

MÉTODOS DA ELETTRORESISTIVIDADE E DA POLARIZAÇÃO INDUZIDA APLICADOS NO ESTUDO DO ATERRO CONTROLADO DE PIRACICABA - SP

Helyelson Paredes MOURA ¹ & Walter MALAGUTTI FILHO ²

(1) Universidade Federal do Amapá. Rodovia Juscelino Kubitschek de Oliveira, km 2 – Bairro Universidade. CEP 68902-280. Macapá, AP. Endereço eletrônico: helyelson@unifap.br.

(2) Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. CEP 13506-970. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: malaguti@rc.unesp.br.

Introdução
Localização e Aspectos Geológicos e Geotécnicos da Área Estudada
Metodologia Geofísica
Ensaio Executados e Apresentação dos Resultados
Análise dos Resultados
Conclusões
Agradecimentos
Referências Bibliográficas

RESUMO – Investigações geofísicas, pelos métodos geoeletricos de eletrorresistividade e polarização induzida (IP), através das técnicas de sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico (configurações Schlumberger e dipolo-dipolo), foram executadas na área do aterro controlado da cidade de Piracicaba (SP), com o objetivo de avaliar as potencialidades da integração dos métodos na caracterização geoeletrica da área. A área sobre a qual está assentado o aterro de Piracicaba é constituída por sedimentos da Formação Corumbataí (sedimentos argilosos e/ou silto-argilosos, com intercalações de arenitos). A interpretação conjunta da resistividade e da polarizabilidade permitiu mapear zonas de percolação de chorume e identificar os diferentes litotipos das formações, identificando materiais arenosos e siltosos. Ficou evidente que a polarizabilidade é sensível à presença de resíduos urbanos e que o efeito de IP é relacionado a materiais polarizáveis dispostos na cava, como latas, papéis, restos eletrônicos e materiais de empréstimo utilizados para a cobertura dos resíduos. Além disso, o método de IP pode ser mais indicado para o mapeamento de zonas de resíduos onde não exista contraste de resistividade entre o meio natural e os resíduos.

Palavras-chave: Eletrorresistividade, polarização induzida, aterro sanitário.

ABSTRACT – *H.P. Moura & W. Malagutti Filho – Resistivity and induced polarization methods applied to study the controlled waste landfill in Piracicaba – SP.* Geophysical investigations using geoelectric methods such as electroresistivity and induced polarization by means of vertical electrical sounding (Schlumberger array) and electrical profiling (dipole-dipole array) have been used in a controlled waste landfill located in Piracicaba (São Paulo State). The main objective was to evaluate the potentiality of the integrated use of these methods in the geoelectric characterization of the area. The regional geology consists of clay or silty/clay sediments intercalated with sandstones of the Corumbataí Formation. Resistivity and induced polarization interpretation allows to map the leachate percolation zones and to identify different sandy and silty sediments of this formation. The results shows that IP polarization is sensitive to the urban waste presence and the induced polarization effect is related to the materials polarizability within the excavation site, such as steel cans, paper, electronic parts and the residues covering material. The induced polarization method is more indicated to residues mapping zones, where a resistivity contrast between the natural environment and the residues (urban waste) does not exist.

Keywords: Resistivity, induced polarization, waste landfill.

INTRODUÇÃO

A disposição dos resíduos sólidos urbanos em lixões ou aterros controlados tem atraído a atenção dos profissionais das Geociências, pois esta prática pode trazer sérias conseqüências ambientais, em particular sobre a qualidade das águas subterrâneas adjacentes, quando efetuada de forma incorreta. A infiltração e a percolação das águas pluviais através desses depósitos pode eventualmente, provocar a migração de vários compostos químicos inorgânicos e orgânicos através da zona não saturada, colocando assim em risco a zona saturada e, portanto, podendo contaminar as águas subterrâneas.

Devido ao fato desses depósitos geralmente não possuírem impermeabilização com camadas de argila ou geomembranas, que servem como base dos depósitos, os mesmos constituem-se em fontes potenciais de contaminação do solo e das águas subterrâneas.

Nas últimas décadas, após um longo período de aplicações prioritárias à prospecção mineral, os métodos geofísicos elétricos e eletromagnéticos vêm sendo cada vez mais aplicados em estudos ambientais, particularmente no mapeamento e monitoramento de plumas de contaminação, existentes nos arredores desses depósitos. As metodologias proporcionam uma visão

global da subsuperfície, por meio de técnicas não-invasivas, que complementam as informações pontuais de furos de sondagens ou de amostras de poços de para a exploração de água subterrânea.

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

buscaram: (a) determinação das espessuras dos materiais litológicos e da pilha de resíduos soterrados; (b) avaliação da resposta dos métodos de eletrorresistividade e polarização induzida frente aos resíduos sólidos urbanos dispostos em terrenos de geologia predominantemente argilosa; (c) elaboração do mapa potenciométrico das águas subterrâneas; (d) identificação de plumas de contaminação; (e) modelagem geolétrica 2D de pseudo-seções.

LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS DA ÁREA ESTUDADA

O aterro de Piracicaba localiza-se no bairro do Pau-Queimado, situado a 15 km do centro da cidade. O aterro possui superfície total de aproximadamente 99.000 m² dos quais cerca de 62.000 m² são utilizados para a disposição dos resíduos. Plantações de cana-de-açúcar estão presentes ao redor do aterro e um córrego, afluente do Rio das Pedras, que deságua no Ribeirão dos Martins, nasce do lado leste da área e corre junto aos limites sudeste e sul.

O aterro existe há cerca de 29 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.

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

pertencentes à Bacia Sedimentar do Paraná. No aterro controlado foram executadas várias sondagens a trado, com amostradores de tipo cunha, as quais informaram que (Heitzmann Jr., 1999):

- solo maduro apresenta na região espessura entre 0,4 e 0,8 m, constituído de material siltoso a argiloso e com pouca areia;
- solo residual jovem é constituído de 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;
- horizonte rocha alterada (R) mostra grande quantidade de fragmentos de rocha. Os mesmos se encontram 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 cm/s. Quanto à composição mineralógica, analisada por meio de difratometria de raios X, os componentes principais são quartzo e caulinita.

METODOLOGIA GEOFÍSICA

No presente trabalho foram empregados os métodos geolétricos de eletrorresistividade (ER) e de polarização induzida (IP). A ER baseia-se no fato de que as rochas, em função de sua composição mineralógica, textural, conteúdo de água e propriedades geotécnicas, apresentam variações na resistividade elétrica. O método de 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, geotécnica, prospecção mineral, hidrogeológica e ambiental.

O método de eletrorresistividade tem como princípio a passagem pelo solo de uma corrente elétrica de intensidade I , transmitida por um par de eletrodos denominados A e B , conectado a uma fonte de corrente. Mede-se a diferença de potencial (ΔV) entre dois eletrodos de recepção denominados M e N . A partir daí, pode-se calcular a resistividade aparente ρ_a , dada pela equação:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (\Omega.m) \quad (1),$$

onde K é o fator geométrico do arranjo geral do quadripolo AMNB (Keller & Frischknecht, 1977), que depende somente das posições de injeção de corrente e de medida do potencial, dado por:

$$K = 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right]^{-1} \quad (\text{m}) \quad (2),$$

sendo AM , AN , BM e BN as distâncias entre os eletrodos.

A polarização induzida é um fenômeno físico elétrico, estimulado pela transmissão de uma corrente elétrica pulsante e periódica no subsolo, observada como uma resposta defasada de voltagem nos materiais terrestres (Sumner, 1976). A detecção e medida dessa resposta, conhecida na literatura geofísica como curva de relaxação ou transiente, indica a presença de material polarizável no subsolo, constituindo, portanto, a base do método de

Nesta pesquisa, empregou-se o equipamento IPR-12 da Scintrex, que define a medida do efeito de IP como (SCINTREX, 1995):

$$M_a = \frac{1}{(t_2 - t_1) V_p} \int_{t_1}^{t_2} V_{IP}(t) dt \quad (3),$$

onde: M_a é a polarizabilidade aparente em mV/V (Parasnis, 1986); t_1 é o tempo inicial da janela em ms; t_2 é o tempo final da janela em ms; V_p é a voltagem primária durante a transmissão da corrente (estado ligado); $V_{ip}(t)$ é a voltagem transiente medida durante o período de integração ($t_2 - t_1$) no estado de corrente desligado.

Utilizou-se um tempo de 2 segundos na onda quadrada transmitida. Os tempos iniciais e finais utilizados para o cálculo do efeito de IP foram de 340 ms e 520 ms, respectivamente. Esses tempos foram escolhidos de acordo com os ensaios de testes realizados na área estudada (Moura, 2002).

Na área do aterro foram executados ensaios geofísicos utilizando as técnicas de sondagem elétrica vertical (SEV) com arranjo Schlumberger e caminha-

mento elétrico (CE) com o arranjo dipolo-dipolo. Nos ensaios de SEV o maior espaçamento dos eletrodos de corrente chegou a 100 m, enquanto nos ensaios de CE foram utilizados espaçamentos entre os dipolos de 5 e de 10 m com cinco níveis de investigações, atingindo profundidades teóricas máximas de 15 e 30 m respectivamente.

A interpretação geofísica dos dados consistiu do uso de modelagem numérica, utilizando os métodos direto e inverso. Informações de tipo litológico de solos, das posições do nível freático em poços de monitoramento e cacimbas, e medidas de condutividade elétrica, realizadas com condutímetro digital de bancada, do tipo “conductivity temperature pH tester”, de fabricação Hydac, em amostras de água coletadas em poços de monitoramento e cacimbas, corroboraram com a geofísica no mapeamento da contaminação.

