

MÉTODOS DE ELETRORRESISTIVIDADE E DE POLARIZAÇÃO INDUZIDA APLICADOS NA ÁREA DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS URBANOS: ATERRO CONTROLADO DE RIO CLARO – SP

Helyelson Paredes MOURA ¹ & Walter MALAGUTTI FILHO ²

(1) Universidade Federal do Amapá. Rodovia Juscelino Kubitschek de Oliveira, km 02 - Bairro Universidade. Caixa Postal 261. CEP 68902-280. Macapá, AP. Endereço eletrônico: helyelson@unifap.br. (2) Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. Caixa Postal 178. CEP 13506-970. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: malaguti@rc.unesp.br

Introdução e Objetivos
Localização e Geologia Local da Área Estudada
Metodologia Geofísica Empregada
Ensaios Executados e Apresentação dos Resultados
Análise dos Resultados
Conclusões
Agradecimentos
Referências Bibliográficas

RESUMO: Ensaio geofísico, pelos métodos da eletrorresistividade e polarização induzida (domínio do tempo), através das técnicas da sondagem elétrica vertical e caminamento elétrico (configurações Schlumberger e dipolo-dipolo) foram executados na área do aterro controlado da cidade de Rio Claro-SP, com o objetivo de avaliar as potencialidades da integração dos métodos na caracterização geolétrica da área. A geologia sobre a qual está assentado o aterro de Rio Claro é constituída por sedimentos cenozóicos e pela Formação Rio Claro (sedimentos predominantemente arenosos), que está, por sua vez, assentada discordantemente sobre rochas da Formação Corumbataí (sedimentos argilosos e/ou silte-argilosos, com intercalações de arenitos). A interpretação conjunta da resistividade e da polarizabilidade, além de reduzir a ambigüidade dos modelos geoeletricos unidimensionais e bidimensionais interpretados, permitiu determinar a geometria das cavas de resíduos, zonas de percolação de chorume e identificar os diferentes litotipos das Formações, identificando materiais arenosos e siltosos. Neste trabalho, ficou evidente que a polarizabilidade é sensível à presença de resíduos urbanos, e que o efeito IP é relacionado a materiais polarizáveis dispostos na cava, como latas, papéis, restos eletrônicos e materiais de empréstimo utilizados para a cobertura dos resíduos.

Palavras-chaves: Aterro sanitário; eletrorresistividade; polarização induzida; geofísica aplicada.

ABSTRACT: *H.P. Moura & W. Malagutti Filho. The use resistivity and induced polarization methods in the characterization of geoelectrical features in landfills: controlled landfill of Rio Claro – SP.* Geophysical experiments using resistivity and induced polarization (time domain) methods, by means of vertical electrical sounding and profiling (Schlumberger and dipole-dipole configurations), were done at the municipal landfill of the city of Rio Claro, São Paulo. These studies were done in order to evaluate the potential of integrating these methods in the geoelectric characterization of the area. The regional geology is characterized by the Rio Claro and Corumbataí formations. The Rio Claro Formation consists primarily of sandy sediments which disconformably overlies the argillaceous and/or silty strata (with some sandy intercalations) of Corumbataí Formation. The integration of resistivity and polarization data helps to reduce the ambiguity of 1D- and 2D geoelectric models and permits the determination of the geometry of buried residues, leachate percolation zones, and the different lithotypes of the formations, particularly sandy and silty materials. In this investigation it became evident that polarization is sensitive to the presence of buried urban waste, and that the effect of induced polarization is related to the materials buried in the excavation, such as steel cans, paper, electronic residues and the clayey material used to cover those wastes.

Keywords: Landfill; resistivity; induced polarization; applied geophysics.

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O resultado da prática obsoleta e inadequada de disposição de resíduos sólidos urbanos, em terrenos de geologia inadequada, tem dirigido a atenção dos órgãos públicos e de instituições de pesquisa no sentido de avaliar os impactos da disposição, que têm como consequência, a contaminação do solo e da água subterrânea pela infiltração do percolado.

O conhecimento dos aspectos de natureza geológica, geotécnica e hidrogeológica da área de disposição de resíduos, isto é, dos materiais em

subsuperfície, e as características do material poluente, são a base para o monitoramento e a recuperação dessas áreas degradadas pela ação antrópica.

Após um longo período de aplicações prioritárias à prospecção mineral, os métodos geofísicos vêm sendo cada vez mais aplicados em estudos ambientais, particularmente para o mapeamento e monitoramento de áreas de disposição de resíduos urbanos e industriais (Carpenter et al., 1990). As metodologias proporcionam uma visão global da subsuperfície, por meio de técnicas

não-invasivas, que complementam as informações pontuais de testemunhos de furos de sondagens ou de amostras de poços de água subterrânea.

É dentro desse contexto que este trabalho apresenta os resultados da aplicação integrada dos métodos de eletrorresistividade e da polarização induzida (IP-domínio do tempo) na caracterização geolétrica da área de disposição de resíduos sólidos urbanos da cidade de Rio Claro-SP. Essa caracterização compreende a determinação dos seguintes objetivos específicos: (a) determinação das espessuras

dos materiais litológicos e da pilha de resíduos soterrados; (b) avaliação da resposta do método IP em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos; (c) mapeamento dos limites da cava de resíduos; (d) determinação e caracterização do modelo geolétrico 2D representativo da área investigada; (e) determinação da profundidade do lençol freático e elaboração de um mapa potenciométrico das águas subterrâneas; (f) identificação de pluma de contaminação; (g) auxiliar a locação de piezômetros para monitoramento da pluma de contaminação.

