

PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM AQUÍFEROS CRISTALINOS COM O EMPREGO DE MÉTODOS INDIRETOS

José Domingos Faraco GALLAS

RESUMO

Os métodos geofísicos, particularmente a eletrorresistividade, vêm se consolidando como uma ferramenta eficaz na prospecção de águas de subsuperfície. Seu emprego proporciona considerável diminuição de custos na perfuração de poços tubulares, uma vez que o método detecta com precisão a existência de estruturas potencialmente aquíferas. O conteúdo deste trabalho traz aspectos técnico/teóricos do método da eletrorresistividade e sugere técnicas de aquisição, processamento e interpretação de resultados em uma área de rochas cristalinas. Para tanto, são apresentados os resultados de um caso real de uma área estudada no município de São José do Rio Pardo, São Paulo.

Palavras-chave: geofísica aplicada, eletrorresistividade, água subterrânea.

ABSTRACT

Geophysical methods, particularly electroresistivity are becoming a major tool in subsurface water exploration as their use diminishes costs by detecting precisely the existence of water-prone structures and thus optimizing well location. This paper brings some technical and theoretical aspects of the electroresistivity method and details the procedures for the acquisition, processing and interpretation of data from crystalline basement aquifers. Results of a real case study are presented, from an area in the municipality of São José do Rio Pardo, São Paulo.

Keywords: applied geophysics, electroresistivity, groundwater.

1 INTRODUÇÃO

A água é o mais precioso bem mineral, indispensável à existência da vida. Sua busca é cada vez mais intensa e o abastecimento através de rios e reservatórios de superfície torna-se cada vez mais difícil, devido à poluição ou quantidades que vão se tornando insuficientes à medida que aumenta o consumo. A geofísica aplicada, particularmente os métodos geoeletrônicos, constituem-se em uma ferramenta de grande valor na prospecção de águas subterrâneas.

O apresentado e discutido neste trabalho trata da aplicação da eletrorresistividade na

prospecção hidrogeológica, objetivando a detecção de fraturamentos em rochas cristalinas, potencialmente aquíferos produtores. Este tipo de estrutura é favorável à locação de poços tubulares profundos para o fornecimento de água.

Normalmente, fraturamentos assumem o comportamento de zonas de baixa resistividade encaixadas em um "background" mais resistivo. Isto deve-se ao fato de que a presença de fraturas/fissuras em uma matriz rochosa torna-se uma região que facilita a infiltração de águas e alteração da rocha. Estes processos têm como consequência proporcionar uma redução nos valores de resistividade originais da rocha (IPT 1994; GALLAS 1998, 2000).

Neste trabalho, na aquisição dos dados, empregou-se o arranjo de eletrodos dipolo-dipolo. Nas pseudo-seções dipolo-dipolo, as feições de baixa resistividade podem surgir sob a forma de eixos menos resistivos e/ou sob a forma de um incremento localizado das camadas mais superficiais de baixa resistividade, identificável nas pseudo-seções como feições de espessamento do pacote superficial condutivo. Tais assinaturas geofísicas são correlacionáveis a locais fraturados/falhados no substrato rochoso. Em áreas de rochas cristalinas, como neste caso, estas estruturas são favoráveis à presença de aquíferos.

O trabalho foi realizado pelo Laboratório de Geofísica Aplicada da Divisão de Geologia do IPT, no âmbito do Programa de Assistência Técnica aos Municípios – PATEM, atendendo à solicitação feita pela Prefeitura Municipal de São José do Rio Pardo, SP e da Secretaria da Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico – SCTDE.

2 GEOLOGIA

A região dos trabalhos localiza-se ao sul da Faixa de Cisalhamento Varginha, que possui direção aproximada E-W a WNW-ESE, deformando as rochas, que apresentam texturas miloníticas, sendo a deformação essencialmente dúctil.

Segundo ZANARDO (1992), podem ser distinguidas rochas de natureza metassedimentar e ortoderivada, afetadas pelos mesmos processos deformacionais. As litologias apresentam um comportamento estratiforme a irregular, com freqüentes mudanças composicionais, texturais e estruturais, verticais a laterais.

Após o evento das deformações plásticas, as rochas da região foram submetidas à deformação rúptil a rúptil-dúctil, gerando falhas, com orientação preferencial NE e sistemas de juntas paralelas. A idade dos eventos ainda é controvertida, HASUI & MIOTO (1992) admitem idade arqueana para o evento deformacional dúctil de baixo ângulo e idade paleoproterozóica para o cisalhamento dúctil de alto ângulo.

