



Emprego de métodos geofísicos na caracterização geoambiental do aterro controlado de Piracicaba/SP

Walter Malagutti Filho. Departamento de Geologia Aplicada, UNESP-Rio Claro. e-mail: malagutti@rc.unesp.br
Helyelson Paredes Moura. Universidade Federal do Amapá. e-mail: helyelson@unifap.br

Copyright 2003, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents any position of the SBGF, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

This paper reports the results of a geophysical research in the waste disposal area located at Piracicaba- SP. The main objectives were: to characterize the structure the structure of the waste disposal, to determine the depth of the water table and the direction of the groundwater flow.

The regional geology is characterized by the Corumbatai Formation which consist of sandy and argilous sediments of the Parana Sedimentary Basin

Vertical electrical sounding (VES) and electrical profiling were used in an integrated way by the measure of resistivity and induced polarization data. As a final product were obtained a potentiometric map of the area and a uni-bidimensional geoelectric models of the waste disposal.

Introdução

A disposição dos resíduos industriais e domésticos em áreas utilizadas como depósito final de lixo – normalmente representadas pelos “lixões” e aterros controlados – pode trazer sérias conseqüências ambientais, em particular sobre a qualidade das águas subterrâneas adjacentes. A infiltração e a percolação das águas pluviais através desses depósitos provoca a migração de vários compostos químicos orgânicos e inorgânicos através da zona não saturada, colocando assim em risco a mesma e portanto contaminar as águas subterrâneas.

Devido ao fato desses depósitos geralmente não possuem impermeabilização com camadas de argila ou geomembranas que servem como base dos resíduos, os mesmos constituem-se em fontes potenciais de contaminação do solo e das águas subterrâneas. Nas últimas décadas, têm sido crescentes, tanto no Brasil como no exterior, pesquisas com o objetivo de caracterizá-los em subsuperfície por meio de métodos geofísicos elétricos e eletromagnéticos de exploração (MOURA, 2002; MALAGUTTI et al., 1997; BUSELLI et al., 1992).

O aterro da cidade de Piracicaba-SP, existe a cerca de 25 anos, e nenhuma barreira geotécnica vertical ou de base foi instalada para o encapsulamento dos resíduos. O tipo de resíduos depositados a céu aberto, antes de tornar-se controlado, não difere dos materiais encontrados em outros aterros situados nas cidades

brasileiras, consistindo de resíduos originados nas residências, estabelecimentos comerciais, serviços hospitalares, entulhos e até de origem industrial.

Neste trabalho apresentam-se os resultados da aplicação integrada dos métodos eletrorresistividade e da polarização induzida (IP-domínio do tempo) na caracterização e análise geoambiental da área do aterro controlado da cidade de Piracicaba-SP.

Geologia e aspectos geotécnicos do local

O solo ao redor e sobre a qual está assentado o aterro de Piracicaba foi originado a partir das rochas sedimentares da porção superior da Formação Corumbataí, consistindo de siltitos argilosos e argilitos, pertencente à Bacia sedimentar do Paraná.

No aterro controlado durante os períodos das chuvas (novembro e dezembro de 1992) e de estiagem (julho e agosto de 1994) foram executadas várias sondagens a trado, com amostradores tipo cunha, das quais nota-se que (HEITZMANN Jr., 1999):

- O solo maduro (M) apresenta na região uma espessura entre 0,4 e 0,8 m, constituído de material siltoso a argiloso e com pouca areia.
- O solo residual jovem (SRJ) é constituído de uma matriz siltosa, bastante arenosa e pouco argilosa, com diferentes quantidades de areia. Em todo o perfil de solo, encontram-se fragmentos de dimensões variadas dos siltitos arroxeados da Formação Corumbataí.
- O horizonte rocha alterada (R) mostra grande quantidade de fragmentos de rocha. Os mesmos encontram-se em uma matriz arenosa e permeável, que permite o fluxo das águas subterrâneas. O topo rochoso é atingido a profundidades entre 5 e 12 m;
- A permeabilidade do solo ao redor do aterro apresenta-se baixa da ordem de 10^{-8} . Quanto a análise mineralógica, realizada por meio de difratometria de raios X, identificou-se como componentes principais, quartzo e caulinita.

