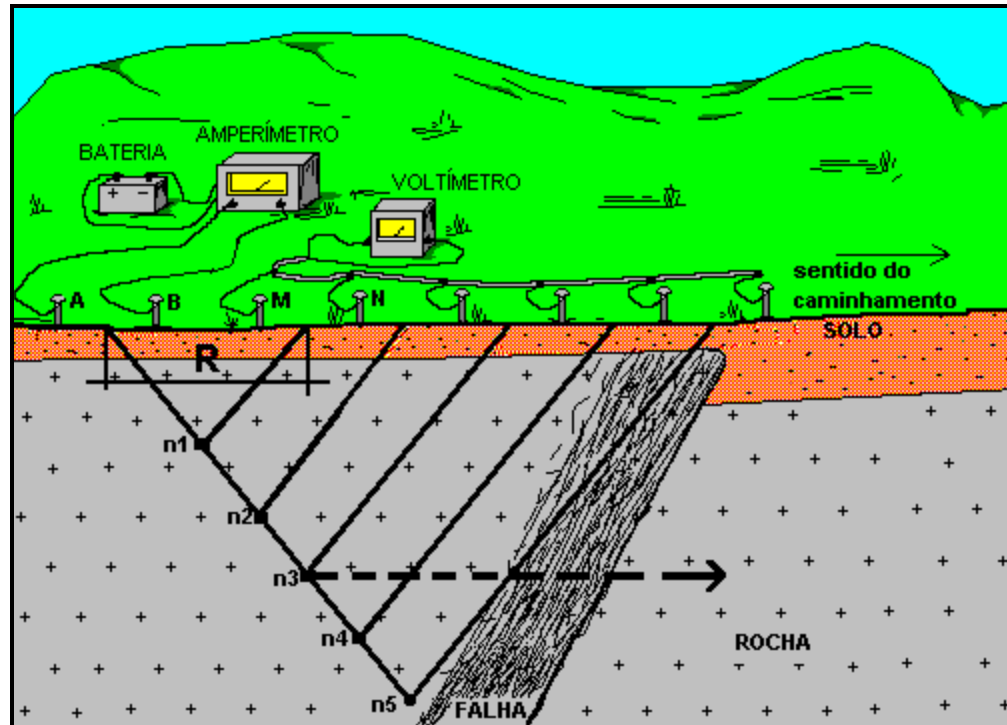
Os valores de resistividade lidos em cada estação de medida (diferentes posições dos eletrodos AB) são plotados em um gráfico bi-log em função da metade da distância AB investigada.

Esse gráfico é chamado de **curva de sondagem elétrica**, que através de softwares apropriados é interpretada, fornecendo os valores de resistividade e espessura dos estratos investigados, que são, então relacionados a materiais geológicos.



## Ensaio de Campo - Caminhamento Elétrico

O caminhamento é aplicado quando o interesse é pelo estudo da variação lateral da resistividade em profundidade teoricamente constante. A figura mostra um esquema do ensaio de caminhamento dipolo-dipolo, que permite a investigação da variação lateral de resistividade em 5 níveis teóricos.

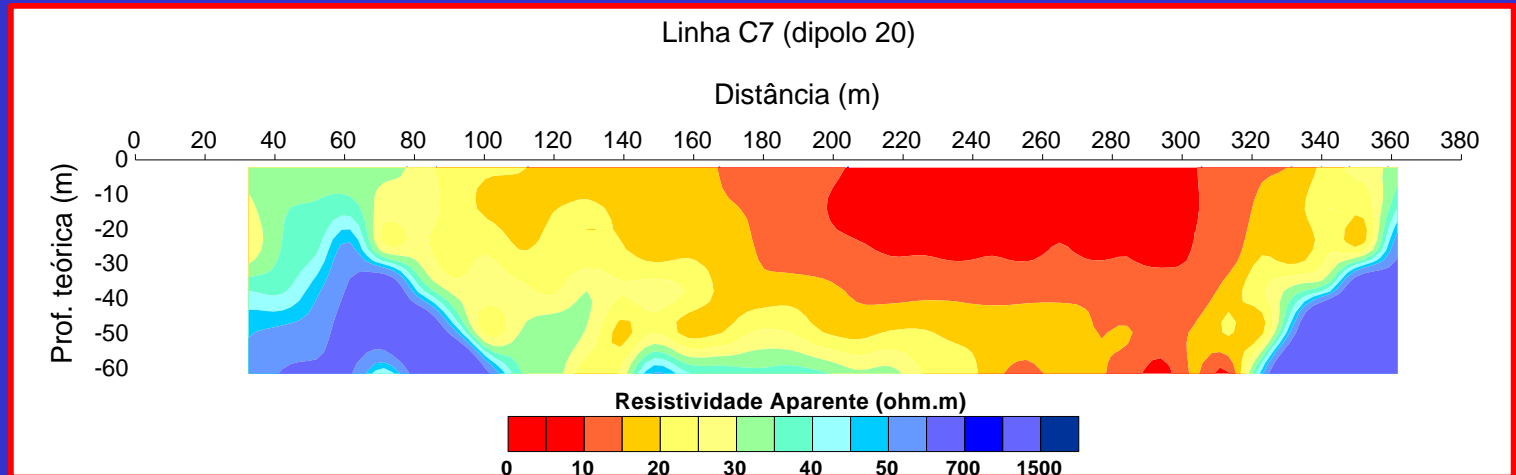




# Método da Eletrorresistividade

Variação lateral de  
resistividade

Caminhamento Elétrico  
(2D)

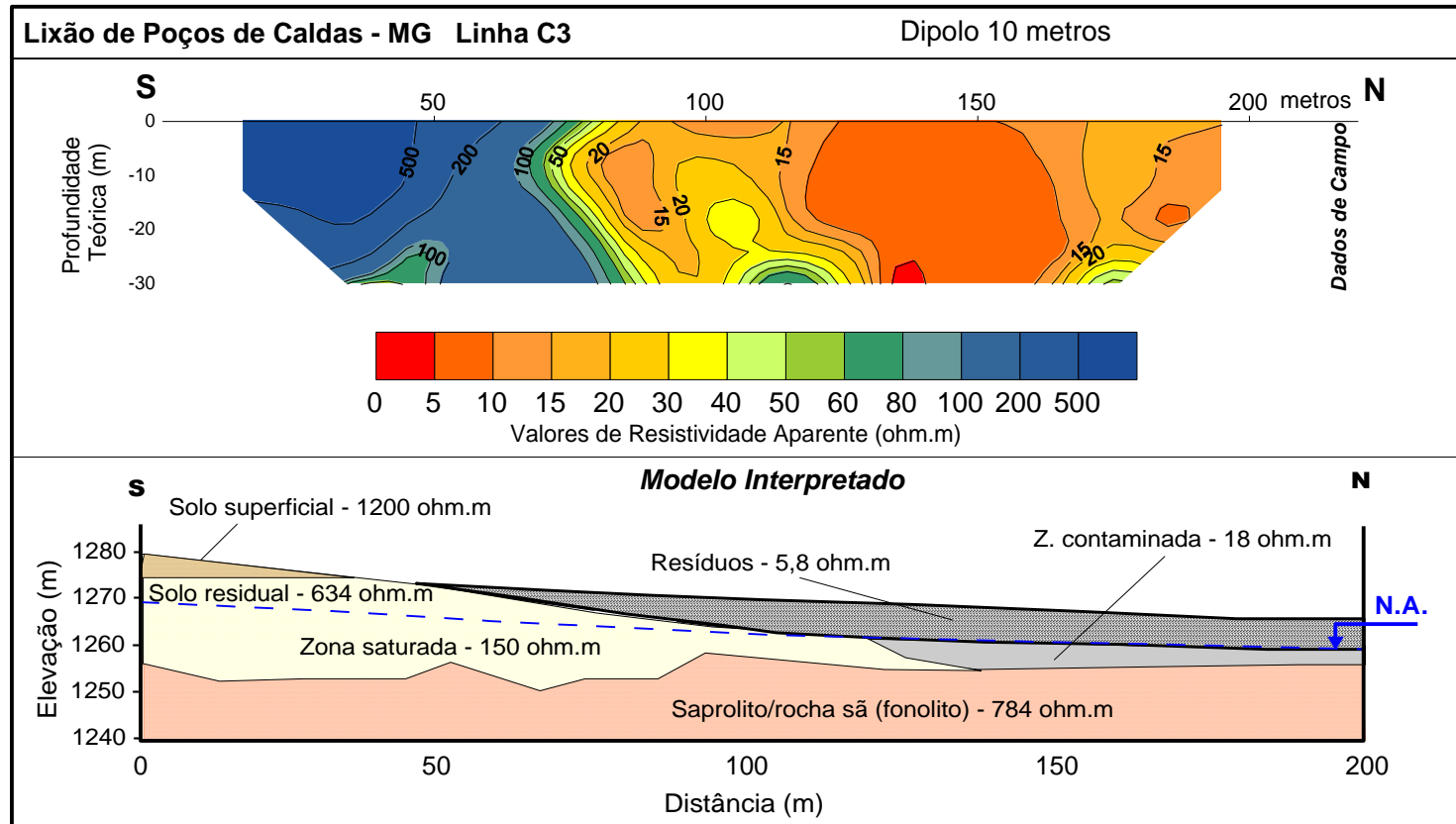


# Ensaio de Campo - Caminhamento Elétrico

## Interpretação quantitativa

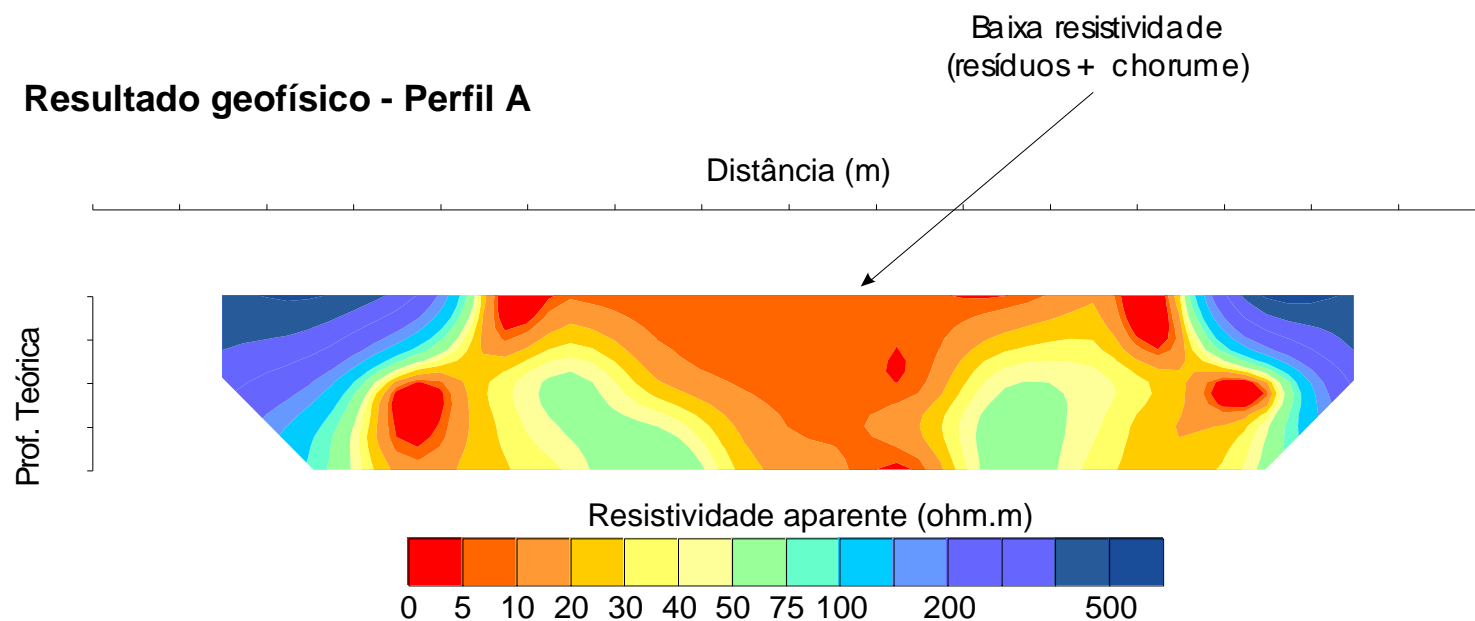
Até pouco tempo atrás, somente a técnica de sondagem elétrica vertical, tinha disponíveis “softwares” para interpretação quantitativa.