As rochas mais deformadas (que possuem bandamento composicional, foliação, fraturas etc), tais como gnaisses e quartzitos, serão mais susceptíveis à geração de planos de fraqueza (estes muitas vezes reativados por esforços tectônicos posteriores). Estes planos de fraqueza aumentam a porosidade e permeabilidade secundárias dessas rochas aflorantes, tornando-as favoráveis para constituir bons aquíferos. Por outro lado,

granitóides não deformados serão menos susceptíveis à geração de fraturas. Dessa forma, estas rochas não apresentarão as características de porosidade e permeabilidade necessárias para a infiltração, circulação e armazenamento de água subterrânea.

O relevo predominantemente ondulado que ocorre nesta região favorece a formação de manto de alteração e também a infiltração de água no subsolo, sendo esta região caracterizada por boa recarga de aquífero (CPRM 2002).

3 CONSIDERAÇÕES SOBRE ELETRORRESISTIVIDADE

3.1 Resistividade aparente (ρ_a)

As técnicas mais utilizadas para medir a resistividade em subsuperfície são aquelas que utilizam uma fonte artificial para introduzir uma corrente elétrica no subsolo. Isto é feito por intermédio de dois eletrodos em contato galvânico com o solo. Através deste circuito (eletrodos/subsolo) estabelece-se um fluxo de corrente. Pode-se medir o potencial originado pelo referido fluxo por intermédio de outro par de eletrodos posicionado nas proximidades, possibilitando determinar a resistividade efetiva ou aparente do subsolo.

Fisicamente, a corrente elétrica propaga-se através dos diferentes materiais dos seguintes modos: eletrônico e iônico. Condução eletrônica é aquela que se verifica nos materiais que possuem elétrons livres, como é o caso dos metais ou dos sulfetos metálicos; também é o modo como se dá nos materiais semicondutores, normalmente maus condutores ou até mesmo isolantes, que possuem poucos ou nenhum caminho que possibilite a passagem de corrente. Condução iônica (eletrolítica) é aquela que ocorre em um eletrólito, onde o fluxo da corrente se processa através de íons. Este modo de propagação da corrente elétrica certamente é a maneira de condução elétrica de maior importância nos estudos e levantamentos geofísicos de eletrorresistividade.

A resistividade aparente (ρ_a) é o parâmetro fornecido pelo método da eletrorresistividade. Seu princípio é baseado na passagem pelo solo de uma corrente contínua de intensidade I , transmitida por um par de eletrodos A e B, ligado a um emissor E (baterias ou grupo-gerador). Mede-se a diferença de potencial ΔV entre dois eletrodos M e N (Figura 1), e a resistividade aparente (ρ_a) é dada pela equação:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K$$

onde K é um coeficiente que depende das dimensões e arranjo do quadripolo AMNB.

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$

3.2 Caminhamento resistividade

Trata-se de uma técnica de investigação horizontal, em uma ou em várias profundidades, aproximadamente constantes, a partir de medidas tomadas na superfície do terreno.

A finalidade do caminhamento resistividade é estudar principalmente as variações laterais da resistividade do subsolo, sendo muito adequado para detectar contatos geológicos verticais ou inclinados, mineralizações, diques, fraturamentos e/ou falhamentos e outros corpos ou estruturas que se apresentem como heterogeneidades laterais deste parâmetro. Pode ser também utilizada na caracterização de aquíferos e de depósitos de areias e cascalhos, delineando os seus limites.

As investigações efetuadas pelo caminhamento resistividade geralmente são efetuadas ao longo de perfis e os resultados obtidos se relacionam entre si através de um estudo em planta a uma profundidade determinada, ou ainda, através de seções com várias profundidades de investigação.

3.3 Arranjo dipolo-dipolo/pseudo-seções de resistividade

As pseudo-seções são assim chamadas porque os dados obtidos de diferentes níveis de investigação não correspondem aos valores reais dos parâmetros de cada camada investigada e referem-se a valores aparentes de resistividade. De forma

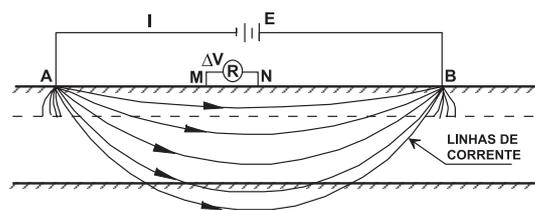


FIGURA 1 – Princípio do método da eletrorresistividade.

semelhante, as profundidades na seção vertical são também apenas qualitativas.

Na interpretação dos dados das pseudo-seções obtém-se informações qualitativas sobre a posição espacial dos corpos em subsuperfície e, mais raramente, pode-se estimar o seu mergulho. Como decorrência, as informações são tão mais precisas quanto melhor a definição de uma anomalia de resistividade.

