

ELETRORRESISTIVIDADE 3D – UMA AVALIAÇÃO PRELIMINAR DA TÉCNICA

Otávio Coaracy Brasil Gandolfo^{1,2} e José Domingos Faraco Gallas²,

Recebido em 22 junho, 2005 / Aceito em 19 setembro, 2005
Received on June 22, 2005 / Accepted on September 19, 2005

ABSTRACT. This paper shows the results of a 3D resistivity survey conducted to assess the potential of this acquisition technique in shallow geophysics studies. Twenty-five electrodes arranged in a square mesh (4m × 4m) were used for data acquisition (pole-pole array with 1-m spacing between electrodes). The results were compared with two different systems of data acquisition and confirmed the technique's capacity to map variations in 3D resistivity. The data acquisition also confirmed that the coverage of wider areas with this type of test will only be achieved with multi-electrode equipment and automated acquisition, given the time required to perform all the measures involved in this type of survey.

Keywords: 3D resistivity, geoelectrical imaging, applied geophysics, shallow geophysics.

RESUMO. Este trabalho apresenta os resultados de um levantamento 3D de eletrorresistividade e avalia a potencialidade desta técnica de aquisição de dados em estudos de geofísica rasa. Na aquisição dos dados foram utilizados 25 eletrodos dispostos em uma malha quadrada de 4m × 4m. O arranjo empregado foi o pólo-pólo com espaçamento entre eletrodos igual a 1m. Os resultados obtidos foram comparados utilizando-se duas distintas sistemáticas de aquisição de campo, ambas confirmando a capacidade da técnica em mapear as variações de resistividade em três dimensões. A experiência do levantamento de campo confirmou ainda que a viabilidade deste tipo de ensaio, de forma a cobrir áreas de maiores dimensões, só será viabilizada com utilização de sistemas multi-eletrodos e aquisição automatizada, devido ao tempo despendido na tomada de medidas neste tipo de levantamento.

Palavras-chave: eletrorresistividade 3D, imageamento geoeétrico, geofísica aplicada, geofísica rasa.

¹Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, Av. Prof. Almeida Prado, 532 – 05508-901 São Paulo, SP. Fone: (11) 3767-4853; Fax: (11) 3767-4767 – E-mail: gandolfo@ipt.br

²Universidade de São Paulo – USP, Rua do Lago, 562 – 05508-080 São Paulo, SP. Fone: (11) 3091-4232; Fone: (11) 3091-4232; Fax: (51) 3091-4207 – E-mails: gandolfo@usp.br; jgallas@usp.br

INTRODUÇÃO

Os dados de eletorresistividade são comumente interpretados supondo-se que a estrutura geoeétrica seja uni ou bi-dimensional (1D ou 2D) fornecendo, na maioria das vezes, bons resultados, desde que a geologia possa ser aproximada por modelos destes tipos.

Os dados de uma sondagem elétrica vertical (SEV), por exemplo, são interpretados assumindo-se um modelo geológico de estratos plano-paralelos, lateralmente infinitos. Neste modelo, a resistividade elétrica varia somente com a profundidade, constituindo o que se denomina modelo 1D.

Já o caminhamento elétrico, uma consagrada técnica de investigação lateral, é capaz de mapear as variações de resistividade elétrica em duas dimensões, quais sejam: X (distância) e Z (profundidade). Nesta situação, assume-se que a resistividade elétrica não sofra variações na direção Y (perpendicular à linha do perfil de caminhamento) e a interpretação é baseada em um modelo 2D de subsuperfície.

Entretanto, sabe-se que as feições geológicas em subsuperfície são tri-dimensionais (3D) e podem não ser corretamente representadas e interpretadas por modelos 1D e 2D. Em determinadas situações, portanto, técnicas de aquisição 3D passam a ter relevância e devem ser aplicadas.

Este artigo apresenta os resultados de campo onde foram testadas duas metodologias distintas de aquisição de dados 3D. Os resultados obtidos permitem uma avaliação das potencialidades e limitações da técnica, assim como a escolha de parâmetros de campo a ser utilizados em levantamentos futuros.

GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

O levantamento 3D foi realizado no Campus da USP, município de São Paulo-SP, próximo à raia olímpica. Neste local, caracterizado pela presença de um nível d'água subterrâneo relativamente raso (em torno de 3m), estão sendo realizados diversos estudos hidrogeológicos e geofísicos por pesquisadores da USP. A condutividade elétrica da água subterrânea, medida em alguns poços existentes na área, apresenta valores entre 200 a 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (50 a 25 Ωm).

A área encontra-se na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, integrante do Rift Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini et al., 1992). Sedimentos terciários do Grupo Taubaté, composto pelas formações Resende, Tremembé e São Paulo, superpostos pela Formação Itaquaquecetuba recobrem as rochas cristalinas do embasamento (Melo et al., 1989). A Formação Itaquaquecetuba corresponde aos depósitos de sistema fluvial

entrelaçado que ocorrem sob aluviões holocênicos dos rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí. Nas proximidades do local onde foi realizado o levantamento (porção norte da Cidade Universitária) ocorrem estes sedimentos.

LEVANTAMENTOS 3D DE ELETRORRESISTIVIDADE

A baixa utilização das técnicas de eletorresistividade 3D por parte do meio técnico-científico deve-se, em parte, ao enorme tempo gasto na aquisição dos dados, devido à grande quantidade de medidas necessárias para a execução do levantamento de campo e por tratar-se de uma técnica de aquisição ainda nova e pouco conhecida. Nesta modalidade de aquisição, os eletrodos geralmente são dispostos em uma malha quadrada (*grid*), adotando-se o mesmo espaçamento entre eletrodos nas direções ortogonais X e Y. Entretanto, *grids* retangulares podem também ser utilizados (Loke & Barker, 1996). O arranjo comumente utilizado é o pólo-pólo, pois apresenta algumas facilidades operacionais em campo. Dois eletrodos (um de corrente, A, e outro de potencial, M) permanecem no *grid*, enquanto o outro par (B e N) permanece a uma distância consideravelmente grande da malha ("infinito"), de tal forma que suas influências possam ser negligenciadas, completando os dipolos AB e MN.

Em um levantamento 3D podem também ser utilizados os arranjos pólo-dipolo e dipolo-dipolo. Segundo Loke (1999), o arranjo pólo-pólo é o que oferece o maior número de possíveis medidas independentes, se comparado aos outros arranjos, para malhas de dimensões reduzidas (menores que 12 por 12 eletrodos). Além disso, é o que fornece a melhor cobertura horizontal uma vez que a perda de informação nas bordas é mínima.

A principal vantagem do pólo-pólo é a elevada razão sinal/ruído que o arranjo propicia. A grande desvantagem fica por conta da baixa resolução (principalmente em níveis mais profundos de investigação), a necessidade de espaço físico para colocação dos eletrodos no "infinito" e a maior vulnerabilidade a ruídos causados por correntes telúricas na aquisição dos dados, devido à maior distância entre os eletrodos de potencial. No entanto, estes ruídos (intensamente presentes em áreas urbanas) são minimizados pela já citada elevada relação sinal/ruído proporcionada pelo arranjo.

O emprego de diferentes arranjos como o dipolo-dipolo e pólo-dipolo, elimina a utilização do eletrodo "N" de referência e, conseqüentemente, esta fonte de ruídos do arranjo pólo-pólo.

EXECUÇÃO DO LEVANTAMENTO DE CAMPO

No estudo realizado foi efetuada uma malha regular, composta por 25 eletrodos espaçados de 1m constituindo, portanto, um quadrado de dimensão 4m x 4m.

O arranjo utilizado foi o pólo-pólo com a colocação dos dois eletrodos fixos (B e N) a uma distância “infinitamente” grande (em torno de 100m) da malha quadrada.

A sistemática de aquisição dos dados seguiu a metodologia proposta por Loke & Barker (1996), na qual o eletrodo de corrente permanece fixo na posição da estaca 1 e efetua-se a leitura do potencial em cada ponto da malha (estacas 2, 3, ..., 25). Em seguida, o eletrodo de corrente avança para a estaca 2, medindo-se o potencial nas posições correspondentes às estacas 3, 4 até 25. O procedimento se repete até o fechamento da malha. Por uma questão de reciprocidade é necessário efetuar medidas de potencial apenas nos eletrodos posicionados em estacas de número superior àquela onde está posicionado o eletrodo de corrente. Para fins comparativos dos resultados obtidos, denominaremos esta sistemática de “aquisição completa” (Figura 1).