Na modelagem direta dos dados de SEV, calculou-se, a partir de um método numérico que envolve filtros digitais lineares (Seara & Granda, 1987), espessura, resistividade e polarizabilidade das camadas. Vale ressaltar que a inversão conjunta dos dados de resistividade e cargabilidade contribuiu para a redução da ambigüidade interpretativa do método.

Nos dados de CE, utilizou-se o método dos elementos finitos (Rijo, 1977) para obter a solução aproximada de modelos com as mais complexas geometrias. Na modelagem direta os parâmetros dos modelos são modificados até que a curva de sondagem (ou a pseudo-seção de CE) teórica ajuste satisfatoriamente à curva (ou pseudo-seção) de campo.

Na interpretação inversa calcularam-se iterativamente novos modelos iniciados com os parâmetros fornecidos pelo método direto até atingir certo critério de convergência que minimizaram as diferenças entre as curvas (ou pseudo-seções) teórica e de campo. Este processo é baseado na técnica da regressão múltipla – *Ridge Regression* (Inman, 1975).

ENSAIOS EXECUTADOS E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O mapa de localização dos ensaios geofísicos (Figura 1) mostra a localização das sondagens elétricas verticais e das linhas de caminhamento elétrico.

Na Figura 2 encontram-se as curvas de sondagens SEVIP(1) e SEVIP(8), representativas das sondagens realizadas dentro e fora dos limites da área de disposição de resíduos, respectivamente. Os resultados obtidos da modelagem 1D das SEVs estão apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Conhecidas as cotas de cada sondagem elétrica, 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 em cada ponto. Posteriormente foram traçadas as isolinhas do N.A., gerando o mapa potenciométrico (Figura 3).

Para mapear os limites laterais da cava de resíduos e avaliar se a resistividade e a polarizabilidade seriam sensíveis à presença de resíduos urbanos, também foram realizadas várias linhas de CE. Com o objetivo de avaliar o valor médio regional da área, foram realizados vários ensaios de CE. Na Figura 4, observa-se a linha CEIP (1), representativa dos ensaios realizados fora dos limites da área de resíduos, situada conforme mostra a Figura 1.