LOCALIZAÇÃO E GEOLOGIA LOCAL DA ÁREA ESTUDADA

O aterro controlado da cidade de Rio Claro situa-se ao lado da Rodovia Fausto Santo Mauro (SP-127) que interliga os municípios de Rio Claro e Piracicaba, na altura do km 2, possuindo uma área total de 44.242,16 m² (Tecsolo, 1993). Na Figura 1, observa-se o mapa de localização do aterro.

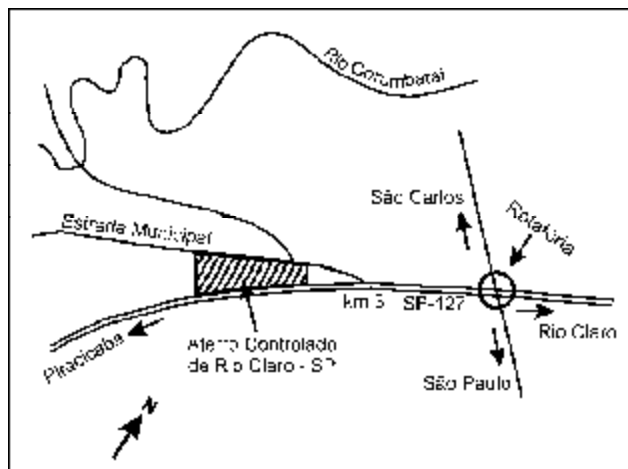


FIGURA 1. Mapa de localização do aterro de Rio Claro-SP (modificado de Porsani, 1999).

O aterro teve sua origem em 1982 como um lixão, transformado em aterro controlado após algumas medidas para minimizar os impactos ambientais. Baseado no seu histórico, não possui impermeabilização

com camadas de argila ou mantas plásticas no solo que serve como base do aterro.

A geologia do município da cidade de Rio Claro, sobre a qual está assentado o aterro, é constituída por rochas das formações Rio Claro e Corumbataí, pertencentes à Bacia Sedimentar do Paraná. Litologicamente, têm-se arenitos inconsolidados com níveis de argilitos intercalados da Formação Rio Claro e siltitos argilosos e argilitos da Formação Corumbataí (Zaine, 1994).

Em outubro de 1999 foram executadas no aterro várias sondagens do tipo SPT, das quais nota-se: (a) os níveis freáticos foram encontrados nas profundidades de 9,6 m à jusante e 13,5 m à montante do aterro; (b) a base da cava do aterro encontra-se em sedimentos predominantemente arenosos e/ou areno-argilosos da Formação Rio Claro, chegando a um máximo de profundidade de 14,5 m; (c) o topo das rochas da Formação Corumbataí foi encontrado no mínimo a 13 m; (d) o material de empréstimo utilizado para cobrir as células de resíduos constitui-se de sedimentos areno-argilosos.

Melo (1995) realizou análises mineralógicas da fração argila da Formação Rio Claro, encontrando a seguinte proporção dos minerais argilosos: caulinita, muito abundante (50% a 80%); illita, escassa (1 a 5%); camada mista, rara (<1%); gibbsita, rara (<1%) e goethita, rara (<1%). A condutividade hidráulica da Formação Rio Claro intemperizada possui valor médio de $2,3 \times 10^{-4}$ cm/s e a da Formação Corumbataí possui valor médio de $6,5 \times 10^{-7}$ cm/s (Cottas, 1983).

METODOLOGIA GEOFÍSICA EMPREGADA

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, geotécnica, prospecção mineral, hidrogeológica e ambiental.

O método da 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 (DV) entre dois eletrodos de recepção denominados M e N . A partir daí, pode-se calcular a resistividade aparente r_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:

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

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, indicará a presença de material polarizável no subsolo, constituindo-se, portanto, a base do método IP.

Nesta pesquisa, empregou-se o equipamento IPR-12 da Scintrex, que define a medida do efeito 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 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 caminhamento elétrico (CE) dipolo-dipolo. Nos ensaios de SEV o 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. Nos dados de CE, utilizou-se o método dos elementos finitos (Rijo, 1977) para obter-se 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 a curva (ou pseudo-seção) de campo.

Na interpretação inversa calculou-se iterativamente novos modelos iniciados com os parâmetros fornecidos pelo método direto até atingir certo critério de convergência que minimizou 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 2) mostra a locação das SEVs e das linhas levantadas pelo caminhamento elétrico. Os resultados obtidos da interpretação das SEVs estão apresentados

nos Quadros 1 e 2. Na Figura 3 são mostradas as curvas de sondagens SEVIP(10) e SEVIP(2), representativas das sondagens realizadas dentro e fora dos limites da área de disposição de resíduos, respectivamente.