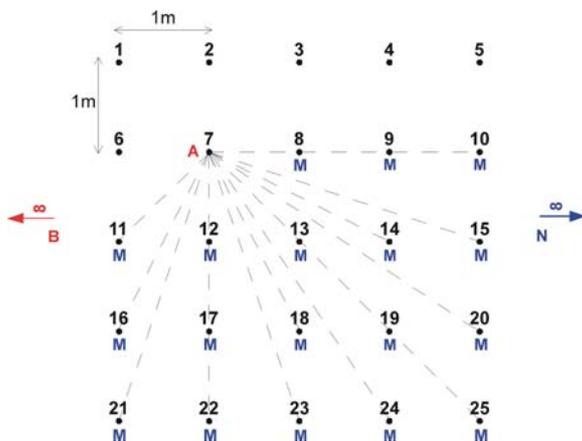


Figura 1 – Geometria dos eletrodos utilizados na aquisição 3D e esquema de “aquisição completa” (modificada de Loke & Barker, 1996).

Na configuração pólo-pólo, o número máximo de medidas independentes (n_{max}) que pode ser efetuado utilizando-se n_e eletrodos, é dado pela seguinte fórmula (Xu & Noel, 1993):

$$n_{max} = \frac{n_e(n_e - 1)}{2} \tag{1}$$

Na aquisição dos dados com os 25 eletrodos, foram realizadas 300 medidas para o fechamento da malha. O tempo gasto na execução foi de 3,5 horas, utilizando um resistímetro SAS300 (ABEM Instruments) e duas pessoas trabalhando em campo.

Vale ser salientado que à medida que se aumenta a quantidade de pontos da malha, o número de medidas necessárias para o fechamento da mesma cresce de maneira significativa. Ilustrando,

caso o levantamento cobrisse uma área ligeiramente maior, por exemplo, 6m x 6m (correspondendo a uma malha regular de 7 x 7 eletrodos, totalizando 49), teriam de ser realizadas 1176 medidas e a aquisição dos dados poderia levar aproximadamente 14 horas, nas mesmas condições do levantamento apresentado neste trabalho.

O fato demonstra a clara necessidade da utilização de equipamentos automatizados multi-eletrodos para que levantamentos 3D sejam operacionalmente viabilizados de forma a cobrir áreas de maiores dimensões. Na prática, malhas menores que 10 x 10 surtiriam pouco efeito, uma vez que a área coberta seria muito pequena (Loke, 1999).

Uma forma alternativa de aquisição de dados, visando a redução do número de medidas em campo, consiste na execução de medidas ao longo de linhas horizontais, verticais e diagonais a 45°, partindo-se do eletrodo de corrente posicionado no *grid* (Loke & Barker, 1996). Este modo de aquisição, denominado pelos autores de “*cross-diagonal*” (Figura 2), reduz o número de medidas necessárias para execução do ensaio (e, conseqüentemente, o tempo despendido para aquisição das mesmas) sem que ocorra degradação significativa da qualidade do modelo final obtido.

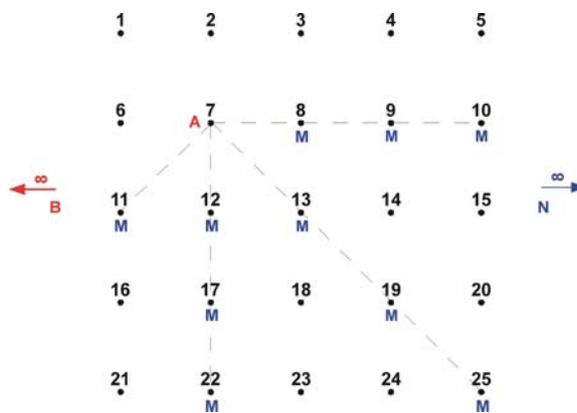


Figura 2 – Técnica de aquisição “*cross-diagonal*” do levantamento 3D (modificada de Loke & Barker, 1996).

Utilizando-se esta técnica simplificada de aquisição, o número de medidas foi reduzido de 300 para 160. Ou seja, o tempo gasto no levantamento foi praticamente reduzido à metade.

