



## Electrical Resistivity as an Auxiliary Tool for the Study of Water Availability in Fractured Aquifer, Minas Gerais, Brazil.

Guilherme Prosdocimi\*, Jorge Roncato\*, Fábio Miranda\*, Juliano Vitorino\*

\*Neogeo Geotecnologia LTDA.

Copyright 2017, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 15<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 31 July to 3 August, 2017.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 15<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

The geophysics methods are usually indicated to recognize the aquifer zones and to make the exploration and location of deep tubular wells in fractured zones more assertive. Resistivity, through field techniques VES (Vertical Electric Sounding) and CST (Constant Separation Traversing), is an indirect method of prospecting that work as a useful tool in the search for favorable structures for the storage of groundwater. Typically, fractures assume the behavior of low resistivity zones embedded in a more resistive background, because the presence of fractures / fissures in a rocky matrix becomes a region that facilitates water infiltration and rock alteration. The Resistivity method assists in the identification of water circulation and accumulation sites from the secondary porosity of the rocks in lower depths (shallow aquifers) and more basal regions.

### Introdução

Métodos geofísicos são utilizados com sucesso na caracterização de aquíferos em rochas cristalinas com a identificação da espessura do manto de alteração, profundidade do topo rochoso assim como fraturas preenchidas por água e, conseqüentemente, na determinação de locais com provável ocorrência de aquíferos.

A atual conjuntura é marcada pela importância e enfoque das águas subterrâneas para o abastecimento populacional, de indústrias assim como propriedades rurais. Nesse contexto, as rochas configuram-se como grande potencial para a acumulação de água nos espaços abertos pelas diversas estruturas geológicas. No entanto, para que se obtenha sucesso em perfurações de poços é necessário que se avaliem de modo mais preciso os recursos e as ocorrências dos aquíferos fraturados em relação aos condicionantes geológicos. No estudo de fluxo de água subterrânea através de rocha são com baixa porosidade primária é importante identificar regiões com maior concentração de fraturas/descontinuidades, pois estas são mais favoráveis à infiltração, circulação e armazenamento de água. Saliencia-se ainda que, quando uma fratura inclinada intercepta uma ou mais fraturas, as interseções correspondentes constituirão alvos preferenciais de pesquisa.

A indicação de zonas aquíferas com maior probabilidade de água subterrânea por meio da geofísica torna mais assertivo os trabalhos de prospecção direcionados para a locação de poços tubulares profundos em zonas fraturadas, como forma de suprir as necessidades públicas ou privadas.

### Localização da Área

A área de pesquisa encontra-se situada na zona rural do município de Pitangui, estado de Minas Gerais, Brasil.

### Caracterização Preliminar

Como requisito fundamental para o trabalho proposto, foi necessário a realização de etapas preliminares, assim sistematizadas:

- Caracterização geológica e hidrogeológica regional;
- Mapeamento lito-estrutural da local com ênfase na caracterização da família de fraturas;
- Interpretação de sensor-remoto;
- Inventário de poços tubulares na área.

### Geologia Regional

A região pesquisada está localizada em pleno domínio do embasamento meridional do Cráton do São Francisco (Almeida, 1977) e inserida na Folha Pará de Minas (CPRM, 2007). Pode ser separada em três grandes domínios litológicos pré-cambrianos:

- Embasamento cratônico Meso a Neo Arqueano englobando gnaisses e migmatitos;
- Seqüência *greenstone belt* Neoarqueana do Supergrupo Rio das Velhas;
- Intrusões de granitoides.

Enxame de diques básicos Meso a Neoproterozóico, apesar de expressivos, ocupam, no máximo, 2% da superfície mapeada. Além destes, ocorrem a cobertura Neoproterozóica de plataforma carbonática (Grupo Bambuí) e as coberturas Neógenas quaternárias e terciárias.