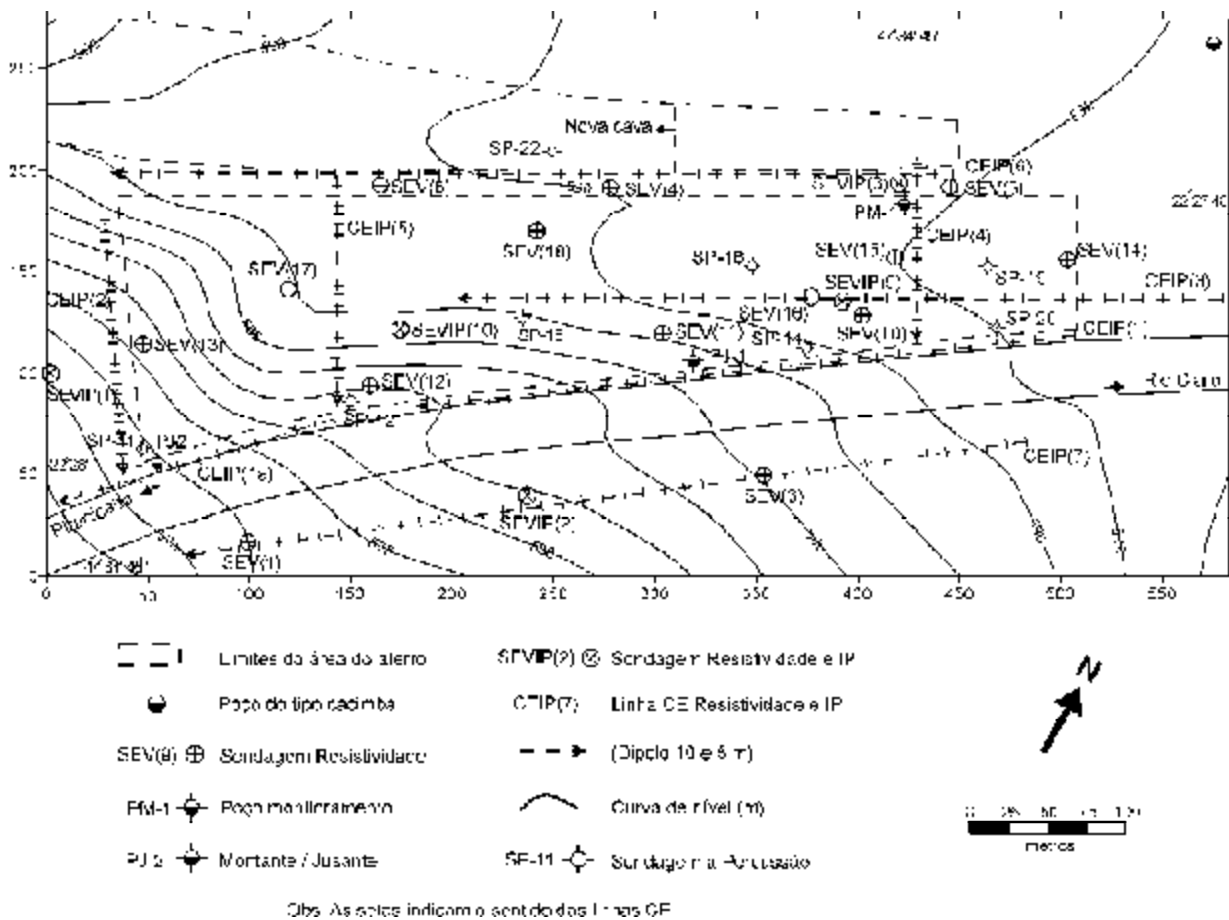


FIGURA 2. Mapa de localização dos ensaios geofísicos no aterro controlado de Rio Claro-SP.

QUADRO 1. Modelo geoeétrico fora dos limites da área de disposição de resíduos.

| Horizonte Geoeétrico | | SEVs IP/ER | |
|---|--|-------------|-------------|
| | | mV/V | $\Omega.m$ |
| Formação Rio Claro | Solo Superficial (Sedimentos predominantemente arenosos) | 1,5 - 2,5 | 91 - 380 |
| | Sedimentos pred. arenosos | não natural | 230 - 4796 |
| | | contaminado | 60 |
| | Sedimentos pred. arenosos (N.A.) | não natural | 328 |
| contaminado | | 54 | |
| Formação Carumbataí | Sed. silte-arenoso | 1,3 | 21 |
| | Sed. silte-argiloso | 1,1 - 28,4 | 83 - 98 |
| Formação frati (calcária) no solo do diabásio | | 0,01 | 2986 |
| | | | 3351 - 6462 |

* Valor relacionado a níveis argilosos

** Valor relacionado ao contato entre as Formações Rio Claro e Carumbataí.

QUADRO 2 Modelo geoeétrico dentro dos limites da área de disposiçõ de resíduos.

| Horizonte Geoeétrico | SEVA | IP/ER | SEVA ER |
|--|------------|------------|------------|
| | mV/V | $\Omega.m$ | $\Omega.m$ |
| Sedimentos predominantemente arenosos (cobertura) | 1,7 - 2,5 | 125 - 141 | 6 - 103 |
| Resíduos | 5,6 - 34,4 | 23 - 41 | 7 - 13 |
| Cobertura com influência dos resíduos | 19,8 | 68 | 19 - 25 |
| Resíduos | 4,7 - 48,5 | 4 - 71 | 3 - 14 |
| Sedimentos predominantemente arenosos (com amádo:base da cava) | - | - | 15 - 29 |
| Sedimentos predominantemente arenosos da Formação Rio Claro (base da cava) | 0,1 | 517 - 927 | 786 - 1098 |