PROCESSAMENTO DOS DADOS

Em cada ponto da malha os valores das resistividades elétricas aparentes (ρ_a) foram calculados através da Eq.(2) dada por,

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \tag{2}$$

onde $K = 2\pi a$ é a constante geométrica para o arranjo pólo-pólo (calculada para cada ponto da malha retangular onde o potencial foi medido) e “ a ” é a distância entre o eletrodo de corrente e o de potencial.

No processamento dos dados foi utilizado o *software* RES3DINV (Geotomo *Software*, 2004) que utiliza um método de inversão por mínimos quadrados com suavização restringida (*smoothness-constrained least-square inversion*). O modelo 3D utilizado pelo programa consiste em camadas subdivididas em blocos retangulares, cada qual possuindo um determinado valor de resistividade (Figura 3).

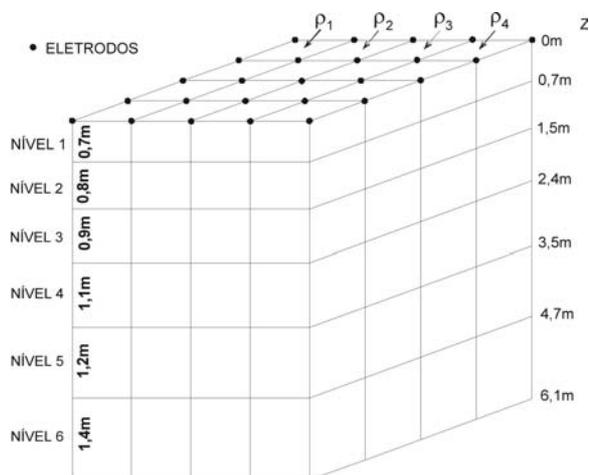


Figura 3 – Modelo de discretização utilizado no processamento dos dados 3D (modificado de Loke & Barker, 1996).

Os blocos que compõe uma fileira possuem o mesmo tamanho. A largura dos blocos geralmente é igual ao espaçamento entre eletrodos. Um melhor refinamento do modelo pode ser alcançado utilizando-se larguras equivalentes a meio espaçamento entre eletrodos, o que acarreta também aumento no tempo necessário para inversão dos dados e o cálculo do modelo geoeletrico.

A espessura dos blocos aumenta à medida que aumentam os níveis em profundidade. Os eletrodos ocupam os vértices superiores dos blocos da primeira camada, cuja espessura é de 0,7 vezes o espaçamento entre eletrodos. Testes empíricos realizados por Loke & Barker (1996) demonstraram que, se adotado este valor de espessura, ligeiramente inferior que à “profundidade mediana de investigação” (0,867) do arranjo pólo-pólo proposta por Edwards (1977), são satisfeitas algumas condições importantes no processo de inversão, quais sejam: tempo de convergência do modelo e resolução do mesmo. No modelo de discretização utilizado pelo programa, a espessura de cada camada inferior subsequente é aumentada de 15% em relação a superior. O número

de camadas do modelo é estabelecido de tal forma que a profundidade do topo superior da última fileira de blocos seja mais rasa que a “profundidade mediana de investigação” correspondente ao maior espaçamento entre eletrodos verificado na aquisição 3D ($a = 4 \cdot \sqrt{2}$, neste caso de malha quadrada $4m \times 4m$).

RESULTADOS OBTIDOS

Na Figura 4 encontra-se o resultado da inversão dos dados, correspondente ao modo de aquisição completa, fornecido pelo programa RES3DINV. Os valores modelados de resistividade (exibidos nos nós do *grid*) são apresentados em “*slices*” correspondentes aos seis níveis de investigação em profundidade, em conformidade com o modelo discretizado da Figura 3. A escala cromática representando as resistividades varia dos tons avermelhados (mais condutivo) até a tonalidade azul (mais resistivo).

Observam-se valores mais elevados de resistividade elétrica no primeiro nível, ocorrendo uma diminuição dos mesmos em profundidade. A partir do nível 5 de investigação, as resistividades tendem a aumentar ligeiramente.

O nível superior, exibindo maiores resistividades elétricas, corresponde a uma camada de solo seco com matéria orgânica, de acordo com as informações das sondagens existentes no local. No segundo nível, podem ser observadas grandes variações na distribuição das resistividades.