O arranjo eletródico de pseudo-seções utilizado neste trabalho foi o dipolo-dipolo e, neste arranjo, os eletrodos A e B de envio de corrente e os eletrodos M e N de potencial ou de recepção são alinhados sobre um mesmo perfil. O arranjo é definido pelos espaçamentos $L = AB = MN$. A profundidade de investigação cresce com L e teoricamente corresponde a $L, 3/2L, 2L, \dots, ((n+1)/2)L$ (Figura 2).

Comumente, as medidas são realizadas em várias profundidades de investigação, isto é, $n = 1, 2, 3, 4$ e 5 , e atribuídas na intersecção das linhas que partem a 45° dos centros de AB ($\Omega, \Omega', \Omega'' \dots$) e MN ($O, O', O'' \dots$).

A cada estação, os dois dipolos são deslocados a uma distância igual a L, e os dados obtidos são plotados nas posições $n = 1, 2, 3, \dots$ e interpolados, gerando uma pseudo-seção de resistividade aparente.

4 METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO DE CAMPO E PROCESSAMENTOS

Inicialmente, o recomendado para o melhor posicionamento da malha dos ensaios, havendo aerolevantamentos disponíveis, é fazer-se uma interpretação prévia das fotos aéreas da área dos trabalhos objetivando posicionar os perfis de caminhamento elétrico transversais às estruturas identificadas. Mapas geológicos e/ou topográficos também podem ser adequados a esta finalidade.

Não havendo estas disponibilidades, uma solução é a de posicionar os perfis de modo a interceptar as fraturas quaisquer que sejam as suas direções, por exemplo, uma disposição triangular ou quadrangular, de forma que as estruturas sejam interceptadas quaisquer que sejam suas direções. Este último foi o procedimento (quadrangular) adotado neste caso e a malha estabelecida pode ser vista na figura 3. Os pontos/perfis de medidas foram posicionados com o uso de GPS (Global Positioning System) e de modo a obter o melhor recobrimento possível da área, levando-se em conta as limitações físicas e de acesso do local.

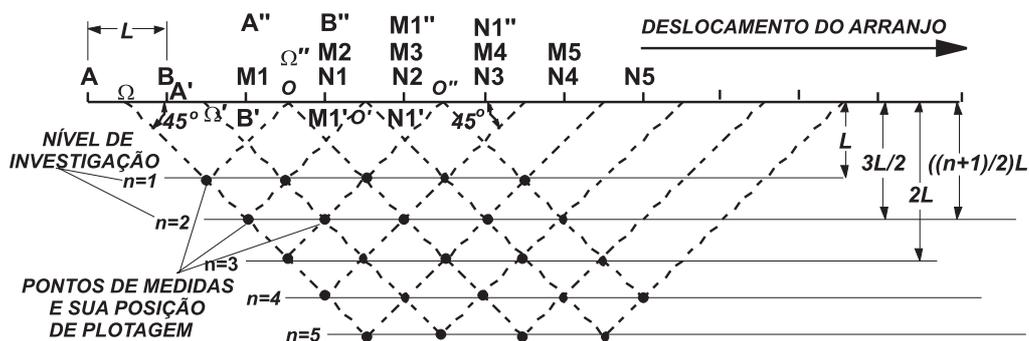


FIGURA 2 – Caminhamento Resistividade/Disposição no campo do arranjo dipolo-dipolo (original de GALLAS, 2000).

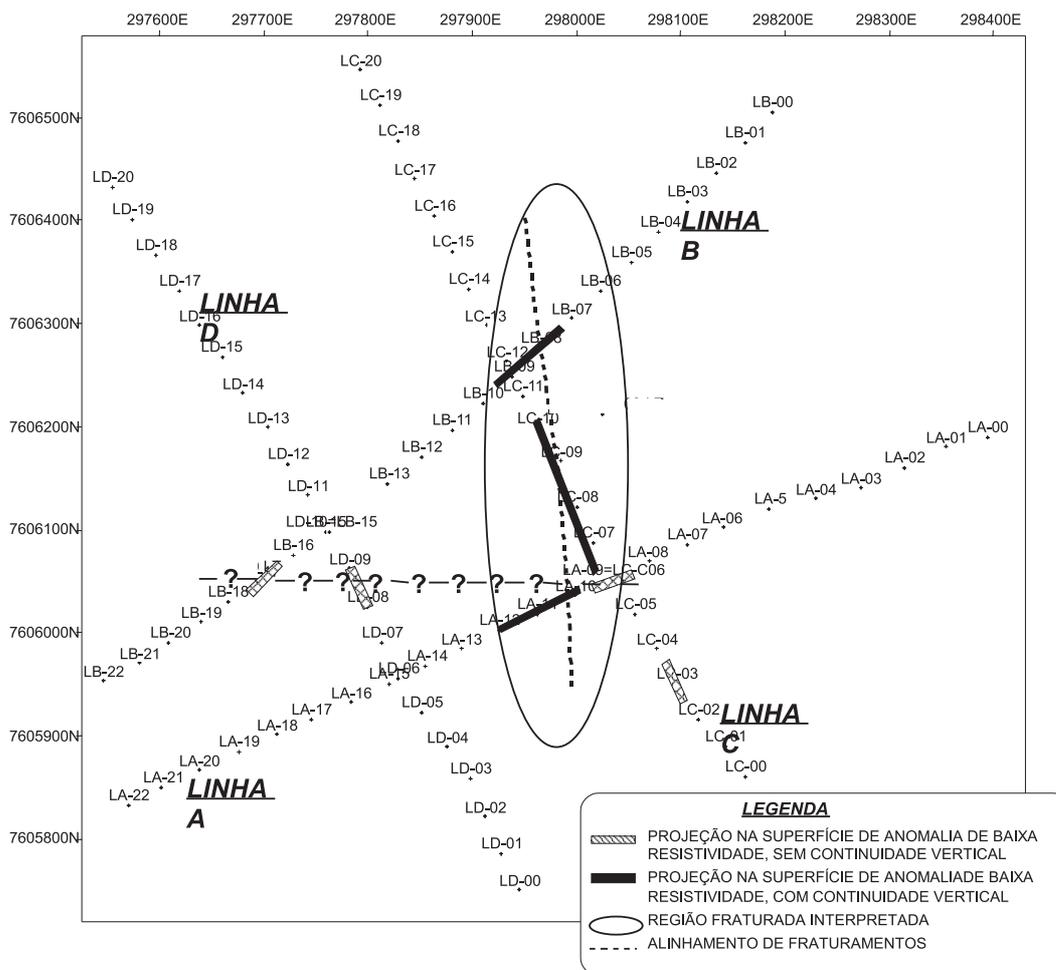


FIGURA 3 – Mapa síntese das anomalias detectadas e posição das linhas.

Um conhecimento geológico/estrutural da área objeto também é desejável e, em muitos casos, é de fundamental importância, como para fornecer informações sobre direções de foliação e direções dos movimentos relativos que causaram as fraturas (fraturas “fechadas” ou “abertas”).

Um outro fator de grande importância é a otimização das dimensões do arranjo, dipolo-dipolo, no caso. As aberturas entre eletrodos devem ser tais que no primeiro ou no máximo no segundo nível de investigação seja ultrapassada a camada de alteração superficial, solo+rocha alterada (GALLAS 1998, 2000).

Obedecendo a este critério, os levantamentos de eletrorresistividade foram efetuados com abertura de 40m (AB=MN=40 m) entre os eletrodos e cinco profundidades teóricas de investigação: n1=40 m, n2=60 m, n3=80 m, n4=100 m e n5=120 m (HALLOF 1957). O equipamento usado para os trabalhos foi o SAS-4000, de fabricação sueca (ABEM Instruments).

Conforme visto nas figuras 4, 5, 6 e 7, os dados estão sendo apresentados sob a forma de pseudo-seções e seções modeladas de resistividade (atualmente vem sendo empregado o termo *tomografia* ou *imageamento* para tal). As pseudo-seções contêm os dados brutos apresentados conforme descrito anteriormente e exposto na figura 2. Trata-se do

sistema de apresentação de dados comumente adotado, proposto por HALLOF (1957). Já as seções modeladas trazem os dados obtidos pelo processamento dos dados brutos de resistividade por meio de programa de inversão descrito adiante.

Medidas de resistividade normalmente são apresentadas e interpoladas (contornos de isovalores) sob a forma de pseudo-seções que dão uma representação não real do comportamento das resistividades em subsuperfície. A representação dos dados é denominada de pseudo-seção porque as formas e contornos assumidos não são absolutamente verdadeiros e sim, uma aproximação.

As pseudo-seções não dependem exclusivamente das distribuições de resistividades medidas, mas também da geometria da configuração de eletrodos empregada (dipolo-dipolo, pólo-dipolo, pólo-pólo, entre outras). Igualmente, as resistividades calculadas são ditas aparentes por representarem uma resultante de um volume do subsolo investigado constituído de diferentes resistividades. Também as profundidades atingidas dependem do arranjo geométrico dos eletrodos e das resistividades. Mesmo corpos de formas geométricas simples (retangulares ou quadradas, por exemplo), apresentam pseudo-seções diferentes e dependem do arranjo empregado.

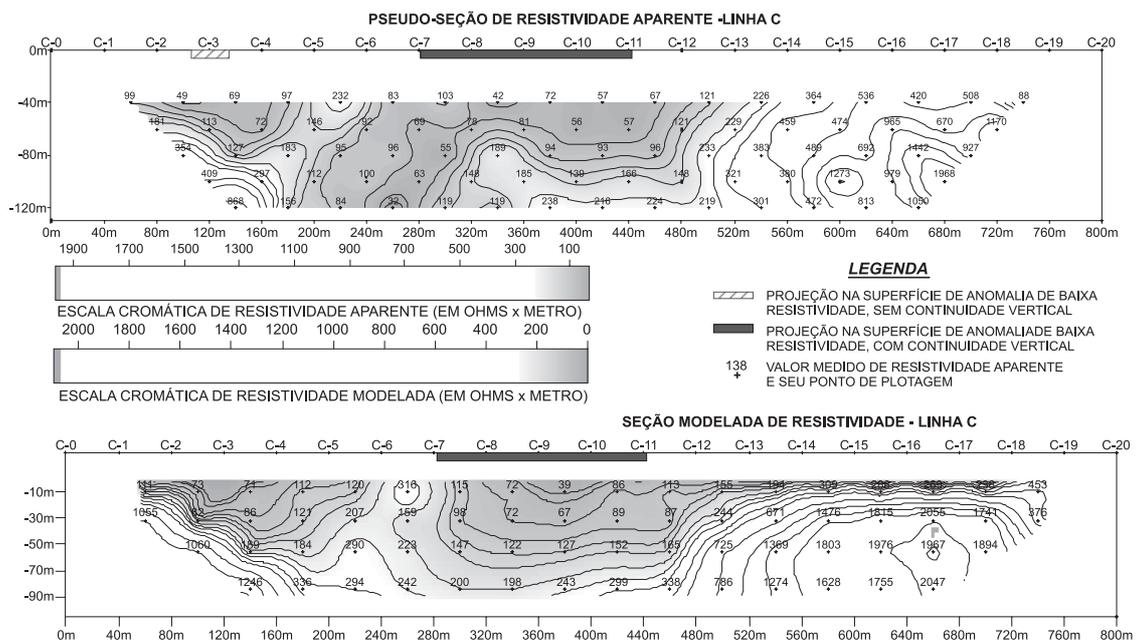


FIGURA 4 – Pseudo-seção e seção modelada de resistividade, Linha A.

Nesse sentido, para obter-se uma seção de resistividade “real”, torna-se necessária a aplicação dos chamados processos de inversão que, em tese, conduzem a uma aproximação razoável de modelos para diversas estruturas geológicas. Estes processos de inversão foram empregados no tratamento

dos dados deste levantamento e são tratados a seguir.

As seções modeladas são resultantes de um processo automático de inversão bi-dimensional (2-D). Os processos de inversão de dados de resistividade buscam estabelecer um modelo da pro-

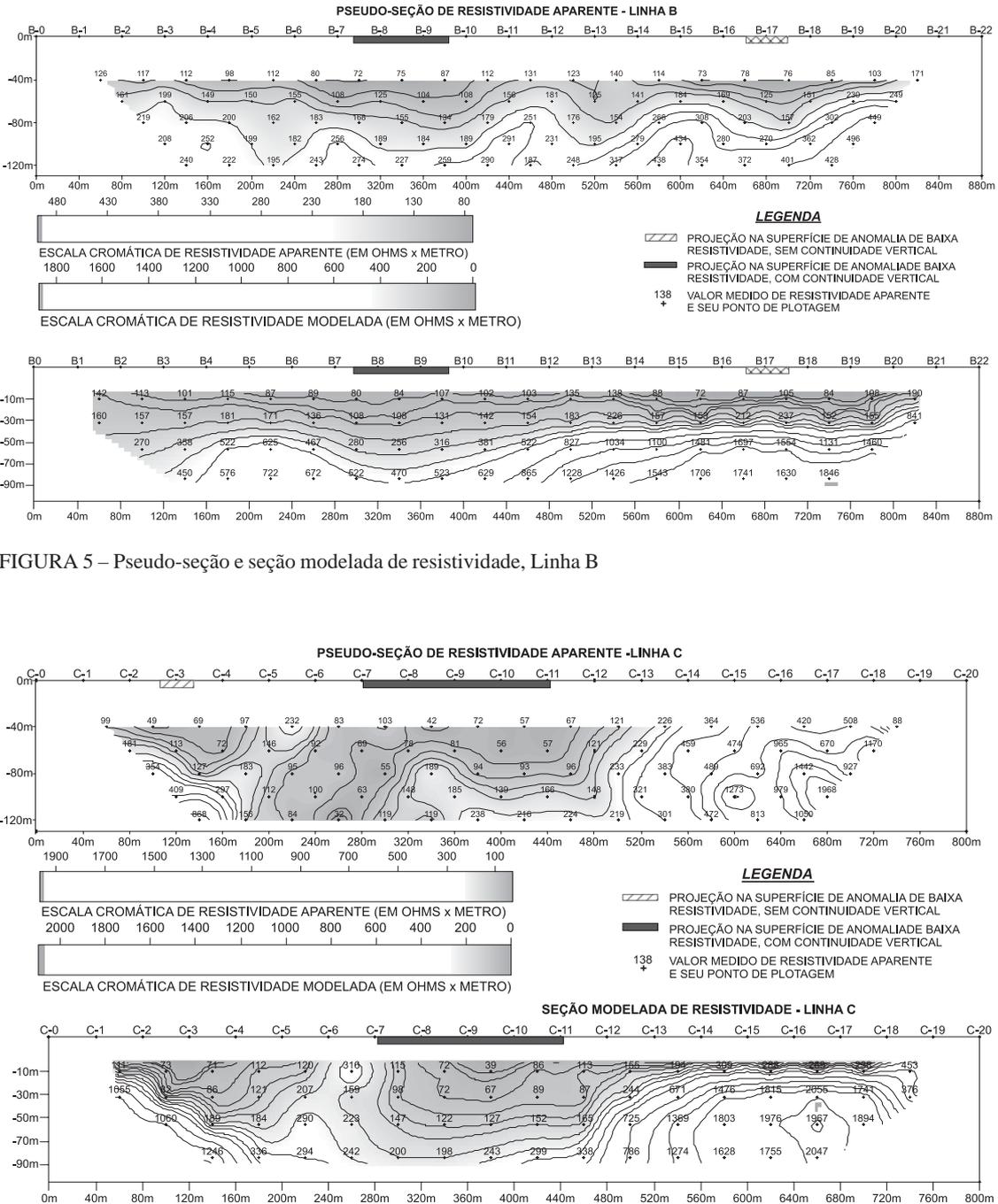


FIGURA 5 – Pseudo-seção e seção modelada de resistividade, Linha B

FIGURA 6 – Pseudo-seção e seção modelada de resistividade, Linha C.

vável distribuição real dos valores de resistividade em subsuperfície. Eventuais distorções nas pseudo-seções são inerentes aos arranjos dos eletrodos e, teoricamente, eliminadas por este procedimento.

Os dados obtidos foram processados nos programas RES2DINV e Surfer 8, da ABEM INSTRUMENTS (1998) e Golden Software, respectivamente. O Surfer 8 é um programa para interpolação de dados, enquanto que o RES2DINV é um programa de inversão para resistividade e polarização induzida (IP).

Os resultados da inversão pelo RES2DINV foram exportados na forma de arquivos XYZ e interpolados pelo Surfer 8, visando uma apresentação de melhor qualidade dos mesmos.

O RES2DINV adota uma técnica rápida e eficiente para inversão de dados de resistividade, desenvolvida por LOKE & BARKER (1996a, 1996b) e DEGROOT-HEDLIN & CONSTABLE (1990), baseada no método dos mínimos quadrados e “suavização restringida” (*smoothness-constrained*). Teoricamente, produz um modelo de subsuperfície 2-D isento das distorções observadas na pseudo-seção de resistividade aparente, originadas pela geometria do arranjo eletródico usado.

O sistema de modelagem 2-D consiste na divisão da subsuperfície em blocos retangulares para os quais são calculadas as resistividades e suas posi-

ções, relacionadas aos pontos das pseudo-seções. O método de otimização empregado reduz a diferença entre os valores de resistividade calculados e medidos, fazendo o ajuste entre estes e os blocos. A distribuição e o tamanho dos blocos são gerados automaticamente pelo programa, de modo que o número de blocos não exceda ao número de pontos medidos (a não ser como opção imposta pelo usuário).

As profundidades finais dos blocos, ou seja, as profundidades dos níveis de investigação calculadas (*default* do programa), são aproximadamente iguais às propostas por EDWARDS (1977) para a maior abertura de eletrodos do arranjo e cerca da metade daquelas da pseudo-seção proposta por HALLOF (1957). Estas profundidades também podem ser manuseadas pelo usuário, caso existam informações geológicas disponíveis.

5 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A interpretação inicial do dispositivo eletródico dipolo-dipolo foi feita na forma de pseudo-seções de resistividade aparente, nas quais os dados foram plotados de acordo com o sistema exposto na figura 2. Posteriormente, para a interpretação final, os dados foram submetidos a processos de inversão pelo programa RES2DINV; estes resultados são apresentados nas figuras 4 a 7.

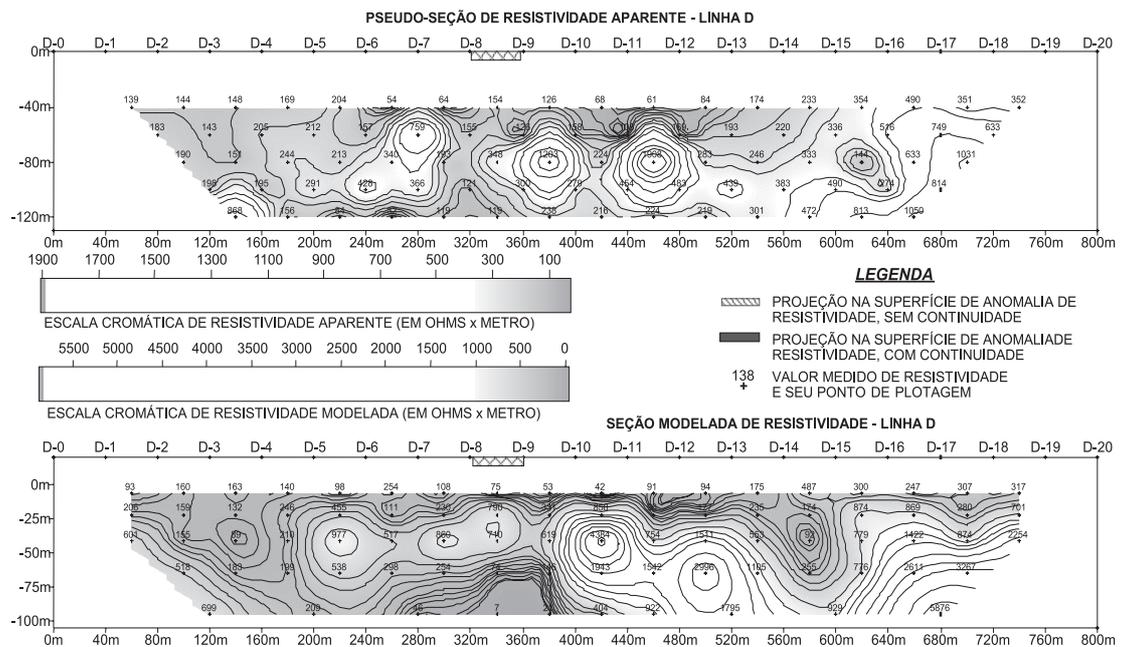


FIGURA 7 – Pseudo-seção e seção modelada de resistividade, Linha D.

O objetivo principal dos levantamentos geofísicos pelo método da eletrorresistividade foi o de detectar feições/aspectos correlacionáveis a possíveis fraturamentos/falhamentos que possam ser potenciais aquíferos.

Normalmente, zonas fraturadas em rochas cristalinas, caso das áreas estudadas, apresentam-se como regiões onde as resistividades tendem a ser mais baixas do que na mesma rocha quando não fraturada/sã. Isto deve-se ao fato que fraturamentos tendem a armazenar água e conter minerais argilosos produzidos pela ação da água e conseqüente alteração da rocha. Assim, as feições correlacionáveis a estas estruturas devem ser aquelas onde as resistividades assumem valores mais baixos nas pseudo-seções/seções modeladas e que também foram interpretadas como tendo continuidade em profundidade. Por outro lado, tais aspectos igualmente podem estar correlacionados a variações faciológicas de baixas resistividades e que não correspondem a fraturas.

Por vezes pode ocorrer que as seções modeladas se apresentem de forma perturbada. Isto pode ser devido a oscilações próximas e elevadas de resistividade (reais ou causadas pela presença de ruídos elétricos nas proximidades do perfil, como altas tensões, aterramentos etc). Nestas condições, os processamentos matemáticos a que os dados de campo são submetidos pela inversão podem fornecer seções modeladas perturbadas. Isto ocorre nas pseudo-seções e seções modeladas das Linhas A e D (Figuras 4 e 7).