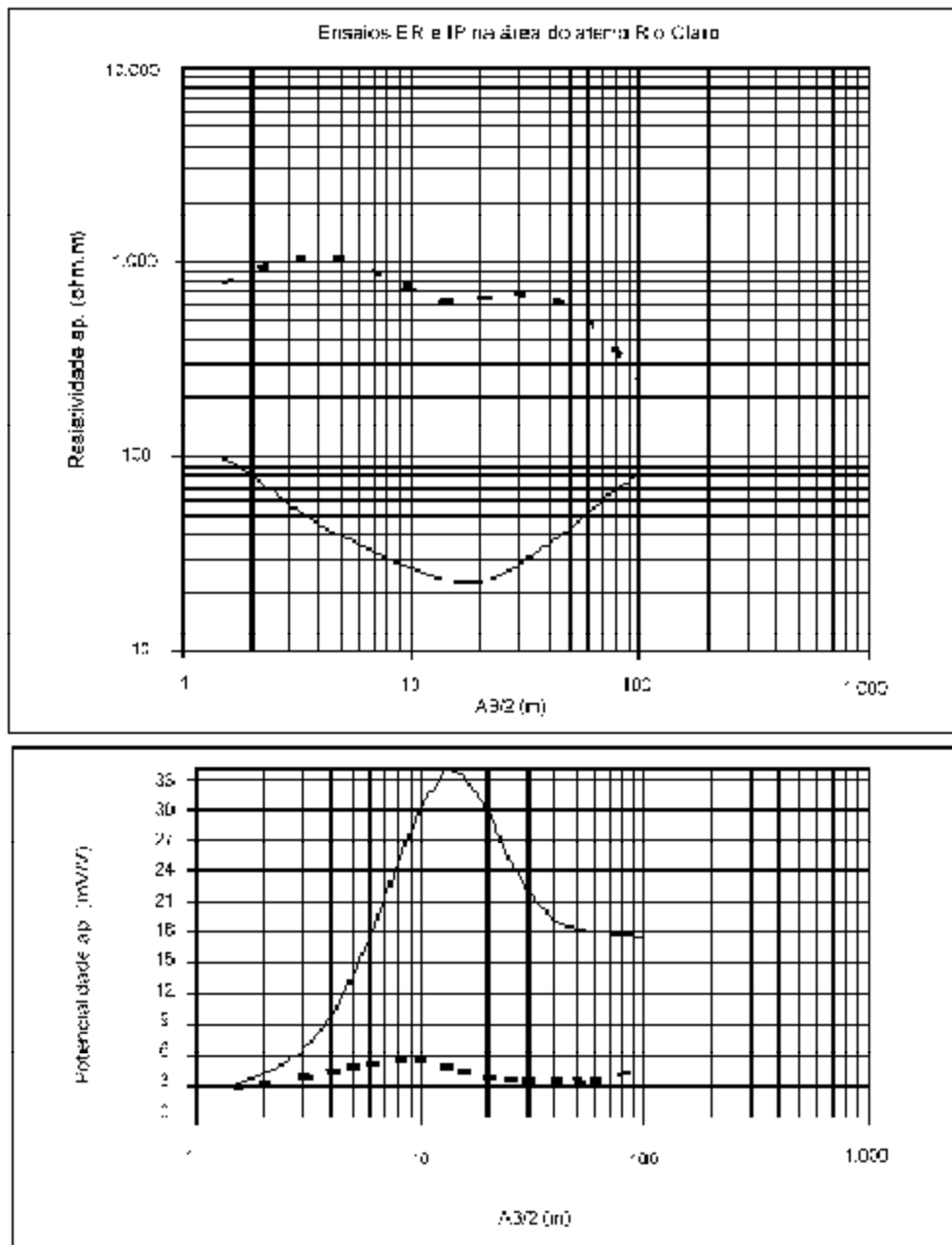


FIGURA 3. Curvas de campo das sondagens SEVIP(10) (linha contínua) e SEVIP(2) (linha tracejada).

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 4).

Com o objetivo de determinar a estrutura do aterro e avaliar se a polarizabilidade seria sensível à presença dos resíduos, foi executada a linha CEIP(4) (Figura 5) ensaiada de fora para dentro do aterro, conforme se

observa na Figura 2. Nessa figura é mostrada as pseudo-seções de CE ensaiadas (a) e (b) com as respectivas pseudo-seções sintéticas (c) e (d), obtidas pelo modelo geoeétrico bidimensional interpretado.

Na Figura 6, observam-se as pseudo-seções e o modelo interpretado da linha CEIP(1a), situadas fora dos limites da área de disposição de resíduos (Figura 2). Ensaio este que foi realizado com o objetivo de detectar a presença da pluma de contaminação nos arredores do aterro.