### Hidrogeologia Regional

Segundo a ocorrência dos sistemas de aquíferos de Souza (1995) na escala 1:3.500.000 e a descrição destes sistemas no trabalho de Pinto & Martins Neto (2001), foram identificados 4 (quatro) sistemas aquíferos na Bacia Hidrográfica do Rio Pará, definidos segundo suas características litológicas e comportamento hidrogeológico: os Sistemas Gnáissico Granítico, Pelítico,

Quartzítico e Pelítico Carbonático. (Ramos, M L S; Paixão, M. M. O., 2002).

### Geologia Local

O mapeamento geológico lito-estrutural em escala 1:10.000 serviu de insumo técnico para as análises geofísicas, contribuindo para um melhor entendimento das unidades e estruturas geológicas potenciais para o armazenamento de água subterrânea.

A partir da interpretação de dados coletados em campo, juntamente com trabalhos anteriores de escala regional na área, foi proposta a seguinte compartimentação litoestratigráfica para a região de estudo: rochas supracrustais metassedimentares de idade Arqueana, aqui representadas pelo Grupo Nova Lima, pertencente ao Supergrupo Rio das Velhas; e cobertura sedimentar pelítica Neoproterozoica da Formação Serra de Santa Helena (Grupo Bambuí). A cobertura Fanerozoica detrítico-laterítica inconsolidada foi observada em alguns pontos, mas apresentou extensão não mapeável na escala proposta. A Formação Serra de Santa Helena abrange a grande maioria da área, ocorrendo em mais de 93% da mesma.

### Geologia Estrutural

Para a análise de estruturas rúpteis, foram obtidas 17 medidas de fraturas. As principais direções de fraturamento observadas, por ordem de importância, são: ENE-WSW, WNW-ESE e NNW-SSE (Figura 1A).

A partir da investigação das estruturas, pela orientação preferencial das diáclases além do ângulo inter-diáclases, estabeleceu-se um par conjugado de fraturas, cujas orientações médias são 340/82 e 235/86. O par de fraturamento proposto apresenta linha de interseção com orientação 302/80 e foi, posteriormente, agrupado em uma família (Figura 1B).

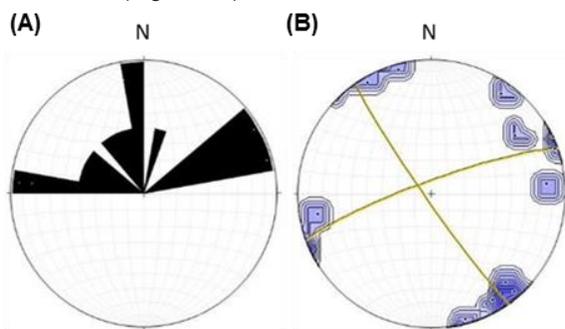


Figura 1: A - Diagrama de roseta representando o *trend* das fraturas. n=17; B - Diagrama de pólos de Schmidt-Lambert de igual área e hemisfério sul mostrando o par de fraturas, cujas orientações são 340/82 e 235/86.

### Sensor Remoto

O mapa de lineamentos estruturais (Figura 2A) foi gerado a partir de imagens de satélite LANDSAT 8. Foram demarcados 14 traços superficiais em que os de direção NW-SE apresentaram-se mais contínuos, longos e expressivos. Observa-se que estes, mais bem marcados, estão impressos, em sua maioria, na unidade

metassedimentar, corroborando com os dados de orientação do Lineamento Pitangui descritos anteriormente, que evidenciaram uma maior persistência de estruturas em rochas do embasamento Arqueano. Sob a cobertura sedimentar do Grupo Bambuí, as feições foto-interpretadas manifestam-se menos expressivas, como visto na Figura 2B.

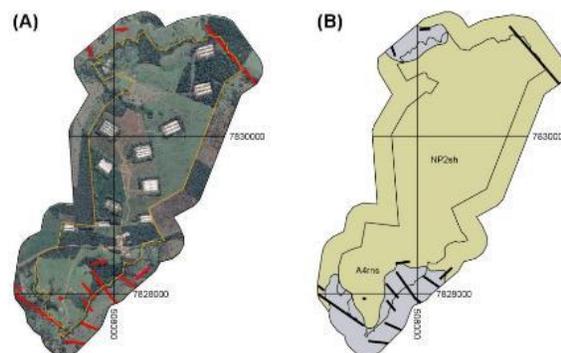


Figura 2: A - Mapa de lineamentos estruturais produzido a partir de imagem do satélite LANDSAT 8; B - Lineamentos foto-interpretados sobre o mapa geológico local da área.

### Metodologia

O estudo geofísico realizado utilizou o método geoeletrico da Eletroresistividade por meio das técnicas de campo do Caminhamento Elétrico (CE) e Sondagem Elétrica Vertical (SEV) com objetivo de verificar possíveis zonas aquíferas profundas a partir de locais com maior interesse.

O mapeamento geológico local bem como a interpretação prévia de fotografias aéreas mostraram-se de fundamental importância para o melhor posicionamento da malha dos ensaios geofísicos, de modo que os perfis fossem transversais às estruturas regionais identificadas.

Diante do objetivo proposto, foram realizadas 12 seções de CE com arranjo dipolo-dipolo, espaçamento entre eletrodos de 12 metros e espaçamento entre linhas de 20 metros. Das seções executadas, 6 foram adquiridas com direção aproximada NE-SW e outras 6 foram adquiridas com direção aproximada NNE-SSW. Também foram realizados 11 pontos de SEV com utilização de arranjo Schlumberger, espaçamento AB/2 mínimo de 25 metros e AB/2 máximo de 600 metros. A localização das seções de CE juntamente com os pontos de SEV podem ser visualizados no mapa da Figura 3.

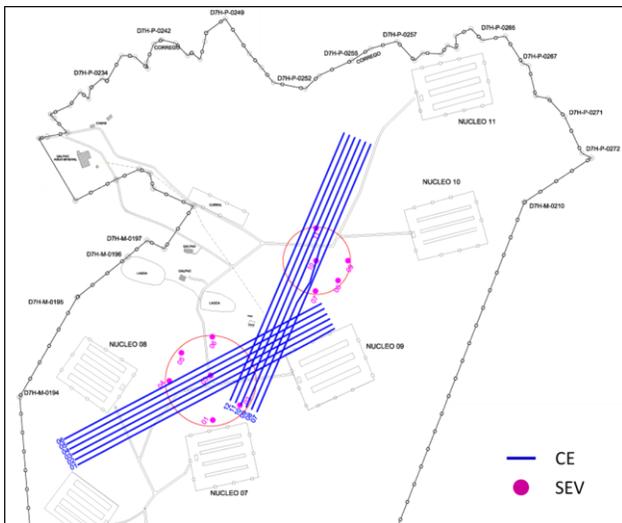


Figura 3: Mapa de Aquisições Geofísicas.

O equipamento utilizado no trabalho foi o SuperSting R8/IP da AGI (Advanced Geoscience Inc.) com configuração de 84 canais e os softwares para os processamentos foram o *EarthImager 1D* para os dados de SEV e RES2DINV para os dados de Caminhamento Elétrico.

### Resultados

Os perfis de CE permitiram a verificação em até 226 metros de profundidade, aproximadamente. Já as SEVs imagearam até uma profundidade de, aproximadamente, 308,5 metros. Todas as SEVs foram ajustadas usando o modelo de 4 (quatro) camadas para permitir o melhor ajuste possível.

O conjunto de dados gerados pelas técnicas de campo forneceu informações suficientes para o reconhecimento e diferenciação de materiais associados a processos de alteração, estruturas secundárias assim como possíveis regiões aquíferas.

As seções de Caminhamento Elétrico apresentaram similaridades em relação à disposição das zonas de resistividade aparente. Em todas as seções, foi possível a delimitação de três pacotes geofísicos distintos em virtude da magnitude e concentração dos valores de resistividade aparente (Figura 4).

A primeira porção, superficial, pode estar relacionada a material inconsolidado proveniente do processo pedogenético das rochas, material solto antropicamente inserido no local, área de aterro, bem como rochas aflorantes sem presença de água. Pela literatura geofísica, sabe-se que material inconsolidado e/ou solos apresentam valores heterogêneos de resistividade aparente com tendência resistiva, principalmente quando os poros estão preenchidos por ar, o que corrobora, portanto, com as interpretações acima descritas.

O segundo pacote, intermediário, apresentou-se, em geral, mais espesso que o anterior, sendo formado essencialmente por valores de baixa resistividade aparente (ZBR) e valores intermediários (ZIR). Os valores de baixa resistividade aparente (até 200 ohm.m para as

seções com direção NE-SW e até 300 ohm.m para as seções com direção NNE-SSW, conforme Figura 3) podem estar relacionados a rochas/materiais com preenchimento das fraturas por água que acabam por configurar possíveis zonas aquíferas rasas e/ou materiais argilosos que acabam por diminuir a resistividade aparente da seção. Nas imagens com as seções de eletrorresistividade (CE) é possível visualizar as projeções, em superfície, de regiões condutivas possivelmente associadas a falhamentos (representadas por barras pretas preenchidas ou hachuradas) com preenchidos por água. Neste grupo de valores de baixa resistividade aparente foram separados os locais de mais alta condutividade e alta probabilidade de zonas aquíferas (representado por barras preenchidas em preto nas imagens) e regiões condutivas com probabilidade relativa de zonas aquíferas (representado nas imagens por barras hachuradas). Tais representações podem ser visualizadas nas seções de CE da Figura 4. Essa classificação levou em conta, além dos valores de resistividade aparente, a forma, a continuidade vertical das anomalias mais condutivas, assim como a abrangência da anomalia na seção.

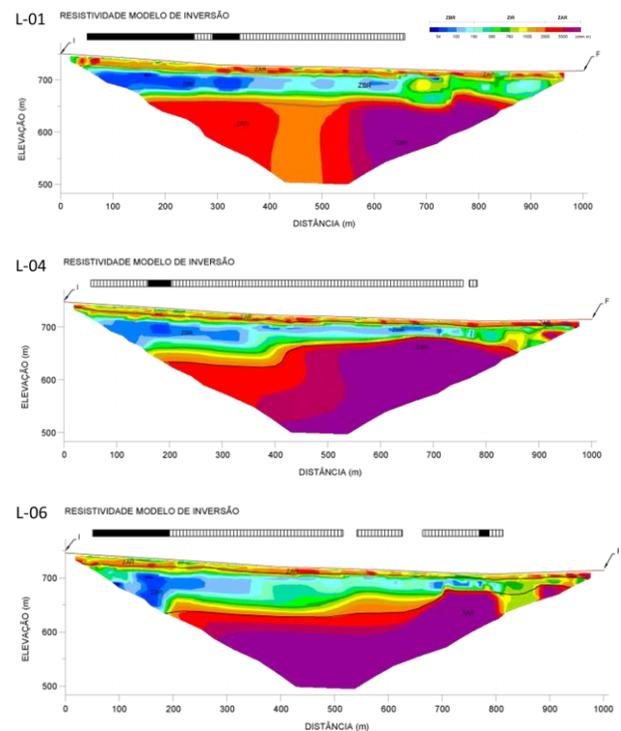


Figura 4: Seções de CE.

Algumas seções destacam-se das demais por terem apresentado flancos de anomalias que formam um "V" invertido bem marcado (Figura 5). Tal feição configura a resposta geofísica à presença de falhas. Assim sendo, a representação de uma falha em uma seção, normalmente, é representada por dois flancos. Tal feição, juntamente com valores condutivos de resistividade aparente, representam alta probabilidade de presença de zonas aquíferas, indicado pela presença da barra preta preenchida na imagem do perfil correspondente.

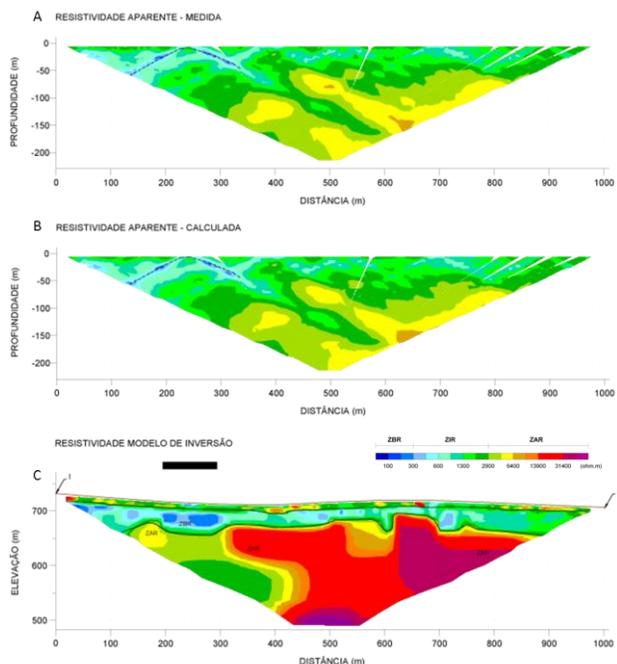


Figura 5: Seção de CE com destaque para a feição “V” invertido, com representação de resistividade aparente: A - Medida; B - Calculada e C - Invertida.

Os valores intermediários, ainda neste pacote intermediário, podem estar relacionados a rochas de origem sedimentar e/ou rochas extremamente alteradas e/ou com presença menos marcante de água preenchendo as fraturas.

O último pacote, mais profundo, apresentou altos valores de resistividade aparente. Tal fato por estar relacionado à presença de rochas pertencentes ao embasamento com menor grau de alteração/fraturamento. A tendência mais resistiva com o aumento da profundidade está em consonância com o comportamento das rochas, uma vez que as fraturas tornam-se mais apertadas em profundidade o que acaba por diminuir a característica armazenadora relacionada a permeabilidade secundária do maciço. Mudanças verticais bruscas na resistividade aparente neste estrato podem estar relacionados a uma estruturação do maciço indicativo de falhas/fraturas e/ou variações litológicas laterais do maciço em profundidade. Tais mudanças acontecem em algumas seções geofísicas realizadas (e.g. Figura 6).

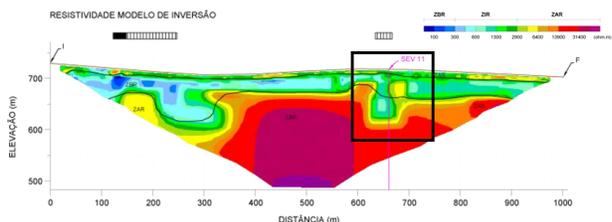


Figura 6: Seção de CE. Destaque para contato lateral brusco indicativo de estruturação do maciço.

Contatos bruscos com presença de faixas predominantemente formadas por valores mais baixos

quando comparados ao entorno e que se estendem desde a subsuperfície até maiores profundidades também sugerem a presença de regiões fortemente fraturadas com preenchimento por água e/ou regiões alteradas em profundidade, uma vez que a presença de água, em algum momento, acelera o processo de alteração da rocha, aumentando a condutividade elétrica.

Os gráficos de SEV vem corroborar com as interpretações mencionadas (e.g. Figura 7). A tendência superficial, também resistiva em grande parte dos dados, pode estar relacionada a material inconsolidado proveniente do processo pedogenético das rochas locais. As camadas intermediárias, quando associadas a valores intermediários de resistividade aparente, podem estar relacionadas a rochas de origem sedimentar e/ou rochas extremamente alteradas e/ou com presença menos marcante de água preenchendo as fraturas. No entanto, quando associadas a valores de baixa resistividade aparente, como ocorre em algumas SEVs, podem estar correlacionadas a materiais com preenchimento das fraturas por água. As porções mais basais dos gráficos apresentaram tendência mais resistiva podendo ser associada à presença de rochas pertencentes ao embasamento com menor grau de alteração/faturamento.

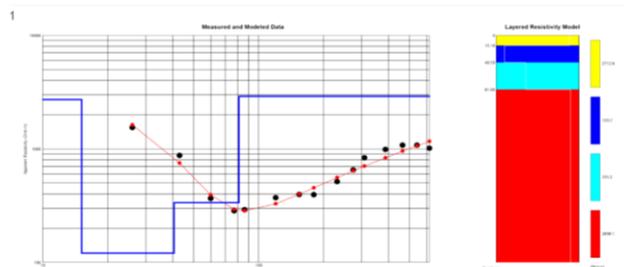


Figura 7: Seção de SEV com disposição das camadas em consonância com as seções de CE.

No entanto, algumas seções (e.g. Figura 8) apresentaram tais regiões inferiores com valores extremamente condutivos, sugerindo a possibilidade de presença de água preenchendo fraturas profundas.

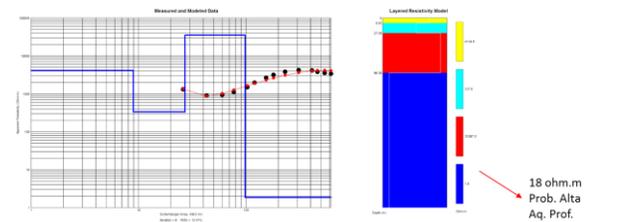


Figura 8: Seção de SEV com destaque para anomalia de alta condutividade em maiores profundidades.

Esses locais coincidiram, quando interceptados pelas linhas de Caminhamento Elétrico, com as mudanças laterais bruscas em profundidade nas resistividades aparentes, corroborando, portanto, para a possibilidade de existência de fraturamentos potenciais para aquíferos fissurais em maiores profundidades.

## Conclusões

Os dados de Caminhamento Elétrico forneceram informações importantes sobre a possibilidade de existência de aquíferos mais rasos em fraturas associadas a rochas metapelíticas (Aquífero Pelítico, Fraturado) e também forneceu fortes indícios da existência de aquíferos profundos associados ao embasamento rochoso.

Os dados de SEV vieram corroborar com as interpretações de Caminhamento Elétrico além de fornecer melhores resultados em profundidade, como, por exemplo, a existência de zonas extremamente condutivas nas porções mais basais investigadas. Tais zonas coincidiram com mudanças laterais bruscas de resistividade aparente nas seções de CE, que sugerem a presença de regiões fortemente fraturadas com preenchimento por água e/ou regiões alteradas. Portanto, as técnicas de campo do Caminhamento Elétrico (CE) e da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) auxiliaram-se, mutuamente, na identificação de possíveis locais de circulação e acumulação de água provenientes da porosidade secundária das rochas,

## Referências

ALMEIDA, F. F. M. 1977. O Cráton do São Francisco. Revista Brasileira de geociências, 7(4): 349-364;

CPRM. 2007. Pará de Minas- SE.23-Z-C-IV, escala 1:100.000: nota explicativa. Antônio Wilson Romano, - Minas Gerais: UFMG/CPRM;

PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A. 2001. Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. SBG, Núcleo MG. Belo Horizonte, 349p;

RAMOS, M. L. S; PAIXÃO, M. M. O. M. 2002. Disponibilidade Hídrica de Águas Subterrâneas – Produtividade de Poços e Reservas Explotáveis dos Principais Sistemas Aquíferos – Relatório parte do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco;

SOUZA, S. M. T. 1995. Disponibilidades hídricas subterrâneas no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: HIDROSISTEMAS/COPASA, 525p.