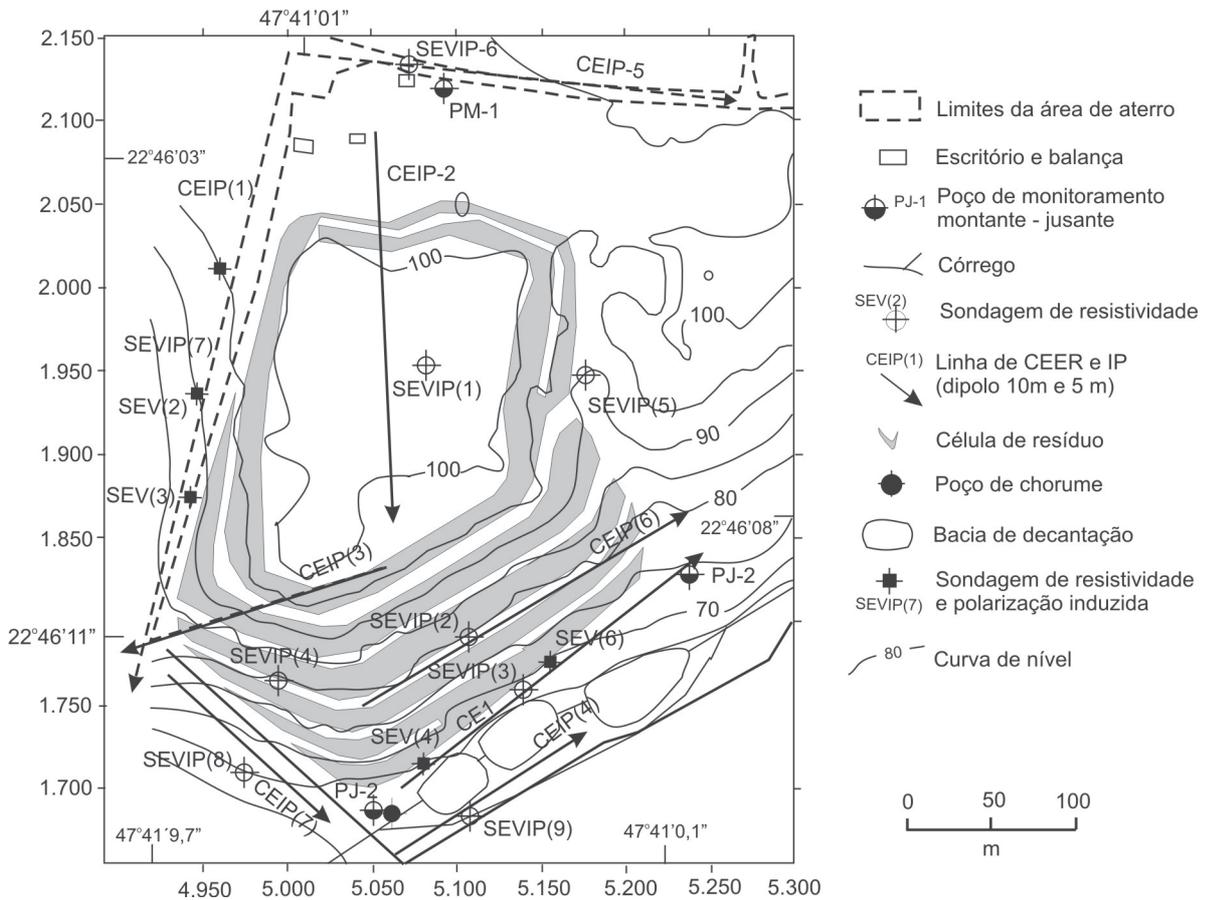


FIGURA 1. Mapa de localização dos ensaios geofísicos no aterro controlado de Piracicaba-SP.

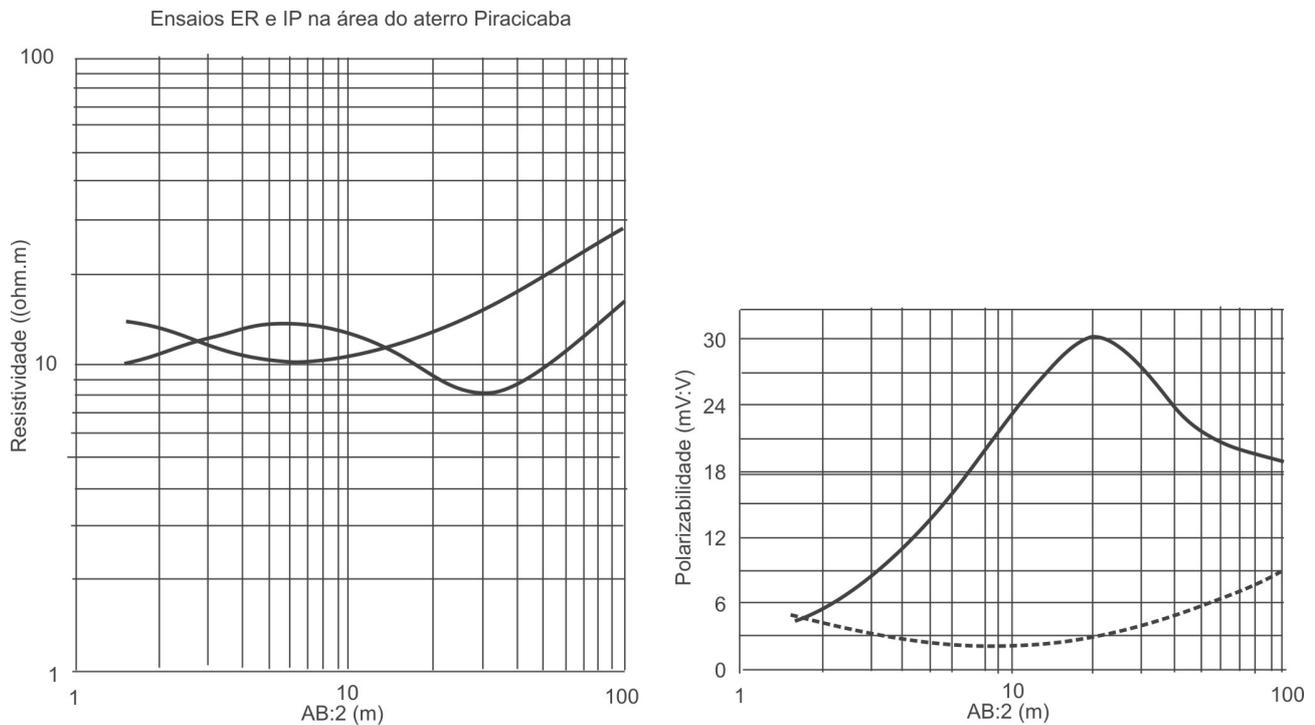


FIGURA 2. Curvas de campo das sondagens SEVIP(1) (linha contínua) e SEVIP(8) (linha tracejada).