A queda dos valores de resistividade a partir do nível 3 é atribuída a uma camada de argila plástica e à presença do nível d’água raso no local (em torno de 3m), assim como influência da capilaridade.

Na Figura 5, é apresentado o resultado obtido com a aquisição “*cross-diagonal*”. Observa-se uma grande similaridade deste modelo com aquele obtido através da aquisição completa, principalmente nos três primeiros níveis de investigação. Algumas discrepâncias podem ser observadas nos níveis mais profundos de investigação (níveis 4 e 5). Isto deve-se às diferenças das densidades de amostragem entre os dois sistemas de aquisição, em que ambos perdem resolução com o incremento da profundidade.

A consistência dos dados pode ser checada comparando-se os resultados da eletrorresistividade 3D com outros obtidos em levantamento 2D (caminhamento elétrico) e sondagem elétrica vertical (SEV) também realizados na área de estudo.

A distribuição de resistividade em profundidade, exibindo o padrão $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$, pode ser observada na curva da SEV realizada e o respectivo modelo geoeletrico correspondente (Figura 6).

A Figura 7 apresenta um corte vertical do modelo 3D na

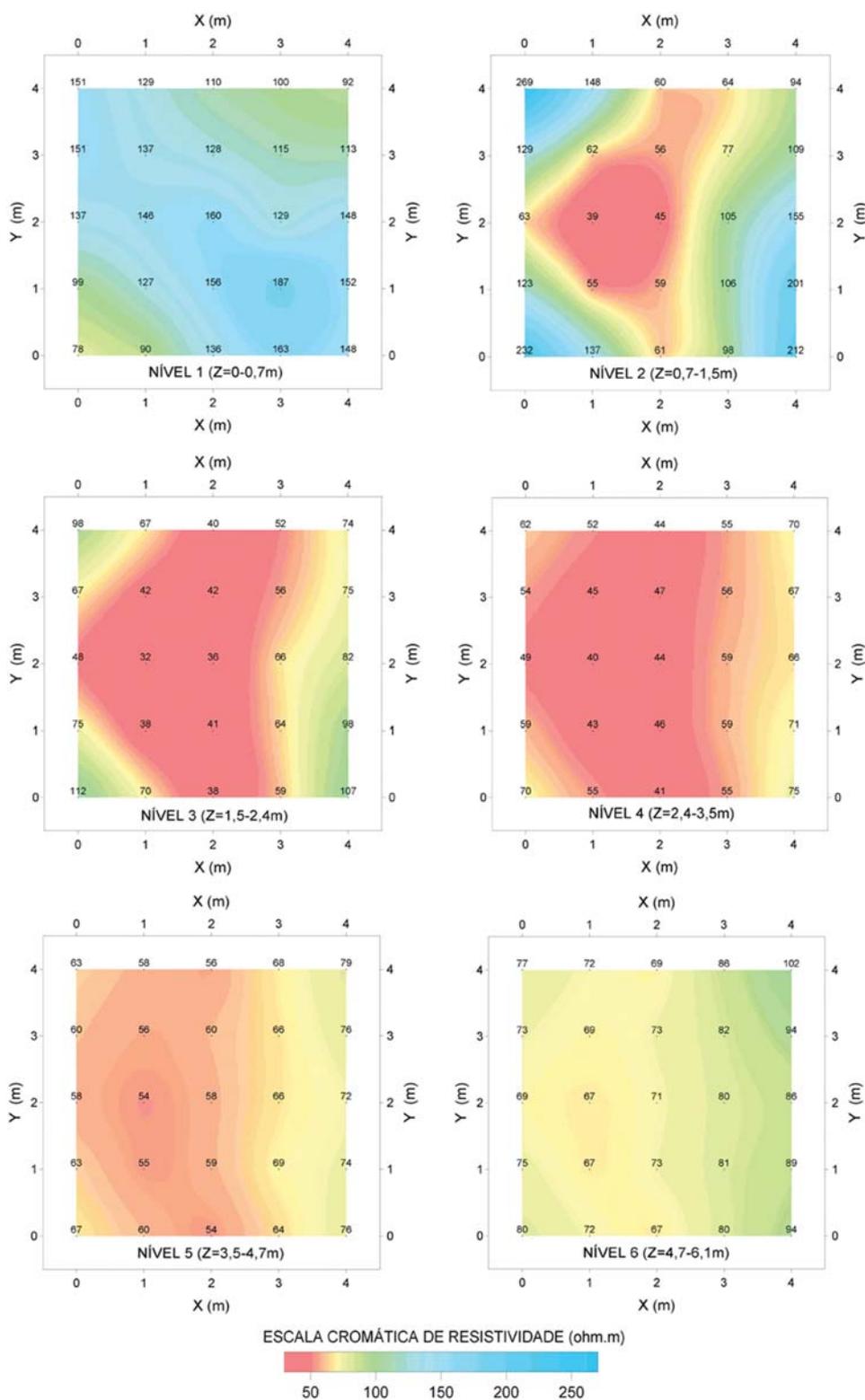


Figura 4 – Modelo geoeétrico obtido no modo de “aquisição completa”.