Metodologia geofísica

No presente trabalho foram empregados os métodos geofísicos eletrorresistividade (ER) e a polarização elétrica induzida (IP). A eletrorresistividade baseia-se no fato de que as rochas, em função de suas composições mineralógicas, texturais e disposições, apresentam a propriedade elétrica da resistividade. Já o método IP baseia-se no comportamento elétrico do contato do condutor ôhmico (metal, semicondutor e grafita) ou da argila com a solução eletrolítica que permeia os poros das rochas. Esse comportamento elétrico e o contraste entre as resistividades das rochas, dos sedimentos e dos minerais, viabilizam a utilização dos métodos como forma

de investigação geológica, prospecção mineral, e ambiental.

Os métodos geofísicos foram aplicados através das técnicas da SEV, usando o arranjo Schlumberger de eletrodos, com espaçamento máximo de $AB/2$ de 100 m, e a técnica de CE, com arranjo dipolo-dipolo, utilizando espaçamentos entre os dipolos de 5 e de 10 m.

Os trabalhos de campo foram desenvolvidos utilizando-se um conjunto transmissor (TSQ-3) e receptor (IPR-12), de fabricação canadense da Scintrex, que permite a medida simultânea do parâmetro da resistividade e do IP. Utilizou-se na área, um tempo de recepção do sinal de 2 segundos (injeção e medição). Os tempos iniciais e finais da janela de integração, utilizados para o cálculo do parâmetro IP (SUMNER, 1976), foram de 340 ms e 520 ms, respectivamente.

A interpretação geofísica dos dados consistiu do uso de modelagem numérica, utilizando os métodos direto e inverso. No processamento foram utilizados os programas computacionais RESIX IP e RESIX-IP2DI.

Informações de tipo litológico de solos, das posições do nível freático em poços de monitoramento e cacimbas, e medidas de condutividade elétrica realizadas em amostras de água coletadas nesses poços, corroboraram com a geofísica na interpretação dos dados.

Apresentação e análise dos resultados

Os resultados obtidos da interpretação das SEVs estão apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Conhecidas as cotas de cada SEV, de sondagens SPT, de poços de monitoramento e de cacimba, e a profundidade do nível d'água (N.A.), determinou-se a cota do lençol freático no ponto. Posteriormente foram traçadas as isolinhas do N.A., gerando o mapa potenciométrico (Figura 1).

Na Figura 2, observa-se uma das várias linhas de CE utilizadas para mapear os limites laterais da cava de resíduos e avaliar se a polarizabilidade seria sensível à presença de resíduos urbanos. Essa linha cruza a cava de resíduos, conforme mostra a Figura 1.

Na Figura 3, observam-se as pseudo-seções de resistividade aparente e o modelo interpretado da linha CE1, ensaiada com o objetivo de detectar a presença da pluma de contaminação a jusante do depósito de resíduos (Figura 1). De mesmo modo, na Figura 4 observa-se a linha CEIP(4).

Com base nos resultados dos ensaios anteriormente descritos, tem-se:

a) A zona saturada contaminada (Tabela 1) apresentou a variação dos valores de ρ predominantemente abaixo de $9 \Omega.m$, com alguns valores acima desse ($12 \Omega.m$ e $14 \Omega.m$), que são sobrepostos aos encontrados para os sedimentos saturados sem contaminação, que ficaram acima de $12 \Omega.m$. As polarizabilidades distinguiram os sedimentos saturados contaminados (valores de polarizabilidade (M) abaixo de $1 mV/V$) dos não contaminados.