TABELA 1. Variações de resistividade e polarizabilidade encontradas pelas SEVs ensaiadas fora da área de disposição de resíduos.

| Horizonte geoeletrico | | SEVs mV/V | IP/ER Ω.m | SEVs ER Ω.m | |
|------------------------|------------------|---------------------|--------------|----------------|---------|
| Formação Corumbataí | Solo superficial | 0,9 - 5,1 | 12 - 19 | 11 - 25 | |
| | Solo seco | 4,1 | 20 | 16 - 24 | |
| | Zona saturada | Sed. Silte-arenoso | 0,3 - 1 | 7 - 14 | 9 - 12 |
| | | Sed. Silte-argiloso | 5,1- 21,5 | 35 - 79 | 24 - 62 |

* Contaminado

TABELA 2. Modelo geoeletrico dentro dos limites da área de disposição de resíduos.

| Horizonte Geoeletrico | SEVs | IP/ER | Espessura |
|--|---------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | mV/V | Ω.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 com 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 silto-argilosos da Formação Corumbataí | $8,2 \leq M_5 \leq 27,3$ | $18 \leq \rho_5 \leq 68$ | - |

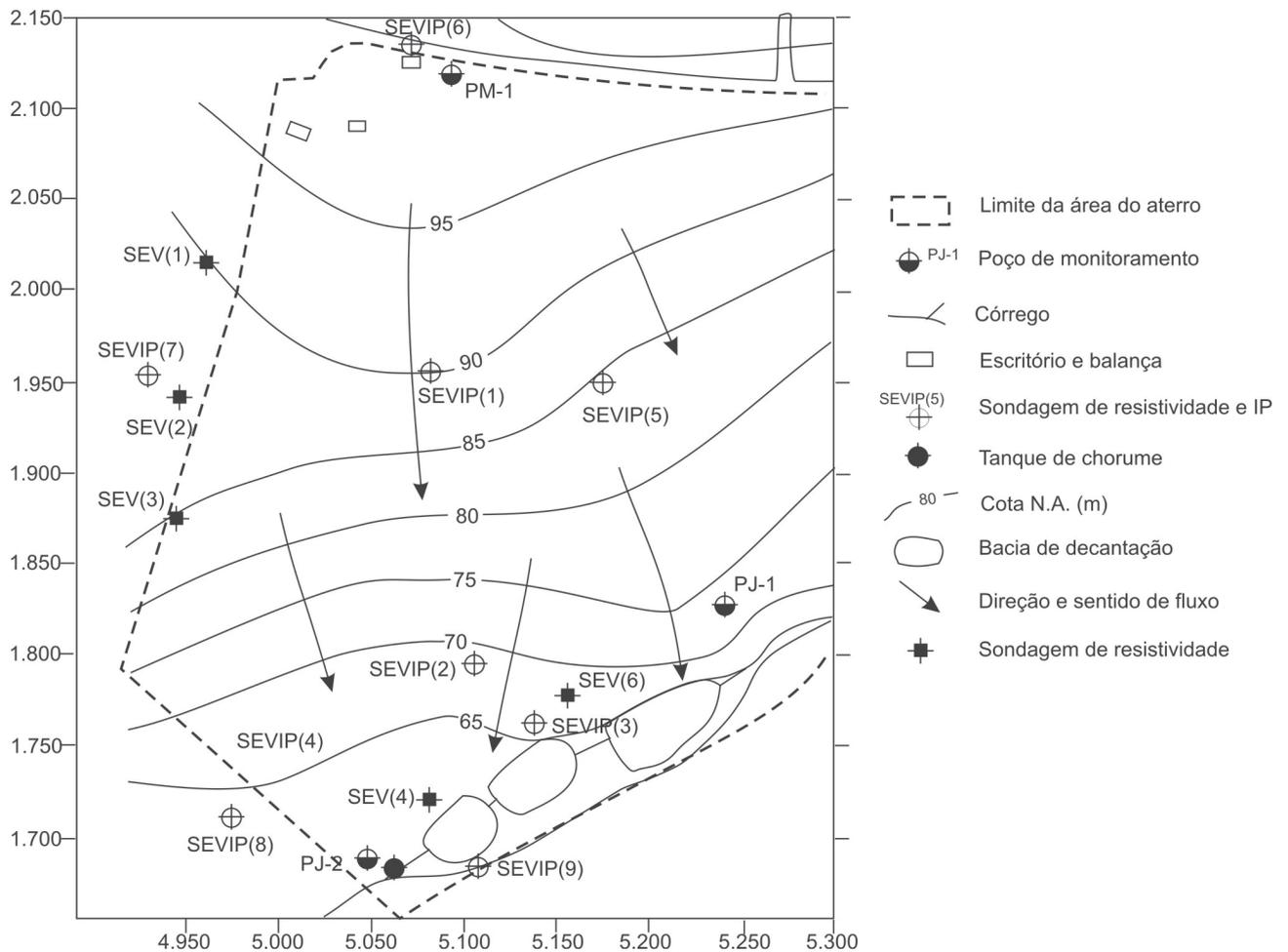


FIGURA 3. Mapa potenciométrico do aterro de Piracicaba-SP.

Linha CEIP(1) - Caminhamento de resistividade e IP (dipolo 10 m)
 Aterro de Piracicaba - Outubro de 1999 - Período de chuvas

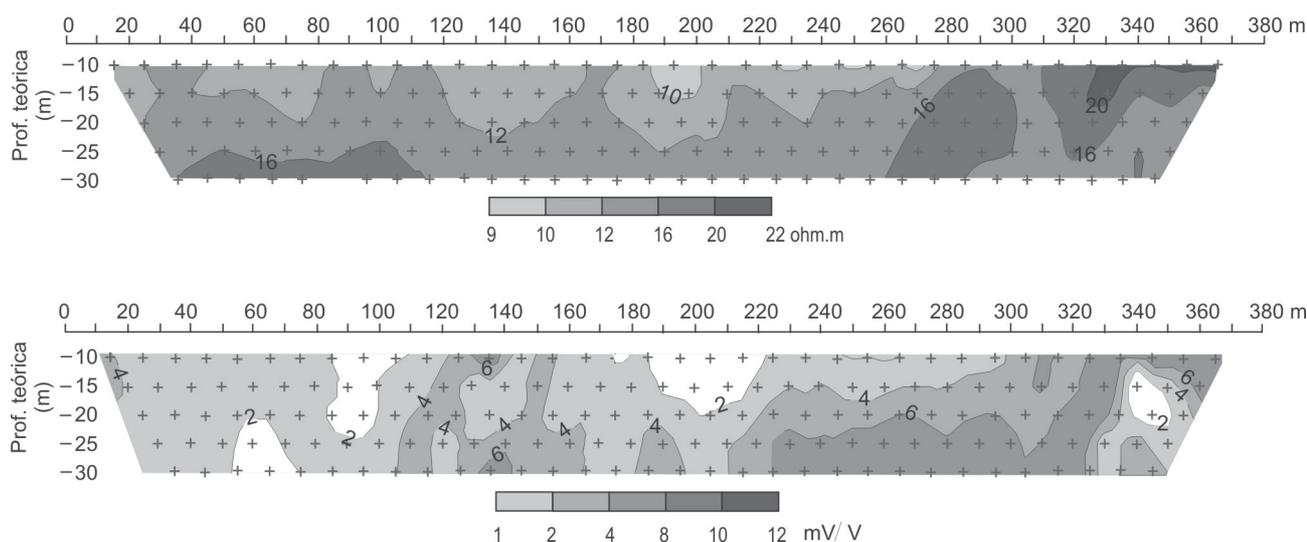


FIGURA 4. Seções de resistividade e polarizabilidade aparentes da Linha CEIP(1).

Na Figura 5, observa-se uma das pseudo-seções de resistividade e de polarizabilidade aparentes (linha CEIP (6)) que cruza a cava de resíduos e o modelo interpretado 2D.

Na Figura 6, 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).

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

- 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 $12 \Omega.m$. Por outro lado, os valores de polarizabilidades permitiram a distinção dos sedimentos saturados contaminados (valores de polarizabilidade M abaixo de $1 mV/V$) dos não contaminados.
- Medidas de condutividade elétrica *in situ* e de concentração de cloreto mostram uma nítida correlação com a localização dos pontos de amos-

tragem. Os valores de condutividade elétrica revelam que as águas que têm os valores mais altos – portanto, mais mineralizadas – correspondem aos poços a jusante do aterro, isto é, nos pontos de amostragem mais próximos dos resíduos (condutividade = $1.550 \mu S/cm$ e $Cl^- = 200 mg/l$, no poço PJ-1, e condutividade = $1.260 \mu S/cm$, no poço PJ-2) e a jusante do córrego (condutividade = $2.300 \mu S/cm$ $Cl^- = 255 mg/l$).

- Em locais mais distantes do aterro sanitário localizados em ambiente natural, as águas, tanto superficiais como subterrâneas, são pouco condutivas (condutividade = $630 \mu S/cm$, e $Cl^- = 20 mg/l$ no poço PM-1 e a montante do córrego, condutividade = $320 \mu S/cm$, e $Cl^- = 19 mg/l$). Os parâmetros físico-químicos medidos para o chorume indicam que o percolado possui um grande potencial poluidor (condutividade = $25.400 \mu S/cm$, e $Cl^- = 3.080 mg/l$).

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

CONCLUSÃO

Na definição do modelo geoeétrico para a Formação Corumbataí, a interpretação conjunta da resistividade e da polarizabilidade permitiu determinar os diferentes litotipos predominantes nessas Formações,

identificando materiais silto-argilosos e silto-arenosos. Os resultados mostraram que a polarizabilidade, muito mais do que a resistividade, foi sensível à presença dos resíduos urbanos, apresentando altos valores que

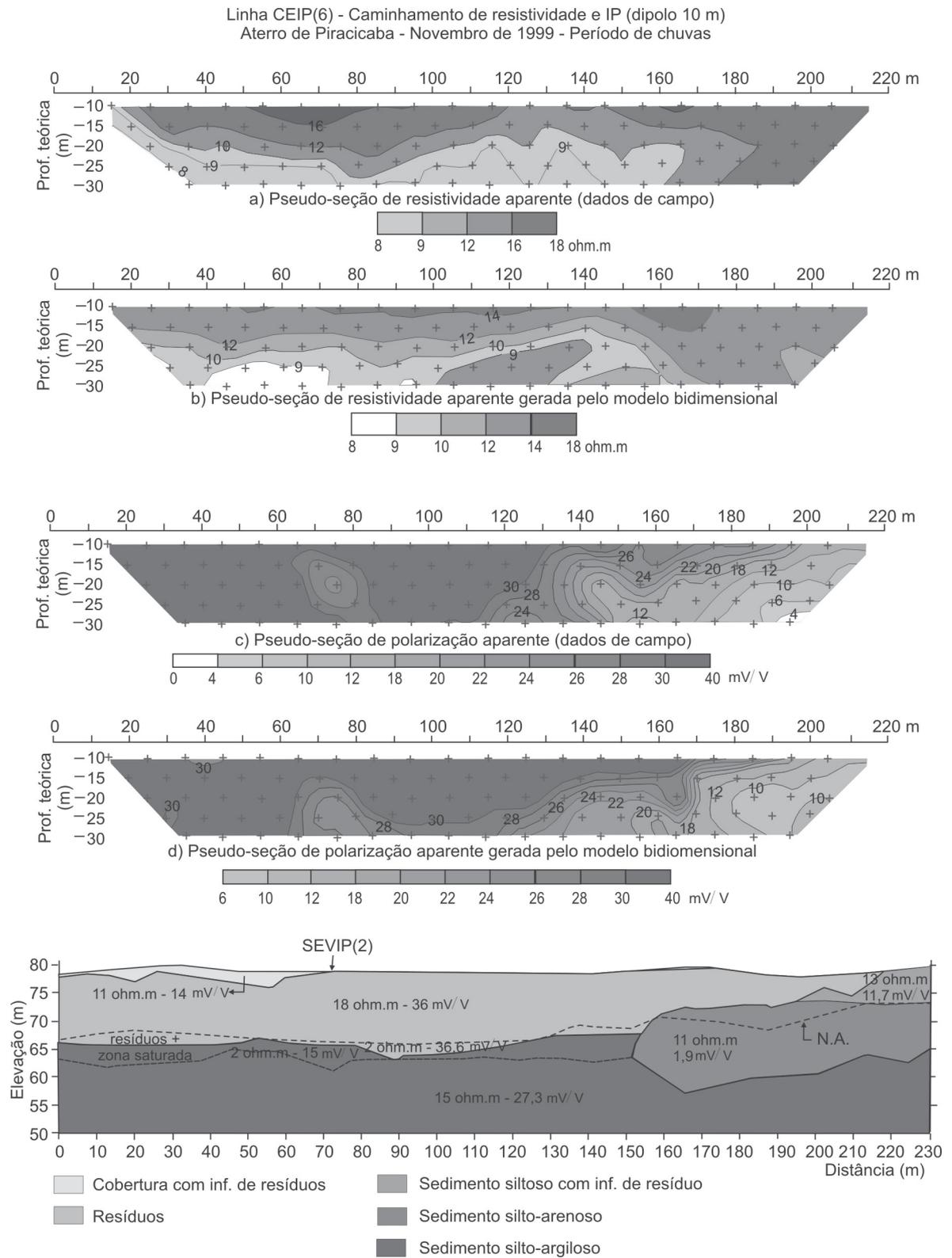


FIGURA 5. Seções de resistividade e polarizabilidade aparentes da Linha CEIP(6).

Linha CE1 - Caminhamento elétrico (dipolo 10 metros)
Junho de 1999 - Período de estiagem

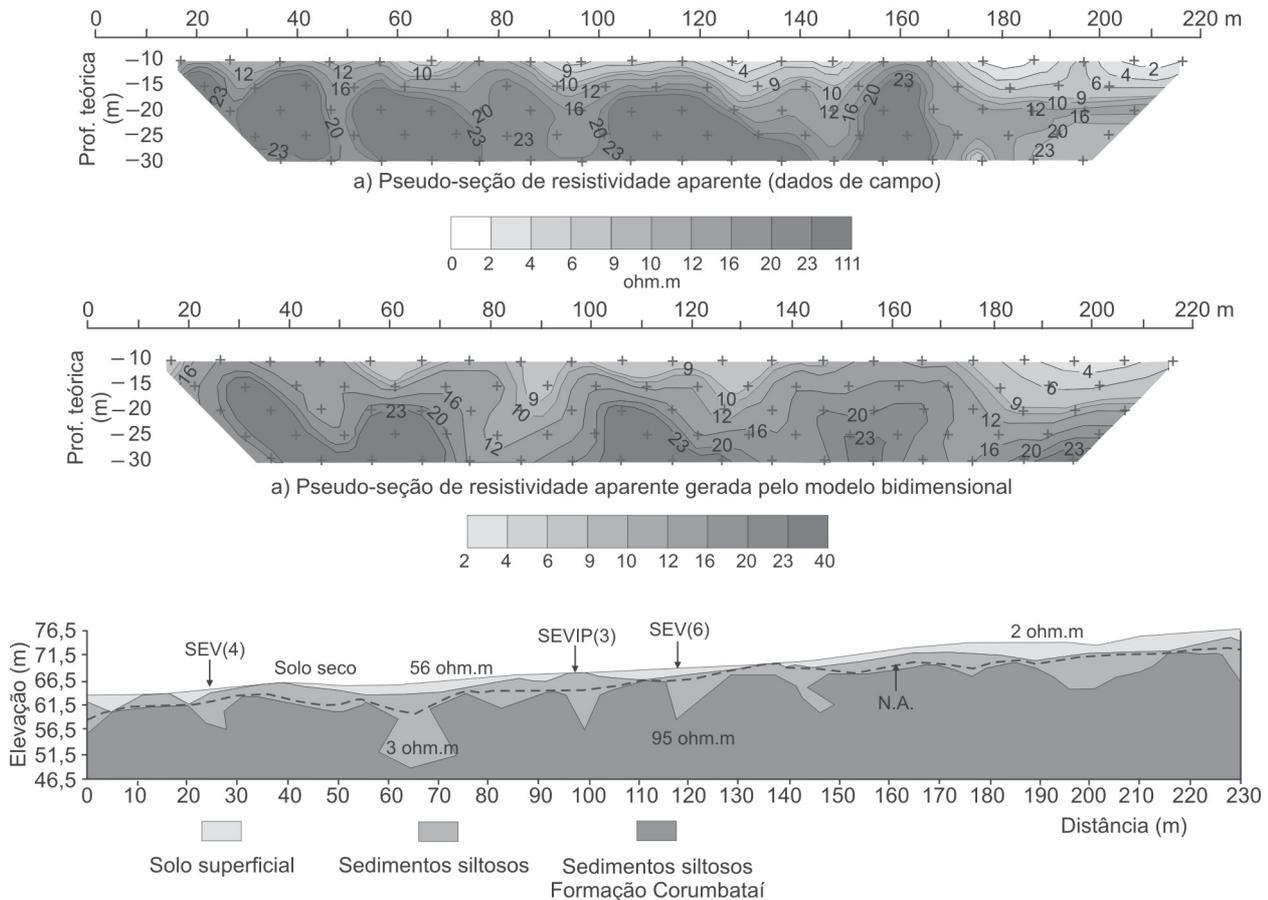


FIGURA 6. Seções de resistividade e o modelo 2D interpretado da Linha CE1(1).

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). Ressalta-se que o método de IP pode ser mais indicado no mapeamento de zonas de resíduos, onde não exista contraste de resistividade entre o meio natural e os resíduos.

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, exibindo, nas pseudo-seções, M_a dentro da faixa de valores associada ao meio natural. Na área do aterro controlado de Piracicaba, o sentido do fluxo das águas subterrâneas é predominantemente para sudoeste.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HEITZMANN JUNIOR, J.F. **Alterações na composição do solo nas proximidades de depósitos de resíduos domésticos na Bacia do Rio Piracicaba, São Paulo, Brasil.** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1999. (Síntese de Tese, 9).
2. INMAN, J.R. Resistivity inversion with ridge regression. **Geophysics**, n. 40, p. 789-817, 1975.
3. KELLER, G.V. & FRISCHKNECHT, F.C. **Electrical methods in geophysical prospecting.** Oxford: Pergamon Press, 517 p., 1977.
4. MOURA, H.P. **Emprego da eletrorresistividade e da polarização induzida na caracterização geolétrica de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos.** Rio Claro, 2002. 231 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista/Campus de Rio Claro.
5. PARASNIS, D.S. **Principles of applied Geophysics.** 5th ed. Chapman & Hall, 402 p., 1986.
6. RIJO, L. **Modeling of electric and eletromagnetic data.** Salt Lake City, 1977. 242 p. Ph. D. Thesis – University of Utah.
7. SCINTREX. **IPR - 12 time domain IP/resistivity receiver: Operation manual.** Ontario: Scintrex Ltd., 1995.
8. SEARA, J.L. & GRANDA, A. Interpretation of IP time domain/resistivity soundings for delineating sea – water intrusions in some coastal areas of the northeast of Spain. **Geoexploration**, n. 24, p. 153-167, 1987.
9. SUMNER, J.S. Principles of induced polarization for geophysical exploration. **Elsevier**, 277 p., 1976.

Manuscrito Recebido em: 28 de setembro de 2006

Revisado e Aceito em: 15 de maio de 2007