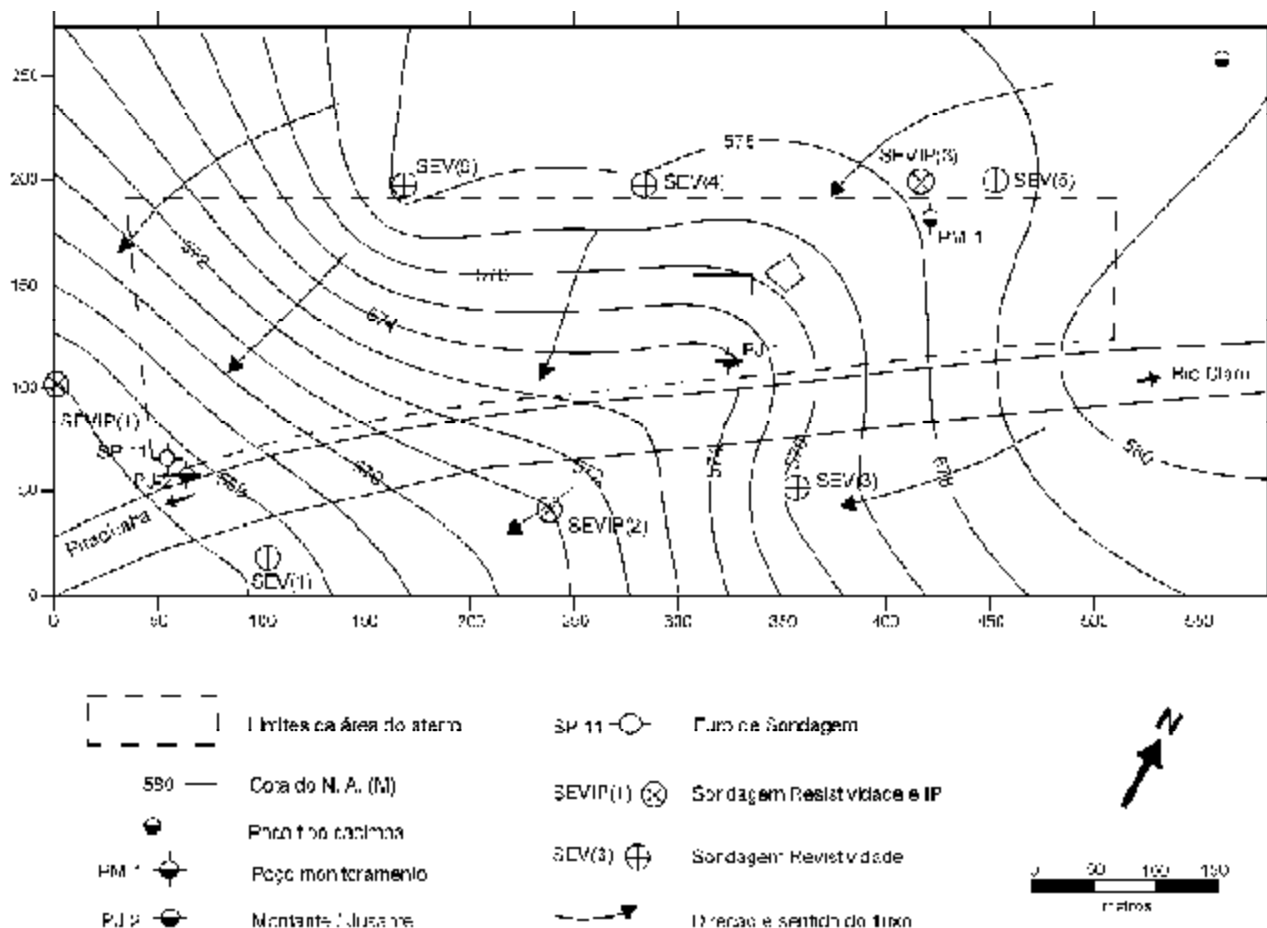


FIGURA 4. Mapa potenciométrico na área do aterro Rio Claro.

Linha CEP (4) Caminhamento de Resistividade e IP (dipo o 5 m)
15 de agosto de 1989 - Período de estiagem (Aterro Rio Claro)