Na Tabela 3, mostram-se os parâmetros físico-químicos de concentração de cloreto, condutividade elétrica e quantidade total de substâncias dissolvidas, obtidos das análises feitas pelo Centro Tecnológico da Fundação Paulista (CETEC, 1998). Observa-se que as medidas de condutividade elétrica (que permitem avaliar a mineralização total da água) e as concentrações aniônicas de cloretos (formados pela dissolução de sais e compostos encontrados nos resíduos, que contribuem para o aumento dos STD) mostram uma nítida correlação com as localizações dos pontos de amostragem (Figura 1). Os valores de condutividade revelam que as águas que têm os valores mais altos; portanto, mais mineralizadas, correspondem aos poços a jusante do aterro e a jusante do córrego, isto é, aos pontos de amostragem mais próximos dos resíduos. Em locais mais distantes do aterro sanitário (PM-1 e a montante do córrego), localizados no ambiente natural, as águas, tanto superficiais como subterrâneas são muito pouco condutivas. A jusante do córrego, próximo dos resíduos, a amostragem da sua água evidenciou uma água condutiva de $2300 \mu S/cm$, com uma quantidade de Cl^- de $255 mg/l$, enquanto a montante do mesmo córrego, apresentou uma condutividade de $320 \mu S/cm$, com uma quantidade de Cl^- de $19 mg/l$. Na mesma Tabela, nota-se que os parâmetros físico-químicos medidos para o chorume indicam que o percolado possui um grande potencial poluidor.

Esses resultados evidenciam a influência do lixo, através da degradação e solubilização dos seus compostos, sobre a mineralização total das águas subterrâneas adjacentes, que influenciam nas resistividades obtidas pelas SEVs.

b) Os horizontes compostos de materiais silte-arenoso e silte-argiloso (Tabela 1) apresentaram contrastes de M , que permitiram distingui-los, sendo os valores de M para o horizonte silte-argiloso mais elevados (predominantemente acima de $10 mV/V$). O fato de as resistividades do horizonte composto de sedimento silte-arenoso, serem predominantemente menores do que as do horizonte composto de sedimento silte-argiloso, deve-se à percolação da água subterrânea ao longo de descontinuidades do siltito alterado, encontrado pelas sondagens a trado.

c) Os resíduos apresentaram baixas ρ (Tabela 2), ocasionadas pela presença de chorume (alta concentração iônica), associadas as altas M que refletem a presença de materiais polarizáveis dentro da cava de resíduos, como metais enferrujados (latas), restos eletrônicos (pilhas, componentes de circuito elétrico) e papel impresso (jornais, revistas) (VOLGESANG, 1995).

d) O horizonte associado à base do aterro (zona de percolação de chorume) é o mais condutivo (Tabela 2), refletindo a alta concentração de íons no percolado. Os valores de M desse horizonte, relativamente medianos ($8 mV/V$, $12 mV/V$ e $22 mV/V$) refletem um ou ambos dos seguintes fatores: i) litologia; ii) nível d'água acima da base da cava de resíduos, elevando assim o efeito IP, devido a presença dos resíduos. Informações de poços de monitoramento, cacimbas, sondagens mecânicas e interpretações das SEVs realizadas na vizinhança da

área de disposição de resíduos, confirmam que o N.A na área de estudo é elevado.

e) O sentido do fluxo subterrâneo na área do aterro é predominantemente de NE para SW (Figura 1), em conformidade com o crescimento das medidas de condutividade elétrica específica e teores de cloreto, visto na Tabela 3.

f) A linha CEIP(3) (Figura 2), ensaiada com o propósito de avaliar se a M e a ρ apresentam contrastes entre os resíduos e o meio natural, mostra que a partir da estaca de posição 70 m, começa uma maior influência da cava de resíduos nos parâmetros medidos, e anterior a essa posição, situa-se o terreno natural. Essas zonas (terreno natural e cava) estão separadas pela presença das anomalias geoeletricas de ρ_a e M_a . Analisando qualitativamente as pseudo-seções, verifica-se que a pseudo-seção de M_a definiu relativamente melhor essas duas zonas do que a pseudo-seção de ρ_a , isto é, a pseudo-seção de M_a mostra que os altos valores (maiores que 10 mV/V) caracterizam a presença de resíduos e os baixos valores (menores que 10 mV/V) caracterizam o terreno natural. Na pseudo-seção de ρ_a , observa-se que os valores definidos, como sendo do "background" (maiores que 9 Ω .m), são encontrados no extremo inicial da pseudo-seção e dentro da região da cava de resíduos. Assim, tem-se uma sobreposição dos valores de ρ_a que caracterizam as duas zonas (terreno natural e resíduos). As baixas ρ_a (menores que 9 Ω .m), associadas às altas M_a , são associadas aos resíduos com maior saturação de percolado.

Observando-se novamente a Figura 2, nota-se que no início da pseudo-seção de M_a , restrita ao nível de profundidade teórica de 10 metros, encontram-se valores de M_a definidos para os resíduos. Comunicação verbal de funcionários do aterro confirmam que, nesta parte do aterro, existem resíduos, o que é constatado pelos valores de M_a e não de forma segura pelos valores de ρ_a .

g) As linhas CE1 e CEIP(7) (Figuras 3 e 4), posicionadas próximas à bacia de decantação, drenagens e poços PJ-1 e PJ-2, conforme mostra a Figura 1, foram ensaiadas visando a detectar a presença da contaminação a oeste e a sul do aterro. Ressalta-se que a linha CE1 foi ensaiada no período em que faziam vários testes, com o equipamento SAS4000, da ABEM, na busca de parâmetros de levantamento IP. Como as medidas IP não mostraram ser confiáveis, tomaram-se apenas as medidas de resistividade.

A linha CE1 mostra em sua pseudo-seção (Figura 3), nos dois primeiros níveis investigados, valores de ρ_a inferiores a 9 Ω .m, que caracterizam a contaminação proveniente dos resíduos, aferida pelas análises físico-químicas, em amostras de água subterrânea dos poços PJ-1 e PJ-2. Na mesma pseudo-seção, notam-se zonas anômalas de resistividade mais elevadas (valores maiores que 23 Ω .m), indicando descontinuidades do siltito, onde a percolação da água é mais facilitada. No modelo geoeletrico, evidenciam-se a zona saturada contaminada e o horizonte composto dos sedimentos silte-argilosos, interpretado pela SEVIP(3), cuja variação

da profundidade do topo é condicionada pelo estágio de alteração do siltito.

h) Na Figura 4, observam-se as pseudo-seções da linha CEIP(7), que apresentam em sua totalidade, valores de ρ_a e de M_a , característicos do terreno natural, com alguns valores abaixo de 9 Ω .m, caracterizando provavelmente a presença da contaminação a oeste do aterro, não caracterizada de forma segura na pseudo-seção de polarizabilidade, pela presença de baixos valores.

A não detecção de uma zona anômala maior (valores abaixo de 9 Ω .m), que pudesse seguramente caracterizar a contaminação, como constatado pelas análises físico-químicas, em amostras de água subterrânea dos poços PJ-1 e PJ-2, deve-se, provavelmente, ou à escolha do espaçamento de 5 m entre os dipolos, que ocasionou a perda de detalhe no mapeamento da contaminação, ou o nível de contaminação desse lugar, no período do ensaio, é abaixo do detectável.

Conclusões e recomendações

Na definição do modelo geoeletrico para a Formação Corumbataí, a interpretação conjunta da resistividade e da polarizabilidade, além de reduzir a ambigüidade do modelo, permitiu determinar os diferentes litotipos predominantes nessas Formações, identificando materiais silte-argilosos e silte arenosos.

Os resultados mostraram que a resistividade e a polarizabilidade são sensíveis à presença dos resíduos urbanos, que apresentaram altos valores de polarizabilidade refletindo a presença de materiais polarizáveis dentro da cava de resíduos, como metais enferrujados, restos eletrônicos e papel impresso. A polarizabilidade, muito mais do que a resistividade, foi sensível à presença dos resíduos urbanos, sendo mais eficiente no mapeamento dos limites laterais da cava de resíduos, como constatado pela linha CEIP(2).

A resistividade foi sensível à presença da contaminação no subsolo ao redor dos limites da área de resíduos, como evidenciado na linha CE1, sendo possível o mapeamento das zonas contaminadas, ao contrário da polarizabilidade, que não apresentou evidências de sensibilidade na presença da contaminação.