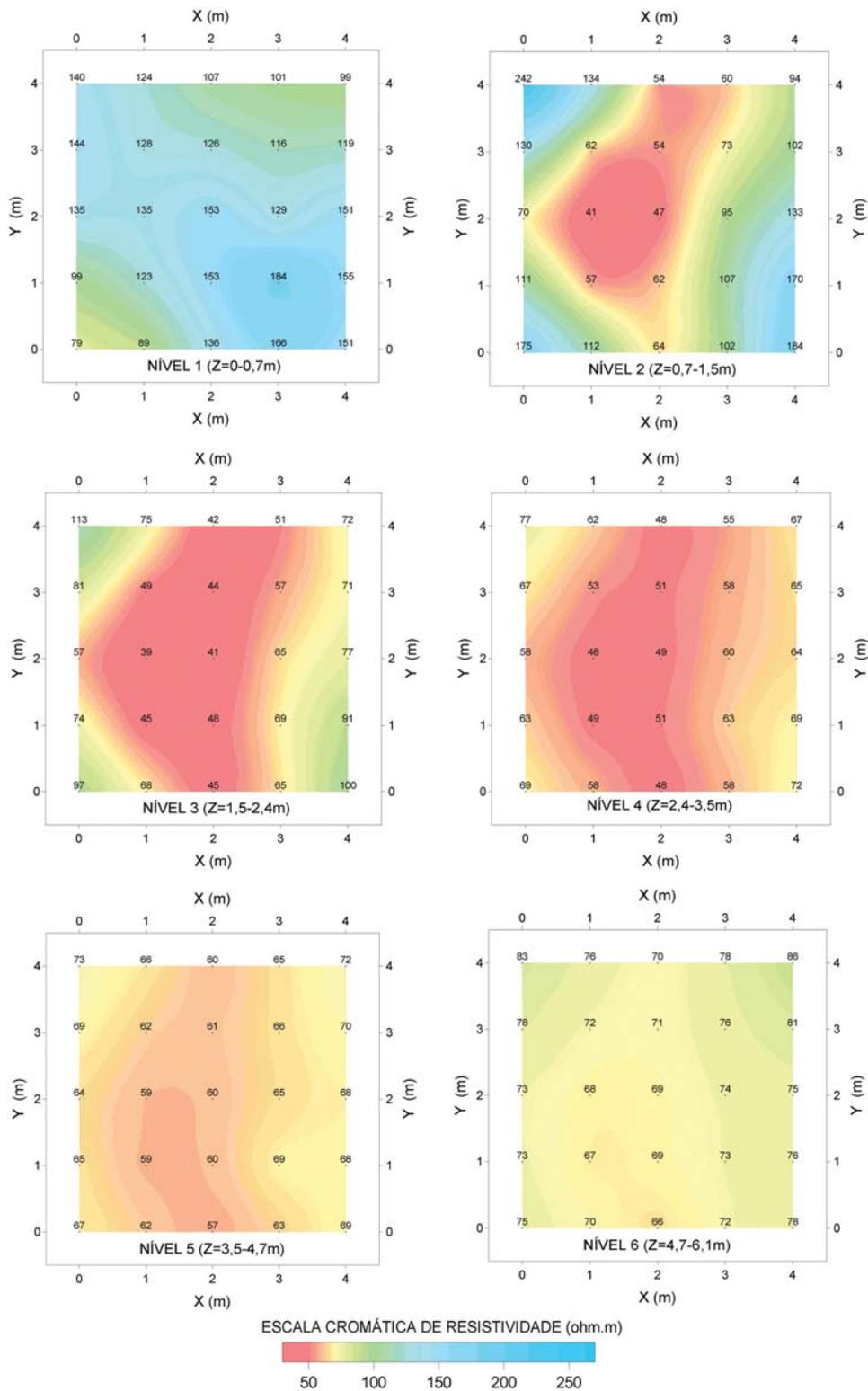


Figura 5 – Modelo geoeétrico obtido no modo de aquisição "cross-diagonal".

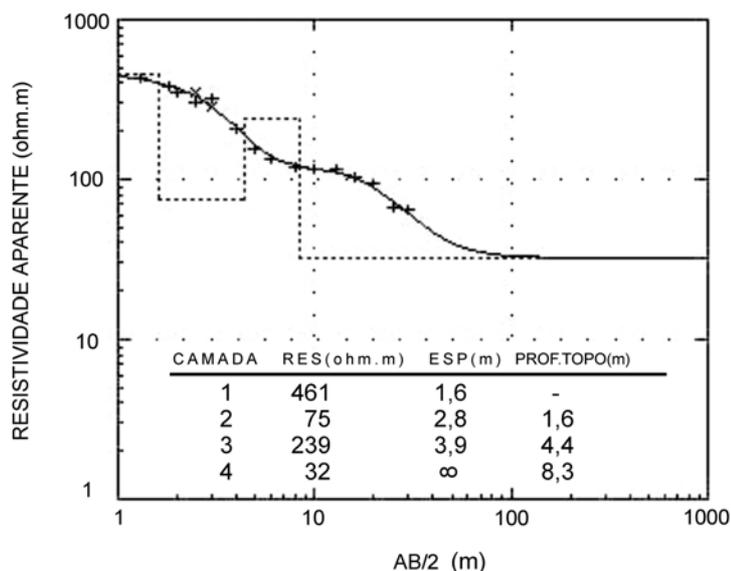


Figura 6 – SEV realizada na área de estudo.

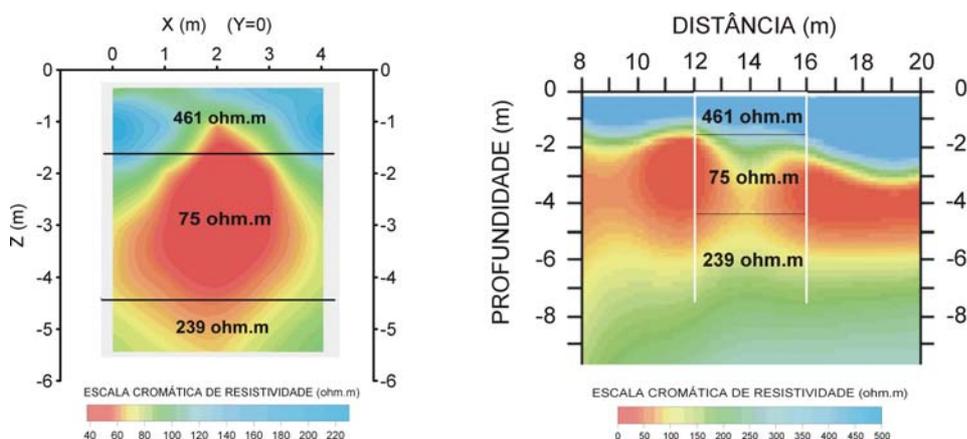


Figura 7 – Seção vertical (X, Z em Y = 0) do modelo 3D (esquerda) e segmento do modelo geoeétrico obtido em levantamento 2D com arranjo pólo-pólo e espaçamento entre eletrodos igual a 1m (direita). A interpretação da SEV encontra-se lançada sobre as seções.

posição $Y=0$, que pode ser comparado com um segmento do modelo geoeétrico 2D obtido do processamento dos dados do caminhamento elétrico (arranjo pólo-pólo com espaçamento entre eletrodos igual a 1m e treze níveis de investigação em profundidade). A exata posição onde o levantamento 3D foi realizado está destacada pela moldura branca. Para fins comparativos, o modelo 1D da SEV foi lançado sobre ambas seções da Figura 7.