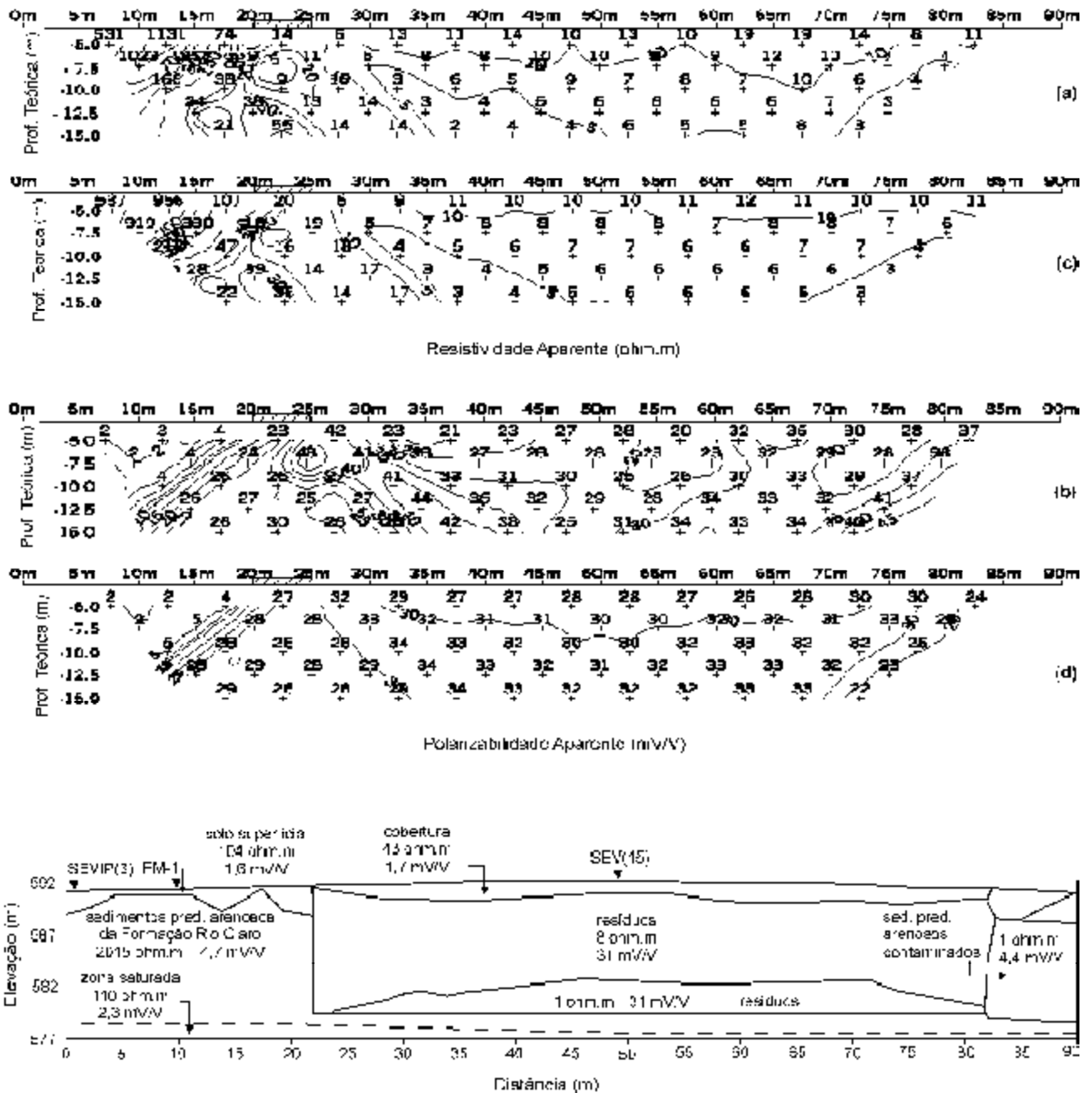


FIGURA 5. (a) e (b) pseudo-seções de resistividade e polarizabilidade aparentes obtidas no aterro Rio Claro. (c) e (d) pseudo-seções sintéticas obtidas pelo modelo geoeletrico bidimensional.

Linha CEIP (1a) - Caminhamento de Resistividade e IP (cipolo 10 m)
 Agosto de 1998 - Período de estiagem (Aterro Rio Claro)

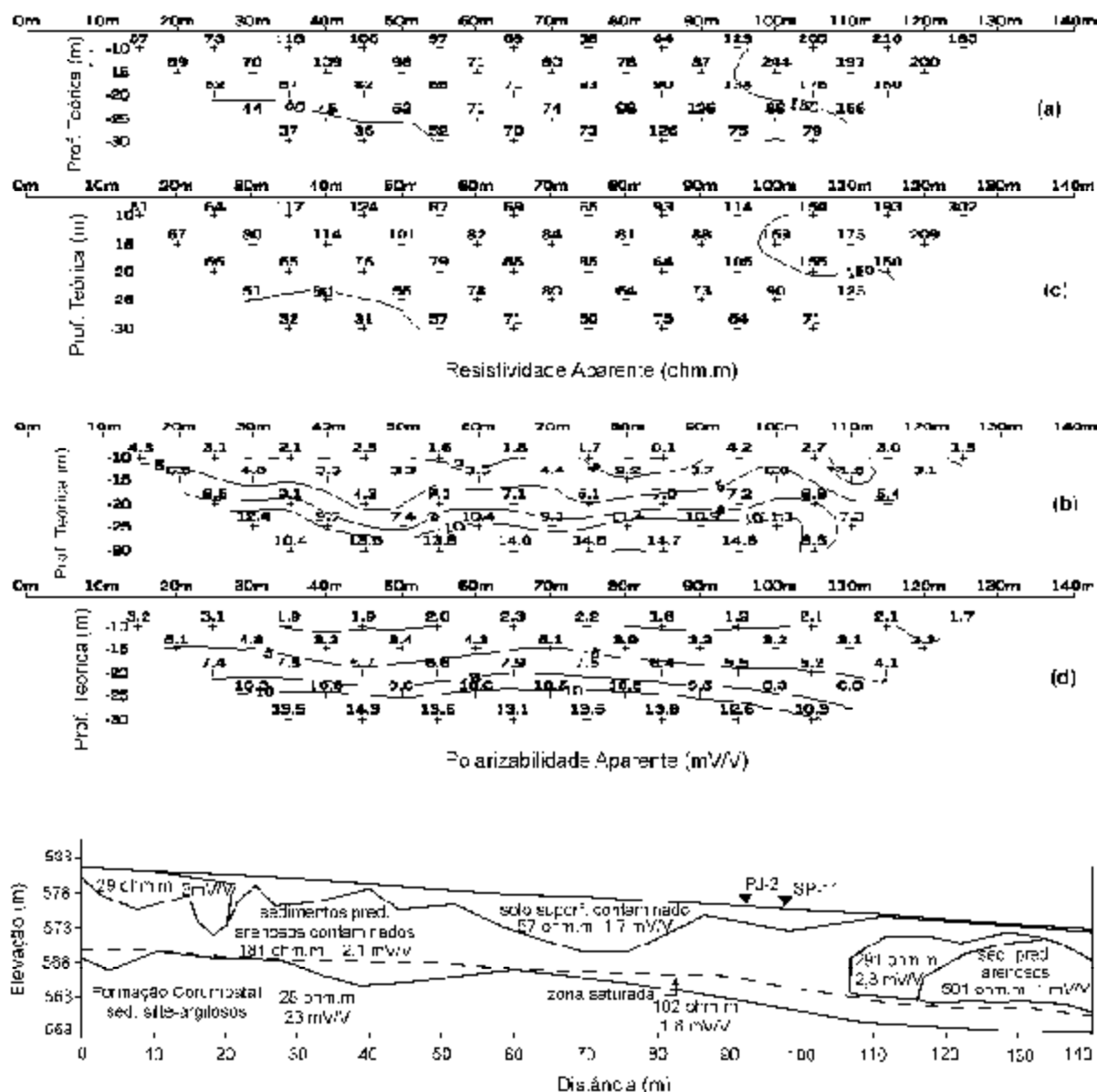


FIGURA 6. Pseudo-seções de resistividade e polarizabilidade aparentes e o modelo interpretado da Linha CEIP (1a).