Visando a diminuir o impacto ambiental causado pela disposição dos resíduos de forma inadequada, recomenda-se, como medidas de monitoramento e proteção das águas superficiais e subterrâneas do local estudado, as seguintes sugestões: instalação de um poço de monitoramento a oeste do aterro de Piracicaba e construções de trincheiras, com barreiras verticais impermeáveis, a sul e a oeste do aterro para drenagem do percolado e posterior recirculação.

Agradecimentos

Ao Departamento de Geologia Aplicada do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP pelo apoio nos trabalhos de campo que resultou no presente artigo. A Universidade Federal do Amapá pelo apoio necessário para a realização desse trabalho. À CAPES pelo apoio financeiro na forma de bolsa do PICDT.

Referências

BUSELLI, G.; DAVIS, G. B.; HOWARD, S. H. D. The application of electromagnetic and electrical methods to groundwater problems in urban environments. *Exploration Geophysics*, New York, US, v. 23, p.543-555, 1992

CENTRO TECNOLÓGICO DA FUNDAÇÃO PAULISTA – CETEC. **Certificados de análises n. 779-785, 474-480, 26-30/1998**. Piracicaba: Secretaria Municipal de Defesa do Meio Ambiente, 1998. 19 p.

HEITZMANN Jr. J.F. **Alterações na composição do solo nas proximidades de depósitos de resíduos domésticos na Bacia do Rio Piracicaba, São Paulo, Brasil**. São Paulo: ABGE, 1999. 66p. (Síntese de Tese).

MALAGUTTI FILHO, W.; JOSÉ, C.; BRAGA, A. C. O.; ELIS, V. R.; TANDEL, R. Y.; PORSANI, J. L. Aplicação

integrada de técnicas geofísicas no aterro sanitário de Rio Claro-SP – resultados preliminares. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, V., 1997, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBGf, 1997. v.1, p. 422-425.

MOURA, H. P. **Emprego da eletrorresistividade e da polarização induzida na caracterização geolétrica de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos**. 2002. 231 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

SUMNER, J. S. **Principles of induced polarization for geophysical exploration**. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. 277 p.

VOGELSANG, D. **Environmental Geophysics**. A practical guide. Berlim: Springer-Verlag, 1995. 174 p.

Tabela 1 – Variações de resistividade e polarizabilidade encontradas pelas SEVs ensaiadas fora dos limites da área de disposição de resíduos.

| Horizonte Geolétrico | | SEVs | IP/ER | SEVs | ER |
|----------------------|---------------------|-----------|------------|------------|----|
| | | mV/V | $\Omega.m$ | $\Omega.m$ | |
| Solo Superficial | Sedimentos siltosos | 0,9 – 5,1 | 12 - 19 | 11 - 25 | |
| | | 4,1 | 20 | 16 - 24 | |
| Zona saturada | Sed. Silte-arenoso | 0,3 - 1 | 7 - 14 | 9 - 12 | |
| | Sed. Silte-arenoso | 1,1 - 3 | 12 - 28 | 14 | |
| | Sed. Silte-argiloso | 5,1–21,5 | 35 - 79 | 24 - 62 | |

*contaminado.

Tabela 2 – Modelo geolétrico dentro dos limites da área de disposição de resíduos.

| Horizonte Geolétrico | SEVs | IP/ER | Espessura |
|--|---------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | mV/V | $\Omega.m$ | metros |
| Cobertura superficial | $1,1 \leq M_1 \leq 3,9$ | $10 \leq \rho_1 \leq 29$ | $0,7 \leq E_1 \leq 1,3$ |
| Cobertura c/ influência dos resíduos | $14,7 \leq M_2 \leq 27$ | $13 \leq \rho_2 \leq 41$ | $0,6 \leq E_2 \leq 1,9$ |
| resíduos | $28,2 \leq M_3 \leq 43,2$ | $7 \leq \rho_3 \leq 15$ | $5,1 \leq E_3 \leq 11$ |
| Zona de percolação de chorume (base da cava) | $8 \leq M_4 \leq 22,4$ | $2 \leq \rho_4 \leq 6$ | $5 \leq E_4 \leq 6,9$ |
| Sedimentos silte-argiloso da Formação Corumbataí | $8,2 \leq M_5 \leq 27,3$ | $18 \leq \rho_5 \leq 68$ | - |

Tabela 3 – Dados da análise físico-química das águas dos poços, córrego e chorume do aterro de Piracicaba.

| Local de Amostragem | | Parâmetros Físico-Químicos | | |
|---------------------|----------|----------------------------|------------|------------------------------|
| | | Cl ⁻ (mg/l) | STD (mg/l) | Condutividade ($\mu S/cm$) |
| PM-1 | 27/10/98 | 20 | 497 | 630 |
| PJ-1 | 27/10/98 | 200 | 1224 | 1550 |
| PJ-2 | 15/11/99 | - | - | 1260 |
| Montante do Córrego | 24/08/98 | 19 | - | 320 |
| | 27/10/98 | 18 | - | 200 |
| Jusante do Córrego | 24/08/98 | 255 | - | 2300 |
| | 27/10/98 | 45 | - | 370 |
| Chorume | 24/08/98 | 3080 | - | 25400 |
| | 15/11/99 | - | - | 15000 |

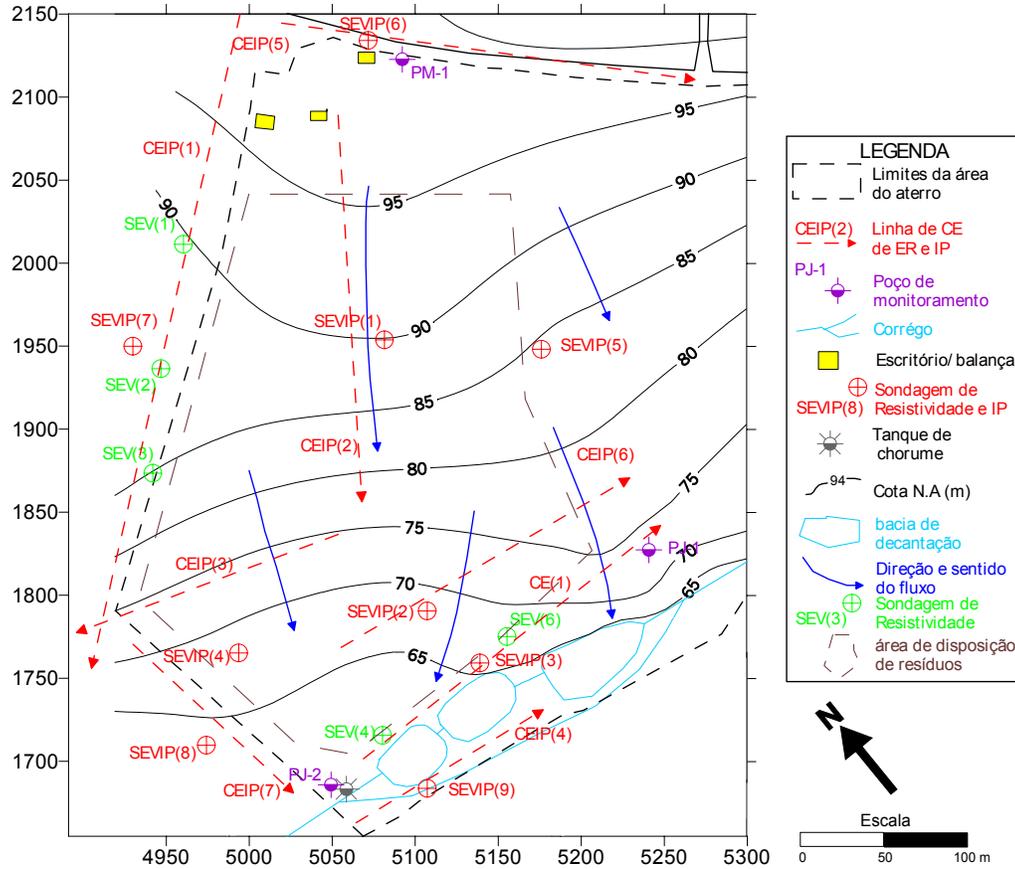


Figura 1 – Mapa potenciométrico do aterro de Piracicaba/SP.

Linha CEIP(2) - Caminhamento de Resistividade e IP (dipolo 10 metros)
 Outubro de 1999 - Aterro de Piracicaba

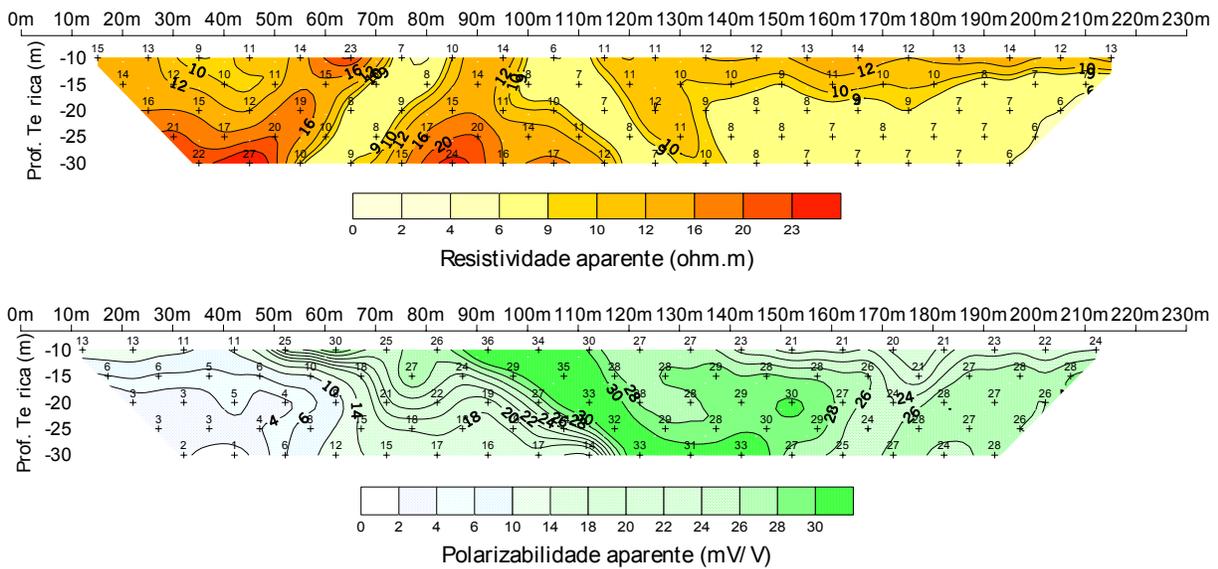


Figura 2 – Pseudo-seções de resistividade e polarizabilidade aparentes da Linha CEIP(2).

Linha CE1 - Caminhamento Elétrico (dipolo 10 metros)
 Junho de 1999 - (Aterro de Piracicaba)

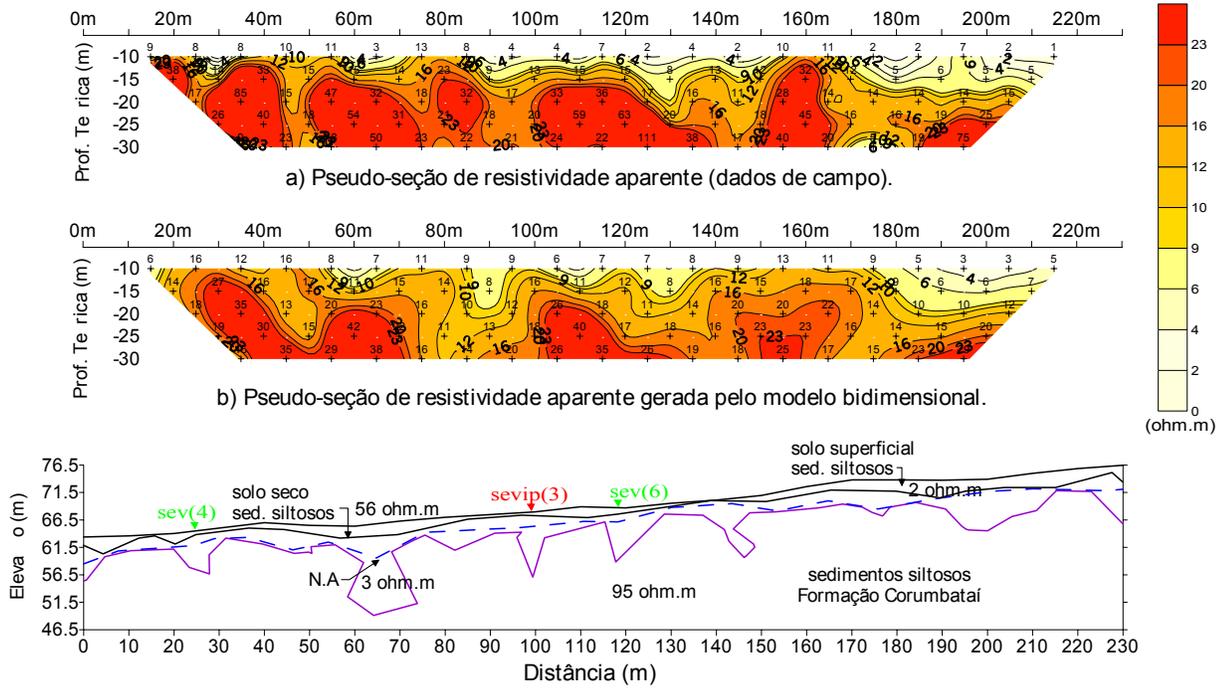


Figura 3 – Pseudo-seções de resistividade e o modelo bidimensional interpretado da Linha CE1.

Linha CEIP(7) - Caminhamento de Resistividade e IP (dipolo 5 metros)
 Março de 2000 - Aterro de Piracicaba

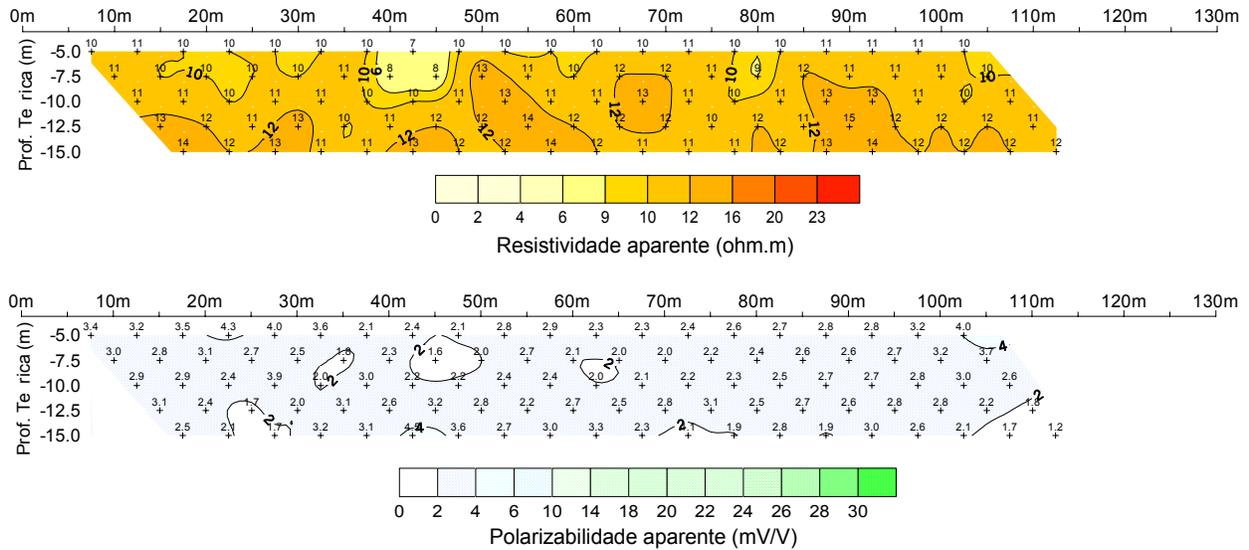


Figura 4 – Pseudo-seções de resistividade e polarizabilidade aparentes da Linha CEIP(7).