Por outro lado, as pseudo-seções das Linhas B e C proporcionaram boas seções modeladas (Figuras 5 e 6). As anomalias bem definidas detectadas nestes perfis apresentam-se como um grande espessamento da região de alteração superior e devem estar correlacionadas a uma zona fraturada com continuidade em subsuperfície.

A figura 3 apresenta a posição dos perfis ensaiados em planta e as anomalias detectadas. Desta forma, é possível que se estabeleçam correlações entre as anomalias identificadas e os alinhamentos que definem as fraturas – potenciais aquíferos. Os trechos/locais onde foram identificadas as anomalias interpretadas como sendo as mais favoráveis são assinalados com barras contínuas. Aqueles locais indicados com barras descontínuas foram considerados como menos adequados, seja por dados perturbados por ruídos, seja pelas características geofísicas (forma e contraste da anomalia). As estruturas interpretadas, constituídas pelos alinhamentos das anomalias, são marcadas com linhas tracejadas.

6 CONCLUSÕES

A eletrorresistividade é um método indireto de prospecção e, seguramente, constitui ferramenta de grande utilidade na busca e detecção de estruturas favoráveis para armazenamento de água subterrânea. O emprego deste método geofísico é uma forma eficaz de minimizar custos, uma vez que os poços tubulares podem ser locados com muito maior probabilidade de êxito.

Na ausência de aerolevantamentos e/ou informações geológicas que indiquem as direções preferenciais dos fraturamentos, que permitam o estabelecimento de uma direção nos perfis a serem ensaiados, é necessário, como neste caso, que estes se interceptem, numa malha do tipo quadrática. Dependendo das condições de acesso ou da área livre disponível são necessárias pelo menos três linhas cruzando-se de forma triangular. Estas duas formas de disposição dos perfis permitem que seja obtido um efetivo recobrimento das estruturas existentes na área estudada e se possa posicioná-las em planta, proporcionando uma interpretação correta no posicionamento e correlação das estruturas.

Na seleção e qualificação das anomalias/estruturas detectadas, principalmente em casos em que várias delas são identificadas, como na presente situação, é necessário que seja estabelecida uma classificação das mesmas (mais ou menos favoráveis) para que sejam definidas as prioridades de perfurações. Além disso, também devem ser indicadas as estruturas associadas às anomalias de resistividade.

Como produto final dos ensaios de eletrorresistividade realizados, os locais escolhidos como mais indicados para a locação de poços tubulares profundos, no contexto das estruturas/anomalias geofísicas identificadas, são os seguintes:

Linha A – Estaca A11.

Linha B – Entre estacas B8 e B9.

Linha C – Entre estacas C8 e C9.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEM INSTRUMENTS. 1998. Geoelectrical Imaging 2D & 3D – RES2DINV, ver. 3.3 for Windows 3.1, 95 and NT. Rapid 2D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. By M. H. Loke. ABEM Instruments, P. O. Box 20086, S-161 02 Bromma, Sweden. Paginação irregular.

- CPRM. 2002. Atlas Geoambiental das bacias hidrográficas dos rios Mogi Guaçu e Pardo (SP). CD-ROM
- DEGROOT-HEDLIN, C.; CONSTABLE, S. 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55:1613-1624.
- EDWARDS, L.S. 1977. A modified pseudo-section for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, v.3, p.78-95.
- GALLAS, J.D.F. 1998. Eletrorresistividade aplicada à prospecção de água subterrânea em áreas de rochas cristalinas. In: WORKSHOP DE GEOFÍSICA APLICADA, II, 1998, Rio Claro. *Anais...* Rio Claro, 1998, CD-ROM, Arquivo Wga09.RTF.
- GALLAS, J.D.F. 2000. Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Tese de Doutorado em Geociências e Meio Ambiente, 174p.
- HALLOF, P. G. 1957. On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements: MIT, Cambridge, Ph. D. thesis.
- HASUI, Y.; MIOTO, J.A. 1992. Geologia estrutural aplicada. ABGE, São Paulo, 459p.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. 1994. Levantamentos geofísicos de eletrorresistividade em apoio à captação de águas subterrâneas em rochas cristalinas, nas proximidades da Usina Termoelétrica de Piratininga e da Represa Billings. São Paulo: IPT, 13p., (Relatório IPT-32388).
- LOKE, M.H.; BARKER, R.D. 1996a, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44:131-152.
- LOKE, M.H.; BARKER, R.D. 1996b, Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44: 99-523.

Endereço do autor:

José Domingos Faraco Gallas - Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental, Instituto de Geociências, USP, Rua do Lago, 562, CEP 05508-080, São Paulo, SP. E-mail: jgallas@usp.br.