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os sedimentos predominantemente arenosos saturados (Quadro 1) são os que apresentam maior continuidade lateral encontrado em todas as SEVs, e são os mais condutivos quando estão contaminados por chorume. Comparando as medidas de condutividade, realizadas com condutímetro digital, de amostras de água coletadas nos poços de monitoramento PM-1, PJ-1 e PJ-2, respectivamente, 185,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (54 $\Omega\cdot\text{m}$), 243,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (41 $\Omega\cdot\text{m}$) e 122,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (89 $\Omega\cdot\text{m}$), com relação a medida de 36,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (273 $\Omega\cdot\text{m}$) em amostra

coletada no poço tipo cacimba, localizado a montante do aterro, distante da cava (Figura 2), interpreta-se a influência de contaminantes na zona saturada, indicando contaminação, conforme constatado pela metodologia geofísica.

A interpretação conjunta da polarizabilidade e da resistividade permitiu determinar os diferentes litotipos predominantes na Formação Corumbataí, identificando materiais silte-arenosos (baixa polarizabilidade) e materiais silte-argilosos com altos valores de polarizabilidade

(Quadro 1). Assim sendo, a polarizabilidade distinguiu os sedimentos silte-arenosos do silte-argilosos, o que não foi possível com a resistividade analisada sozinha, utilizando somente as sondagens de resistividade.

Os resíduos apresentam baixas resistividades e predominantemente altas polarizabilidades (Quadro 2). Os valores respectivos de polarizabilidade refletem a presença de materiais polarizáveis como latas, refugos eletrônicos, pedaços de ferro, papéis impressos e material de construção presentes na cava de resíduos (Volgesang, 1995).

O substrato resistivo, relacionado à base do aterro, compõe-se dos sedimentos predominantemente arenosos, apresentando o fenômeno de IP baixíssimo, devido ao baixo teor de argila presente nesse horizonte (Quadro 2).

O sentido do fluxo subterrâneo na área do aterro de Rio Claro é predominantemente para SW (Figura 4), conforme indicado pelas direções preferenciais do fluxo d'água subterrâneo.

Na Figura 5, observa-se do lado esquerdo das pseudo-seções (a) e (b), flancos de anomalias de resistividade e polarizabilidade aparentes associadas ao limite lateral da cava de resíduos, situado entre as posições de estacas de 20 e 25 m. Do lado direito, sem muita definição nas pseudo-seções, inferiu-se o outro limite lateral da cava, conforme observação local. A anomalia esquerda melhor definida, separa a zona de altas resistividades aparentes (maiores que 300 Ω .m) associadas a baixos valores de polarizabilidades aparentes (menores que 10 mV/V) relativa do meio natural (solo areno-argiloso) da zona de baixas resistividades aparentes associadas a altas polarizabilidades aparentes que caracterizam a cava de resíduos.

Os valores 300 Ω .m e 10 mV/V foram escolhidos em função de outros ensaios de CE, posicionados fora

da área do aterro. Quanto aos altos valores de polarizabilidade aparentes em relação aos encontrados fora da cava, refletem provavelmente a presença de materiais polarizáveis dentro da mesma, como metais (latas), vidros cerâmicos e papel impresso que são materiais eletricamente carregáveis, normalmente presentes em resíduos urbanos (Vogelsang, 1995). Materiais de empréstimo utilizados na cobertura do aterro (sedimentos areno-argilosos) podem também estarem contribuindo para o aumento do efeito IP. As resistividades baixas encontradas na cava refletem as elevadas concentrações de íons cloreto (Cl^-) e outros íons, tais como sódio (Na^+), sulfatos (SO_4^{2-}) e nitrato (NO_3^-) que contribuem para o aumento da condutividade elétrica do percolado.

O modelo bidimensional evidencia a determinação dos limites da cava de resíduos, alguns níveis de solo residual areno-argiloso e a zona saturada. O solo residual na parte direita do modelo com baixo valor de resistividade reflete a presença a contaminação ao redor da cava.

A linha CEIP(1a) (Figura 6), ensaiada ao lado do aterro (Figura 2), apresenta valores de r_a inferiores a 300 Ω .m, predominando valores inferiores a 150 Ω .m, que refletem a presença da contaminação proveniente do aterro, conforme medidas de condutividade elétrica de amostras de água de poços de monitoramento, descritas anteriormente. Quanto aos valores de M_a , o comportamento de crescimento dos valores, com o aumento da profundidade teórica, associa-se a sedimentos predominantemente arenosos da Formação Rio Claro na parte superior (baixas polarizabilidades), e na parte inferior (mais alta polarizabilidade), os sedimentos siltosos da Formação Corumbataí. Não é evidente a sensibilidade da polarizabilidade no mapeamento da contaminação fora da área de resíduos, ao contrário da resistividade.

CONCLUSÕES

Os resultados mostram 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 (latas), restos eletrônicos (pilhas, componentes de circuito elétrico) e papel impresso (jornais, revistas). As resistividades baixas encontradas devem-se às elevadas concentrações de íons cloreto e outros íons, tais como sódio, sulfatos e nitratos que contribuem para o aumento da condutividade elétrica do percolado. Além disso, foi possível mapear a estrutura do aterro (limites laterais e profundidades da base) através da

modelagem bidimensional controlada pelo conhecimento das unidades litológicas e pelas informações obtidas de sondagem à percussão.

Na área do aterro de Rio Claro, o sentido do fluxo das águas subterrâneas é predominantemente para SW.

Na definição do modelo geolétrico para a Formação Rio Claro e Corumbataí, nos locais estudados, 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 predominantemente arenosos, silte-argilosos e silte arenosos.

Em conformidade com os objetivos propostos para o estudo, pode-se considerar que os resultados geofísicos obtidos evidenciam a potencialidade de aplicação conjunta dos métodos eletrorresistividade e polarização induzida, na caracterização geoeétrica da área de disposição de resíduos sólidos urbanos da cidade de Rio Claro.

Os resultados alcançados pela técnica da SEV possibilitaram definir o sentido do fluxo da água subterrânea, as profundidades das cavas de resíduos e dos diferentes estratos geoeétricos, assim como, a identificação litológica dos materiais em subsuperfície, que compõem as Formações Rio Claro e Corumbataí. Nessa última, a polarizabilidade foi de grande importância na identificação dos materiais, principalmente pelo fato de que os valores de resistividade sozinhos não puderam distinguir os materiais silte-arenosos e silte-argilosos, que apresentaram variações de resistividade sobrepostos.

Pela análise das curvas de SEVs, concluiu-se, para as áreas de estudo, que ocorre um aumento do valor de polarizabilidade na seqüência dos materiais: arenosos → silte-arenosos → silte-argilosos e o aumento da resistividade, na seqüência: siltosos → arenosos.

Ficou evidente neste trabalho que a polarizabilidade é sensível à presença de resíduos, e que o efeito IP é relacionado à presença de materiais polarizáveis dispostos na cava, como latas, papéis, restos de materiais de construção (pedaços de metais), rejeitos hospitalares (agulhas), restos eletrônicos (pilhas, componentes de circuito elétrico) que são materiais eletricamente polarizáveis, assim como, a polarização de membrana que ocorre nos materiais de empréstimo utilizados para a cobertura dos aterros.

A técnica do caminhamento elétrico, com o arranjo dipolo-dipolo, mostrou grande potencial na determinação da presença de descontinuidades laterais, que, nesse estudo, corresponderam aos limites laterais das cavas de resíduos e às variações texturais das litologias.

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 dos locais estudados, as seguintes sugestões: (a) instalação de três piezômetros, um a montante (P1) e dois a jusante (P2 e P3) no aterro de Rio Claro, conforme está indicado na Figura 4; (b) instalação e reparo das canaletas de concreto, assim como, o recobrimento planejado dos resíduos.

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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CARPENTER, P.J.; KAUFMANN, R.S.; PRICE, B. Use of resistivity soundings to determine landfill structure. **Ground Water**, v. 28, n. 4, p. 569-575, 1990.
2. COTTAS, L.R. **Estudos geológicos-geotécnicos aplicados ao planejamento urbano de Rio Claro - SP**. São Paulo, 1983. 2 v. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
3. INMAN, J.R. Resistivity inversion with ridge regression. **Geophysics**, n. 40, p. 789-817, 1975.
4. KELLER, G.V. & FRISCHKNECHT, F.C. **Electrical methods in geophysical prospecting**. Oxford: Pergamon Press, 1977, 517 p.
5. MELO, M.S. **A Formação Rio Claro e depósitos associados: sedimentação neocenoica na depressão periférica paulista**. São Paulo, 1995. 144 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
6. MOURA, H.P. **Emprego da eletrorresistividade e da polarização induzida na caracterização geoeétrica 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.
7. PARASNIS, D.S. **Principles of applied geophysics**. Chapman & Hall, 5th ed. [S.l.], 1986, 402 p.
8. PORSANI, J.L. **Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado - SP**. Rio Claro, 1999. 148 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas e Naturais, Universidade Estadual Paulista.
9. RIJO, L. **Modeling of electric and electromagnetic data**. Salt Lake City, 1977. 242 p. Ph. D. Thesis - University of Utah.
10. SCINTREX LIMITED. **IPR - 12 time domain IP/resistivity receiver: Operation manual**. Ontario, 1995. Paginação irregular.
11. 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.
12. SUMNER, J.S. **Principles of induced polarization for geophysical exploration**. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976, 277 p.
13. TECSOLO - Engenharia de Fundações Ltda. **Execução dos serviços de caracterização geológica-geotécnica no aterro**

- sanitário de Rio Claro.** Rio Claro, 1993, 65 p. Relatório Interno.
14. VOGELANG, D. **Environmental Geophysics. A practical guide.** Berlim: Springer-Verlag, 1995, 174 p.
15. ZAINÉ, J.E. **Geologia da formação Rio Claro na Folha Rio Claro-SP.** Rio Claro, 1994. 89 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.