Atualmente - **Modelagem 2D** de seções de resistividade aparente

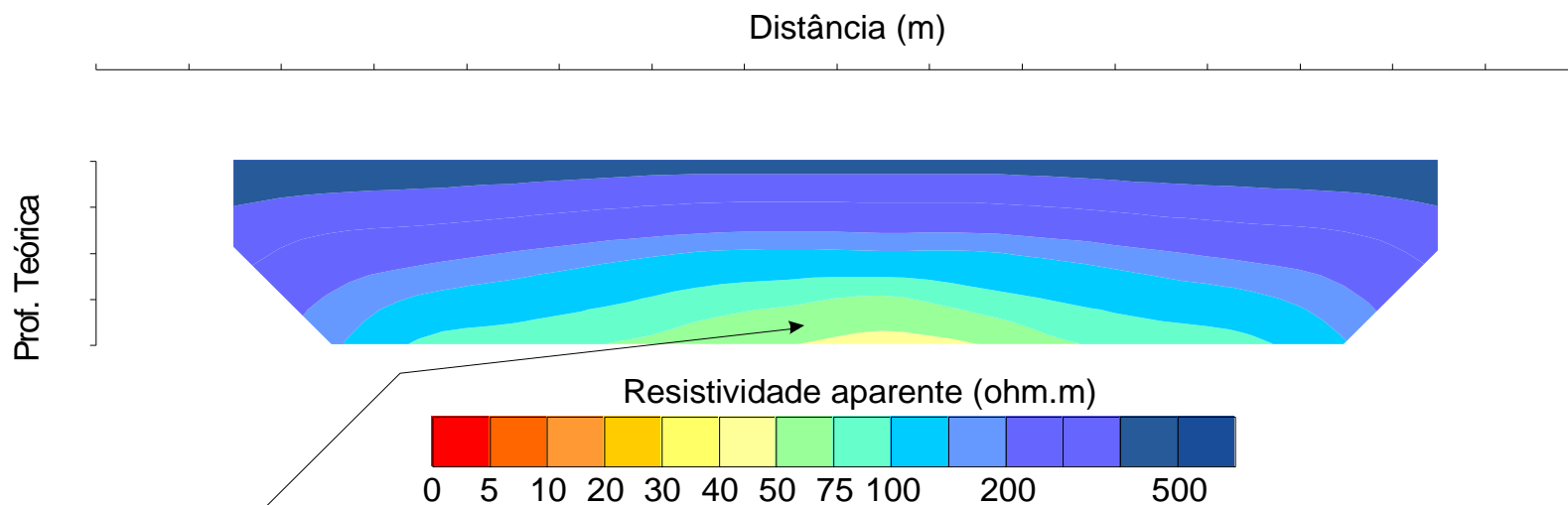


Identificação de corpos e estruturas geológicas com mais detalhe.

## Resultado geofísico - Perfil A



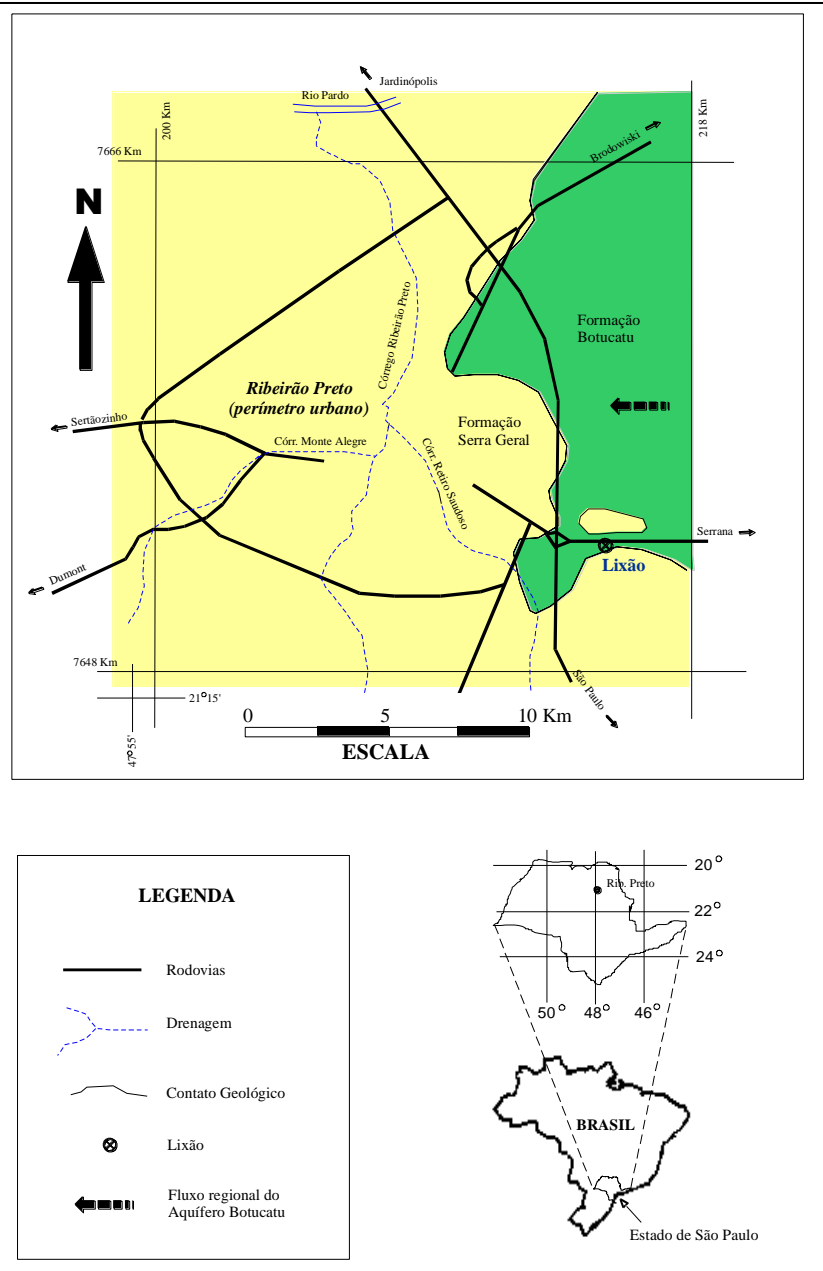
## Resultado geofísico - Perfil B



Diminuição da resistividade devido  
à pluma de contaminação

## Estudo de Caso - Lixão Desativado em Ribeirão Preto

Área de disposição de resíduos urbanos instalada diretamente sobre arenitos permeáveis da Formação Botucatu. Esse tipo de substrato rochoso, aliado a uma forma de disposição de resíduos inadequada, possibilita a infiltração de chorume no solo, podendo atingir a zona saturada.



## Lixão Desativado em Ribeirão Preto

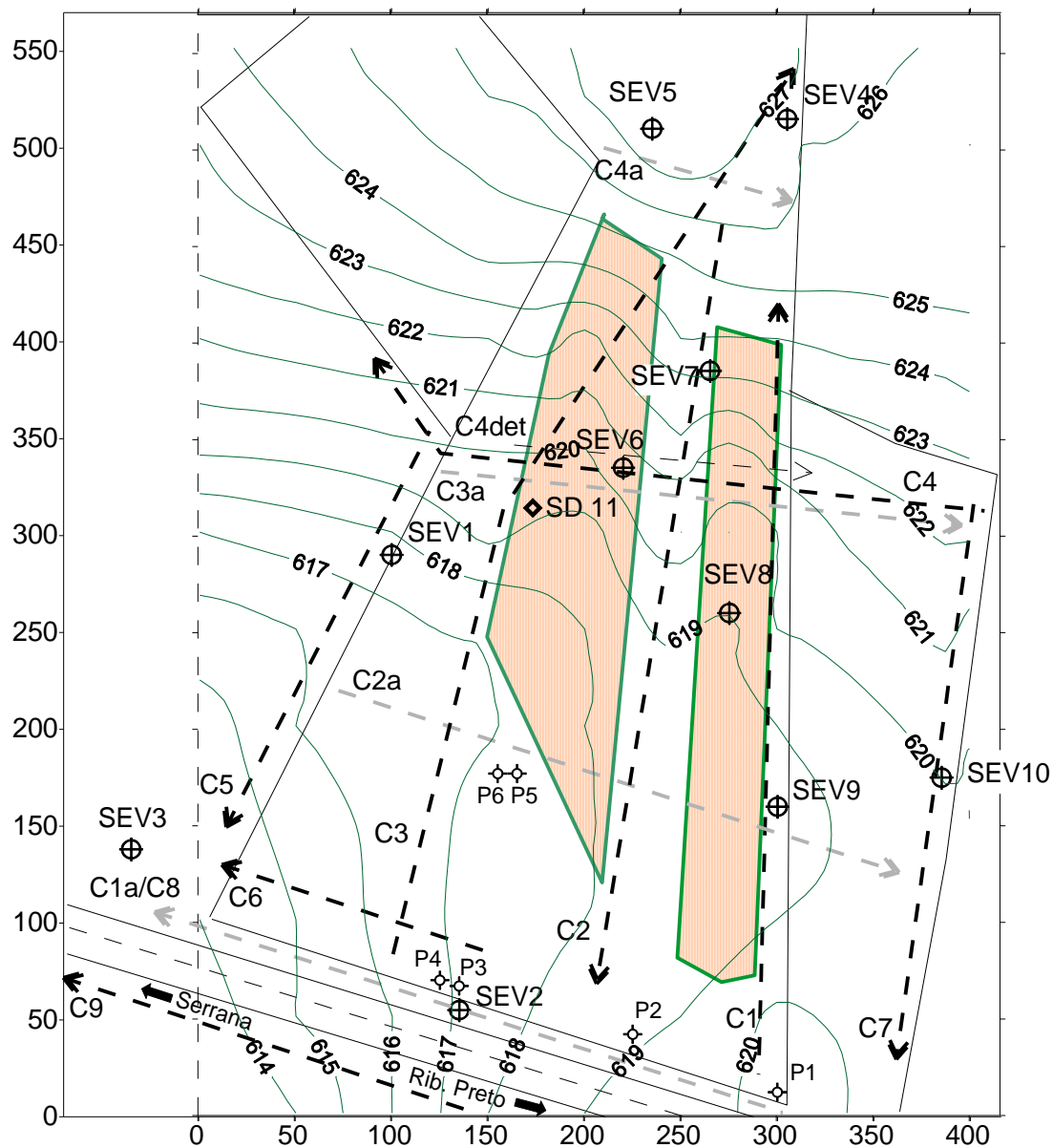


- Borda da cava preenchida com resíduos
- Notar o recalque na área dos resíduos



- Chorume aflorando em uma das cavas

# Lixão Desativado em Ribeirão Preto - Mapa de localização dos ensaios



## Legenda:

Cavas preenchidas com resíduos

Linha de Caminhamento Elétrico (D=10m)

Linha de Caminhamento Elétrico (D=20m) e IP (D=10m)

Linha de CE detalhe (espaço/o 2 m)

Sondagem Elétrica Vertical

Sondagem Dipolar

Poços de monitoramento

Obs. As setas indicam o sentido das linhas de caminhada elétrica

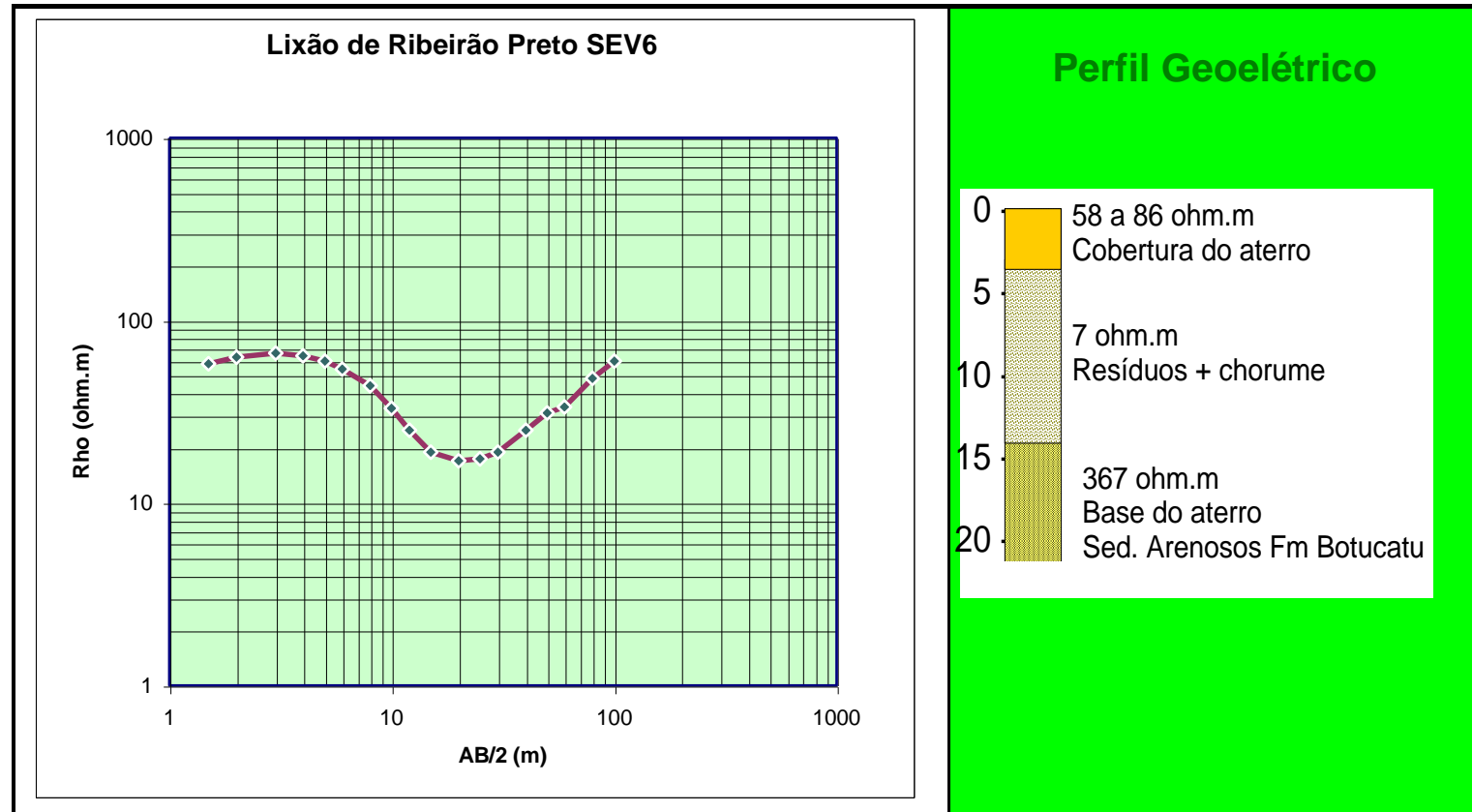


Escala Gráfica (metros)



# Lixão Desativado em Ribeirão Preto

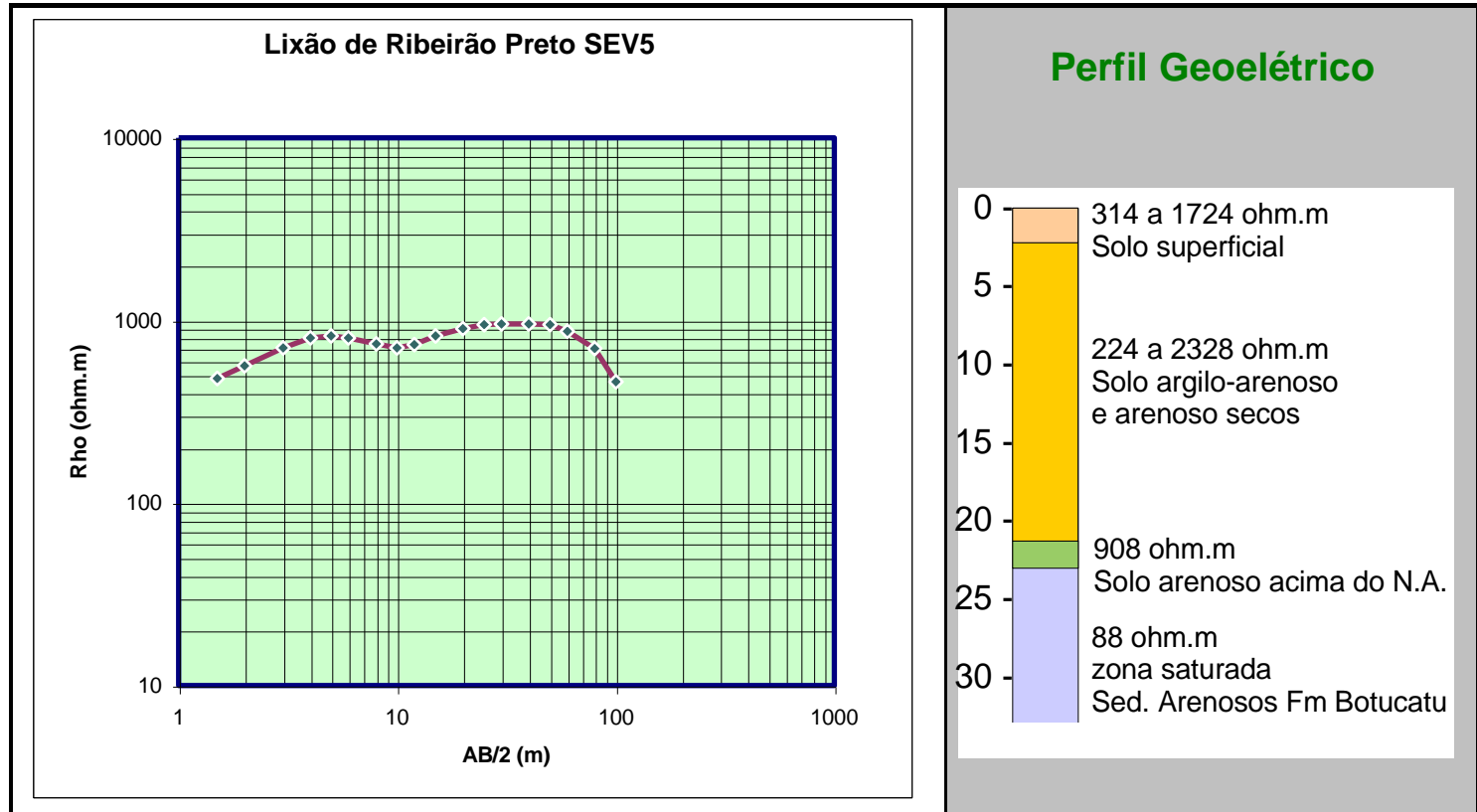
## Estrutura do aterro e espessura da camada de resíduos - SEVs





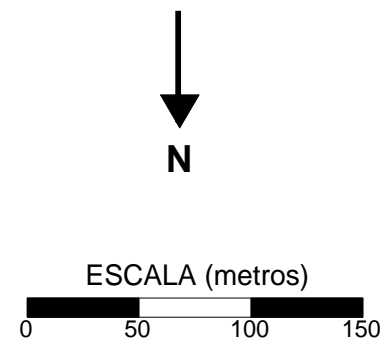
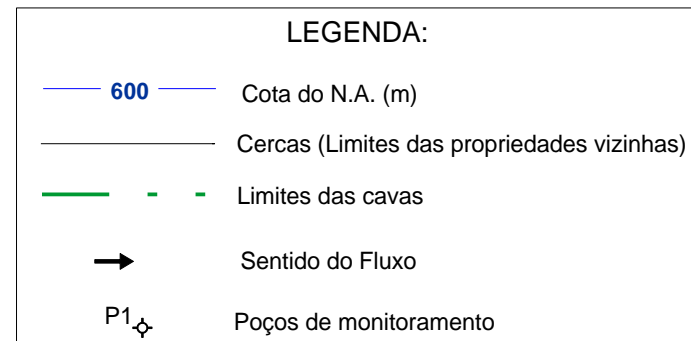
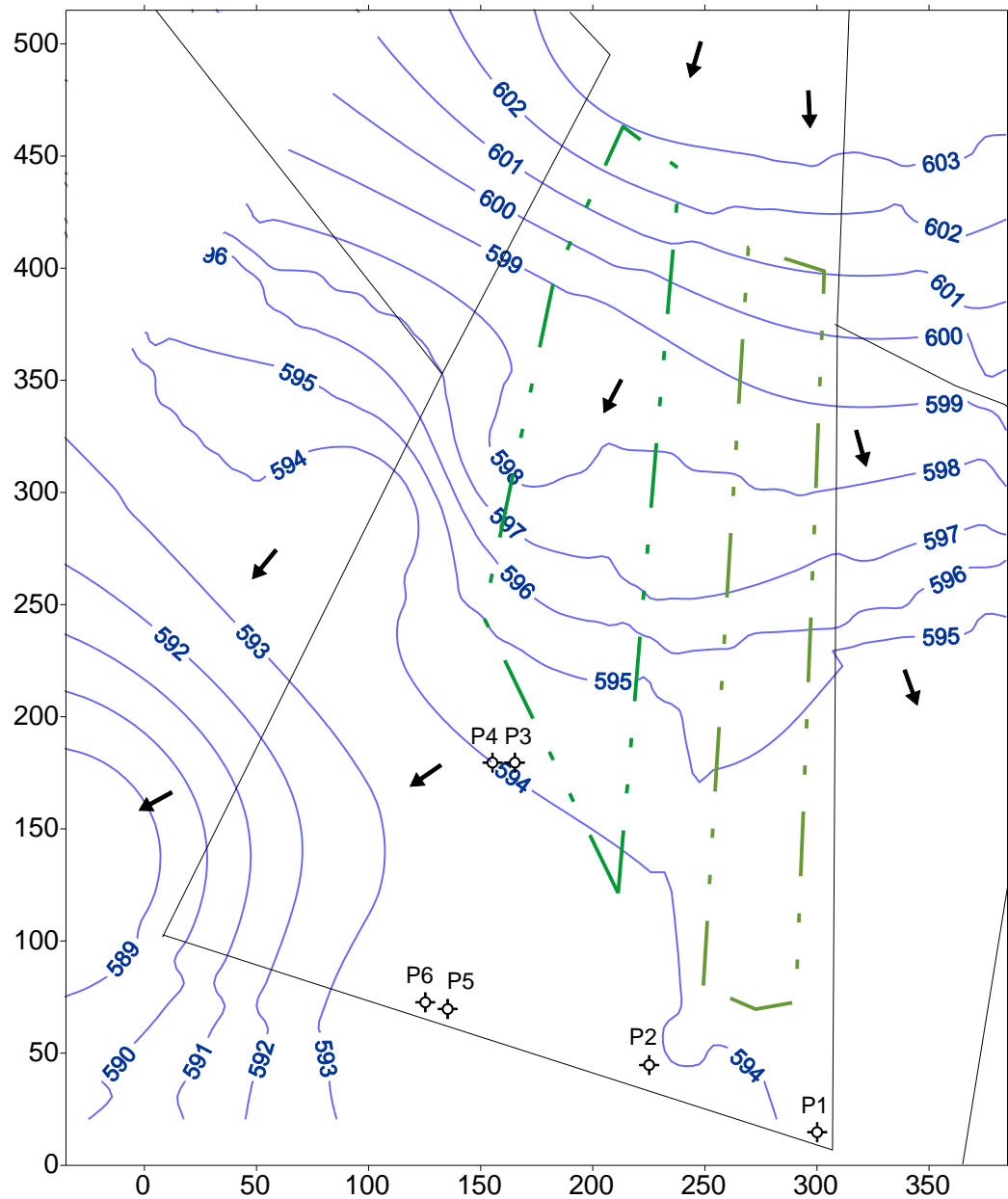
# Lixão Desativado em Ribeirão Preto

## Perfil vertical do solo e profundidade da zona saturada - SEVs



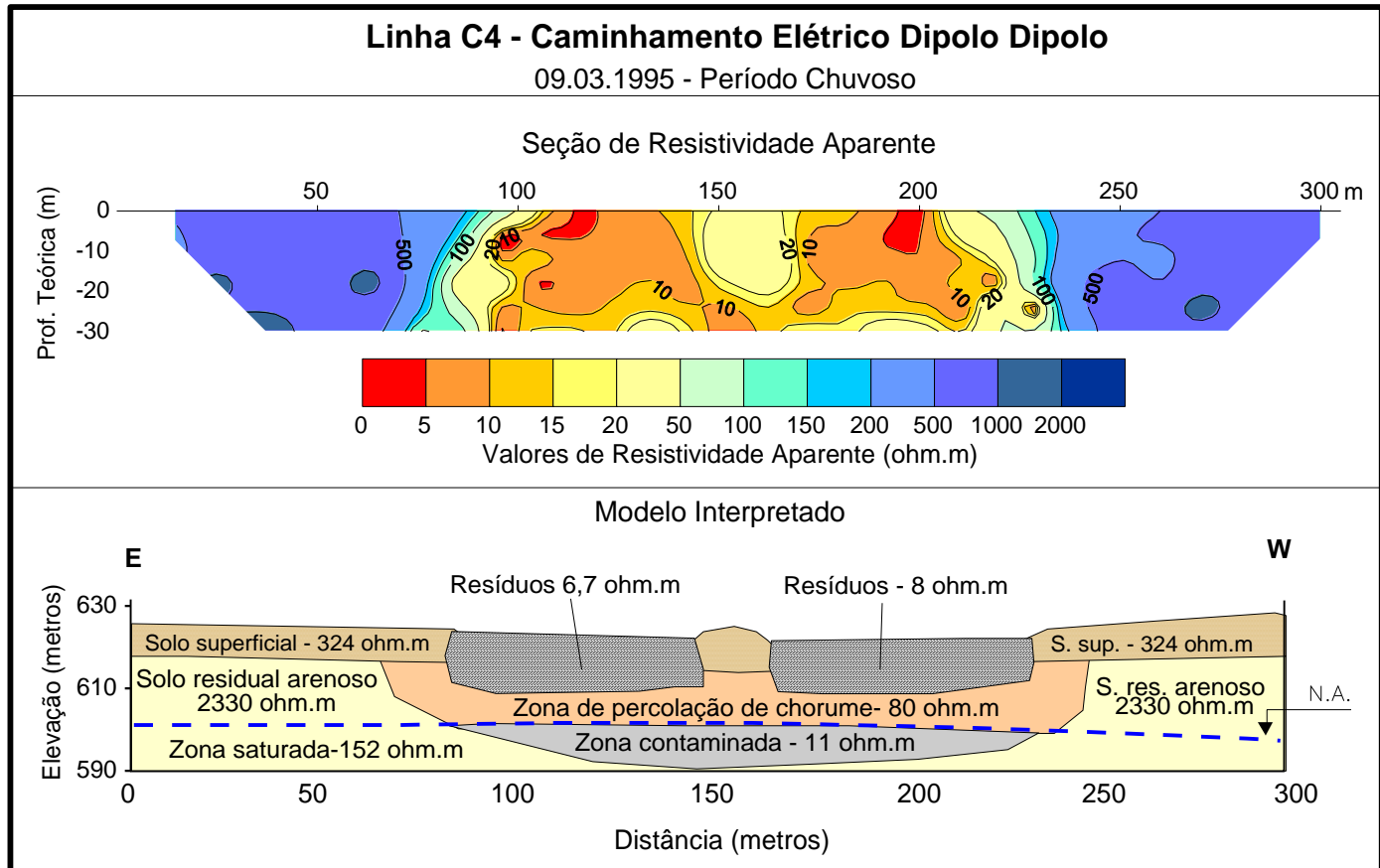


# Lixão Desativado em Ribeirão Preto - Mapa de fluxo subterrâneo



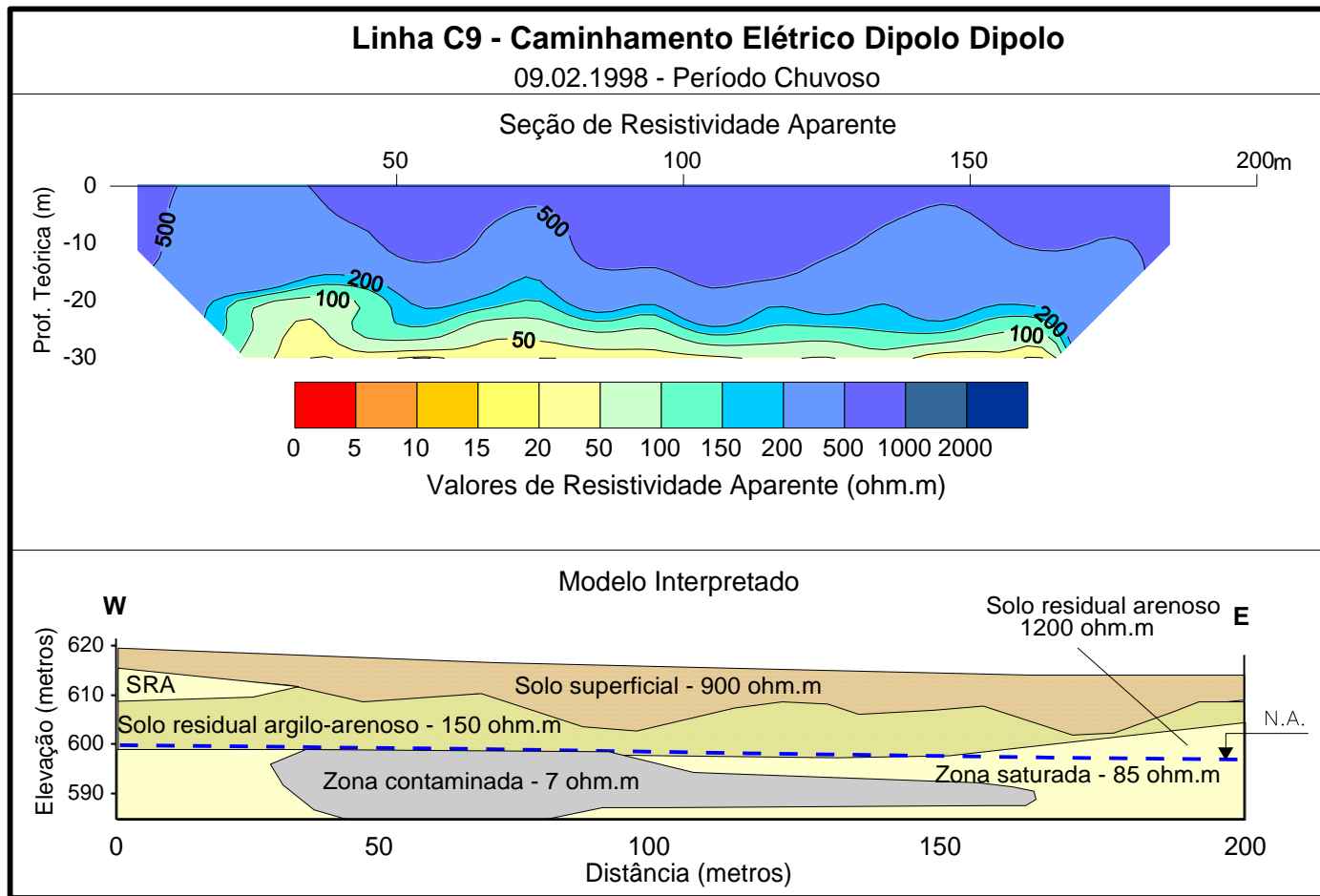
# Lixão Desativado em Ribeirão Preto

CE dipolo-dipolo - Delimitação da estrutura do aterro,  
profundidade da zona saturada e estudo da contaminação



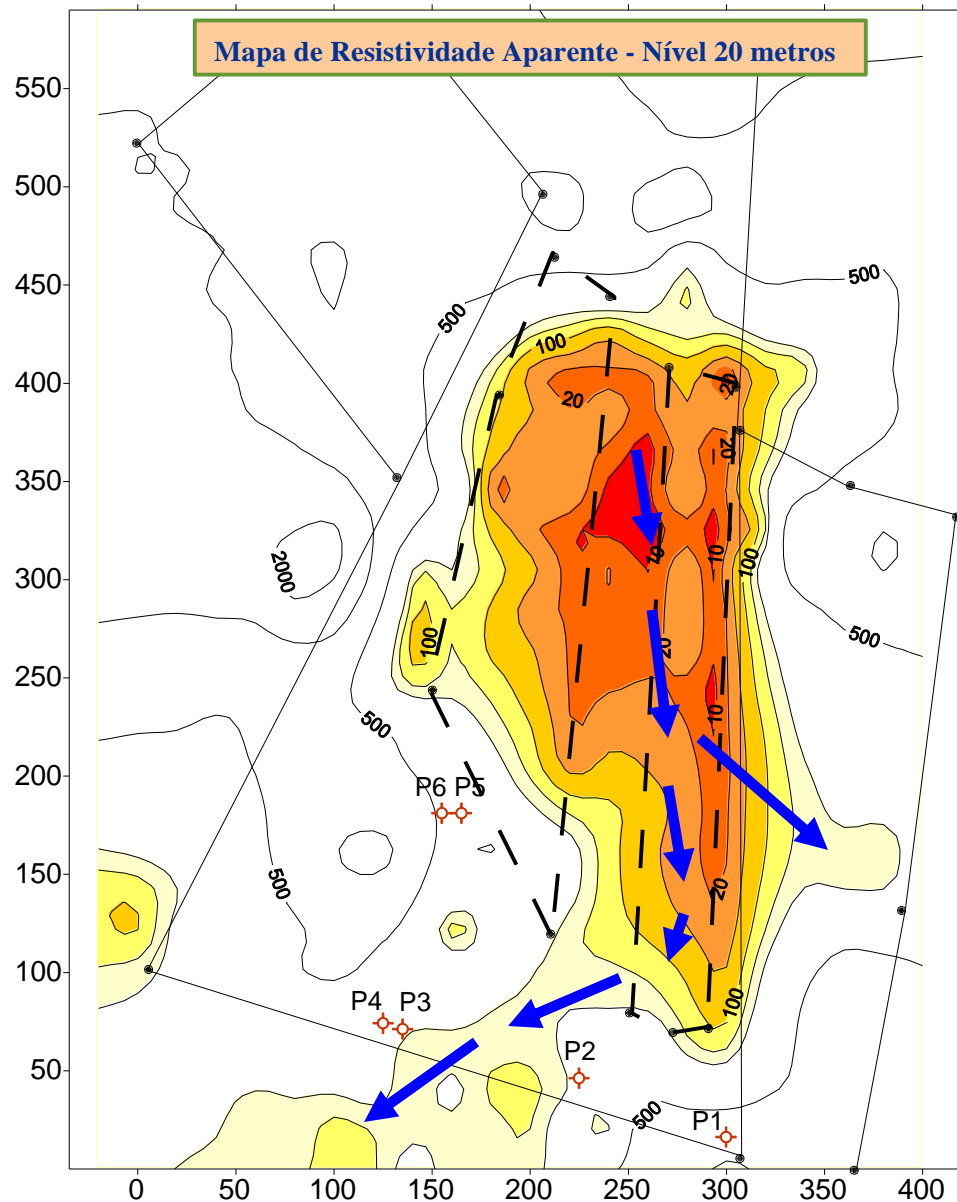
# Lixão Desativado em Ribeirão Preto

CE dipolo-dipolo - Determinação da profundidade da zona saturada e estudo da contaminação

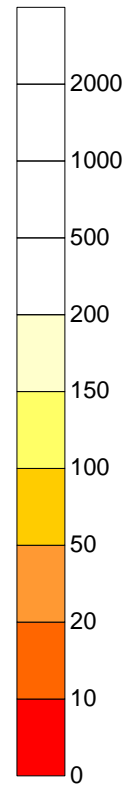


# Lixão Desativado em Ribeirão Preto

Mapeamento do formato e extensão da pluma de contaminação



Rho Aparente  
(ohm.m)

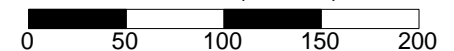


## LEGENDA

- — — Limites das Cavas
- Limites das propriedades vizinhas
- P1 Poços de Monitoramento

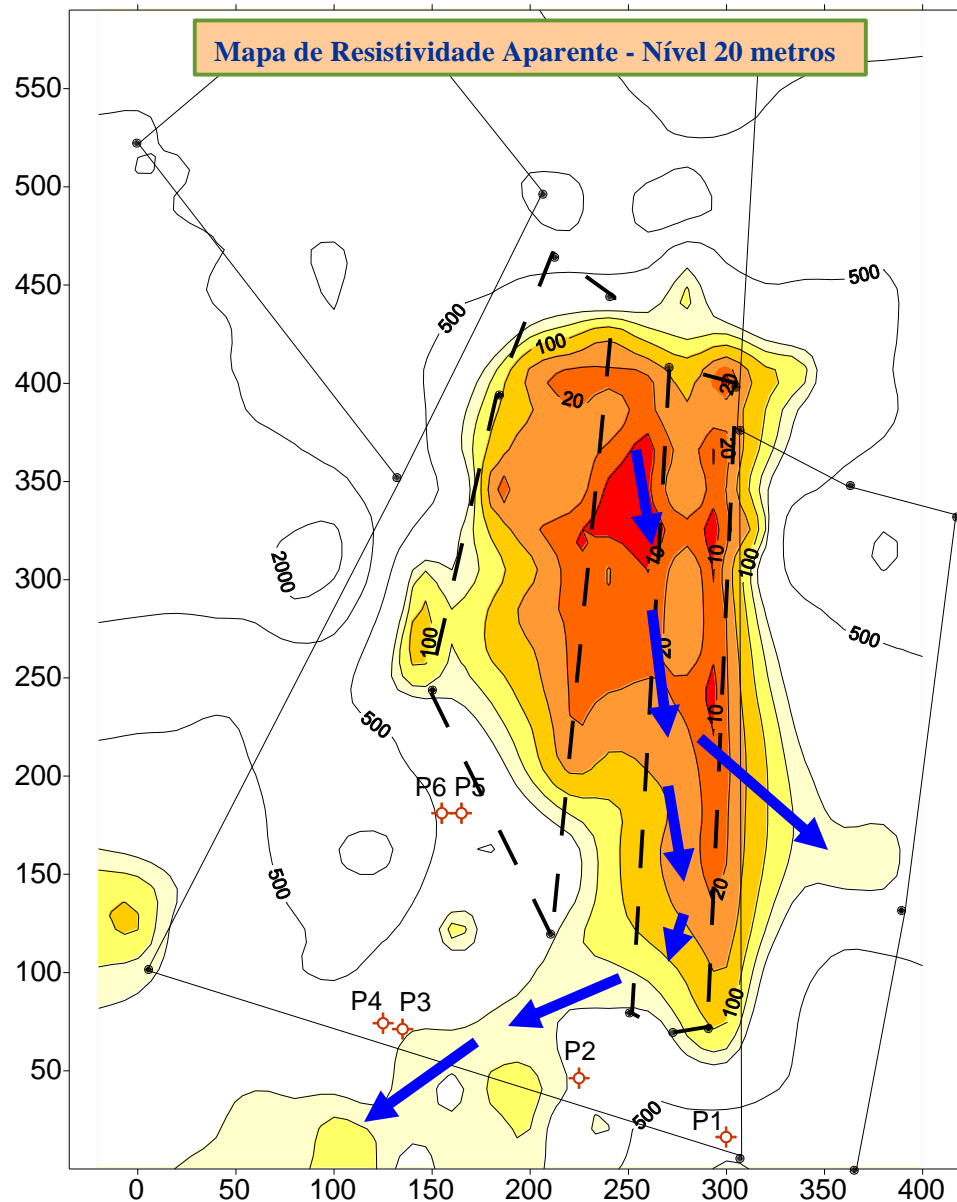


ESCALA (metros)

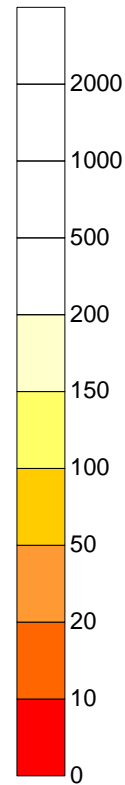


# Lixão Desativado em Ribeirão Preto

Mapeamento do formato e extensão da pluma de contaminação



Rho Aparente  
(ohm.m)

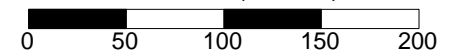


## LEGENDA

- — — Limites das Cavas
- Limites das propriedades vizinhas
- P1 Poços de Monitoramento



ESCALA (metros)



**F I M**