As menores resistividades verificadas no levantamento 3D, se comparadas aos valores observados no caminhamento elétrico e na SEV, podem ser explicadas como consequência de intensas chuvas que ocorreram na época em que foi realizada a aquisição dos dados.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho comprovam a eficácia de levantamentos 3D em mapear variações de resistividade tridimensionalmente, com potencialidade de aplicações em hidrogeologia, geotecnia e em meio ambiente.

Entretanto, de forma a cobrir áreas de maiores dimensões, como na maioria das situações, faz-se necessária a utilização de elevado número de eletrodos na malha de investigação, acarretando aumento excessivo no tempo de aquisição dos dados de campo, podendo até inviabilizar a realização do trabalho.

Desta forma, a utilização sistemática de levantamentos 3D de resistividade em situações práticas está, de fato, condicionada à utilização de equipamentos multi-eletrodos e/ou com aquisição automatizada.

Utilizando os dois modos de aquisição propostos por Loke & Barker (1996), pode ser verificada a eficácia dos mesmos e a possibilidade de utilização de um modo de coleta dos dados mais expedito. A comparação dos modelos obtidos com as duas distintas sistemáticas, demonstra a viabilidade da aquisição mais simplificada “*cross-diagonal*”, onde puderam ser alcançados resultados igualmente satisfatórios se comparados com os obtidos pelo levantamento 3D completo.

O modelo geoeletrico final obtido pelo levantamento 3D está em plena conformidade com aqueles obtidos em levantamento 2D (caminhamento elétrico) e SEV, ambos realizados na mesma área de estudo.

AGRADECIMENTOS

Ao técnico Paulo Rodrigues de Lima do Instituto de Geociências da USP, pelo auxílio nos trabalhos de campo. À CAPES pela bolsa de estudo fornecida. À FAPESP pelo apoio concedido em Projeto de Auxílio à Pesquisa e também pela bolsa de estudo oferecida.

REFERÊNCIAS

- EDWARDS LS. 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42: 1020–1036.
- GEOTOMO SOFTWARE. 2004. RES3DINV ver.2.14, 69 pp.
- LOKE MH & BARKER RD. 1996. Practical techniques for 3D resistivity survey and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44: 499–523.
- LOKE MH. 1999. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys. Notes, 57 pp. Disponível em: (<http://www.abem.se>).
- MELO MS, COIMBRA AM & RICCOMINI C. 1989. Evolução dos conhecimentos sobre a geologia da Bacia de São Paulo na década de oitenta. Workshop Geologia da Bacia de São Paulo, IG-USP/SBG, São Paulo: 1–11.
- RICCOMINI C, COIMBRA AM & TAKIYA H. 1992. Tectônica e sedimentação na Bacia de São Paulo. Seminário: Problemas Geológicos e Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo. Anais. ABAS/ABGE/SBG, São Paulo: 21–45.
- XU B & NOEL M. 1993. On the completeness of data sets with multielectrode systems for electrical resistivity survey. *Geophysical Prospecting*, 41: 791–801.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Otávio Coaracy Brasil Gandolfo. Graduado em Física pela PUC-SP em 1987 e em Geofísica pelo IAG-USP em 1991. Concluiu o mestrado em Geociências e Meio Ambiente, ênfase em Geofísica Aplicada pela UNESP – Universidade Estadual Paulista em 1999. Doutorando em Geociências (programa Recursos Minerais e Hidrogeologia) no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo – USP desde 2003. Atuou na iniciativa privada como prestador de serviços em geofísica aplicada de 1997 a 2003. Atualmente é Pesquisador do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo-IPT. Áreas de interesse: geofísica aplicada à hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental; integração de métodos geofísicos.

José Domingos Faraco Gallas. Bacharelou-se em Geologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 1978. Concluiu mestrado em Geofísica em 1990 pela Universidade Federal do Pará. Doutorou-se em Geociências e Meio Ambiente, ênfase em Geofísica Aplicada pela UNESP – Universidade Estadual Paulista em 2000. Foi Pesquisador do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT de 1979 até início de 2002. Atualmente é Prof. Doutor do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo – USP. Áreas de interesse: geofísica aplicada à prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental.