

## XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

### APLICAÇÃO DE IMAGEAMENTO ELÉTRICO MULTI-ELETRODOS PARA AUXÍLIO NA LOCAÇÃO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS TUBULARES – ESTUDO DE CASOS EM AQUÍFEROS FRATURADOS

Henrique de Sá<sup>1</sup>; Vagner Roberto Elis<sup>2</sup>

**Resumo:** Com o aumento da crise hídrica aumentou a perfuração de poços tubulares e conseqüentemente a procura de métodos para se identificar aquíferos. Para esta finalidade, a geofísica aplicada tem sido cada vez mais procurada. Neste trabalho, utilizando a técnica geoeletrica de imageamento elétrico multi-eletrodos a geometria variável visou-se localizar lineamentos estruturais nas rochas em subsuperfície, aptas à armazenar água. Analisou-se dois casos de aquíferos em rochas cristalinas: i) metassedimentos e corpos graníticos do Grupo Araxá; ii) e nos domos gnáissicos-migmatíticos da Formação Itabaiana – Simão Dias. Os dados adquiridos foram processados e interpretados de acordo com informações geológicas de cada região. Para avaliar a resposta geofísica em ambas as situações os poços foram perfurados de acordo com o resultado do imageamento elétrico.

**Abstract:** With increasing water crisis also increased the drilling wells and therefore the demand for methods to identify aquifers. For this purpose, geophysics has been increasingly demanded. In this work, using the geoelectric technique of electric imaging with multi-electrode and variable geometry aimed to locate structural lineaments on the rocks in the subsurface, able to store water. It analyzed two cases of aquifers in crystalline rocks: i) metasediments and granitic bodies of the Araxá Group; ii) and gneiss-migmatitic domes of Formation Itabaiana - Simão Dias. The acquired data were processed and interpreted in accordance with geological information of each region. To evaluate geophysical response in both situations the wells were drilled in accordance with the result of the electric imaging.

**Palavras-Chave:** Imageamento Elétrico 2D, Aquífero Fraturado.

---

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo (USP) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) - Rua do Matão, 1226 - Cidade Universitária São Paulo-SP - Brasil - 05508-090, (62) 9 8160-0681, e-mail: [h.enrique.geofisico@gmail.com](mailto:h.enrique.geofisico@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo (USP) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) - Rua do Matão, 1226 - Cidade Universitária São Paulo-SP - Brasil - 05508-090, (11) 3091-4755, e-mail: [vagner.elis@iag.usp.br](mailto:vagner.elis@iag.usp.br)

## 1 - INTRODUÇÃO

A aplicação de pesquisa geofísica para locação de poços tubulares tem sido intensificada por causa do aumento do número de perfurações principalmente por indústrias assim como condomínios. O motivo é a crescente crise hídrica, intensificada no sudeste do país, como por exemplo ocorreu no estado de São Paulo a partir de janeiro de 2014. Diante disso é de essencial importância analisar a eficácia do principal método aplicado: o método geoeletrico. Diversos são os métodos elétricos (ou geoeletricos) aplicados na pesquisa geofísica para locação de poços tubulares, entre eles a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e o Caminhamento Elétrico (CE). Neste trabalho será tratado de um avanço tecnológico da técnica de caminhamento elétrico, denominada de Imageamento Elétrico Multi-eletrodos (IEM), que basicamente trata-se da aquisição detalhada de valores de resistividade elétrica aparente do subsolo permitindo gerar uma “imagem” 2D da variação de resistividade em subsuperfície. A técnica é multi-eletrodos, por utilizar diversos polos simultaneamente permitindo além da maior quantidade de dados, uma maior velocidade de aquisição.

O presente trabalho visa analisar de forma prática a eficácia deste tipo de ferramenta, ou seja, considerando dois casos reais de pesquisas geofísicas realizadas visando auxiliar na definição de locais e profundidades da perfuração de novos poços tubulares. Os casos estão associados com aquíferos cristalinos, onde os locais aconselháveis para perfuração de poços são geralmente os relacionados com pontos de fraqueza do substrato rochoso (falhas, fraturas, entre outros). Portanto analisar-se-á se o método geoeletrico, nestes dois contextos geológicos, obtém êxito em encontrar esses lineamentos estruturais.

O primeiro caso é em uma indústria de laticínios denominada Italac, localizada em Corumbáiba, Goiás, presente no Grupo Araxá, composta por rochas xistosas. O segundo caso localiza-se em Moita Bonita, Sergipe, região de transição para o sertão neste estado, no domo da Formação Itabaiana-Simão Dias, compondo um embasamento gnáissico.

O resultado do IEM tentará identificar terrenos soltos, rocha alterada e rocha sã, reconstruindo a eletro-estratigrafia, além de localizar anomalias e contatos laterais na sequência das camadas em profundidade. O objetivo é reconstruir, através de um modelo baseado na resistividade aparente do meio, baseado nas possibilidades estruturais indicadas pelas informações geológicas regionais, a real situação em subsuperfície, de forma a localizar, caso haja, aquíferos.

## 2 - IMAGEAMENTO ELÉTRICO MULTI-ELETRODOS 2D – CONFIGURAÇÃO POLO DIPOLO À GEOMETRIA VARIÁVEL

Os métodos de prospecção geolétrica permitem a reconstrução estratigráfica do subsolo utilizando como parâmetro físico a resistividade elétrica aparente das formações que o constituem.

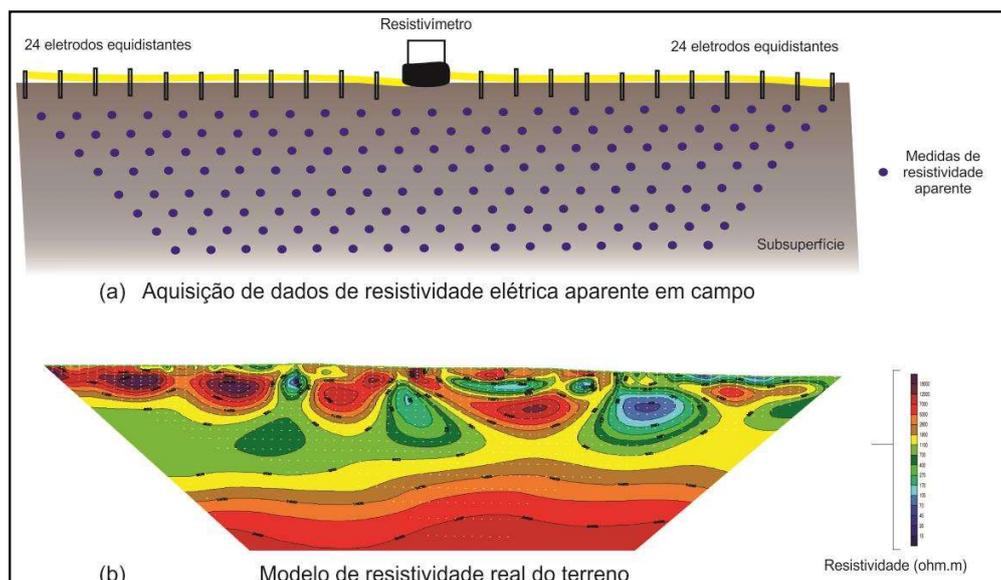
A resistividade ( $\rho$ ) é um parâmetro independente das características geométricas das formações litológicas, e é definida como a relação entre a diferença de potencial (ao dipolo de medida,  $\Delta V$ ) e corrente (introduzida no terreno,  $I$ ), relação que é multiplicada por um oportuno fator geométrico dependente da posição recíproca dos eletrodos ( $K$ ).

$$\rho = \frac{K\Delta V}{I} \quad (1)$$

Se supormos executar as medidas sobre um semi-espço de resistividade homogênea, o fator geométrico  $K$  seria o valor que serviria para tornar o termo direito da Eq. 1 igual ao valor de resistividade do semi-espço. Variando  $\Delta V/I$  para os diversos dipolos,  $K$  é um valor que depende somente da posição dos eletrodos de corrente ( $A$  e  $B$ ) e de potencial ( $M$  e  $N$ ).

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

As linhas de Imageamento Elétrico Multi-eletrodos 2D foram realizadas com até 48 eletrodos equidistantes (Fig. 1). A configuração usada é conhecida como “polo-dipolo à geometria variável”.



**Figura 1. (a) configuração em campo do imageamento elétrico multi-eletrodos e correspondente (b) modelo de resistividade real do terreno.**

As medidas de potencial são realizadas em sequência em várias duplas de eletrodos “M-N” colocados em linha, oportunamente selecionados, de forma automática, pelo resistivímetro ABM Al48-c (mais detalhes no item 3).

A distância entre os eletrodos de potencial depende do detalhe que seja necessário alcançar e da profundidade a ser estudada: em Corumbáiba (GO) foi utilizado um espaçamento de 5 m entre cada eletrodo, para pesquisar uma profundidade máxima de aproximadamente 80 m com um detalhe decrescente com a profundidade. O passo 10 e 6 m foi utilizado, respectivamente, para o primeiro e segundo perfil realizado em Moita Bonita (SE), sendo que as correspondentes profundidades alcançadas foram em torno de 160 e 96 m.

O nome “polo-dipolo à geometria variável” deve-se a que, nesta configuração, o campo elétrico é gerado por um: i) primeiro polo de corrente chamado “A”, colocado no interior da linha de medida, o qual é selecionado e deslocado de forma automática pelo resistivímetro para o interior da mesma linha em correspondência aos 48 eletrodos e; ii) segundo polo de corrente chamado “B” (que atua conjuntamente com o “A”) colocado “ao infinito” (ou seja, a uma distância relativamente grande da linha de medição).

As seções geoeletricas 2D, constituem o modelo de resistividade real do terreno, e fornecem um corte vertical deste (Fig. 1b) com uma grande quantidade de dados de resistividade (Fig. 1a), com mediamente 14 níveis de profundidade, possíveis graças à geometria variável, que funciona aumentando o espaçamento dos dipolos de medida com a distância do polo de corrente, acompanhado por um aumento progressivo e linear do potencial lido.

### **3 - AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS**

A obtenção dos dados foi realizada pelo resistivímetro ABM AL48-c, com um energizador interno de 300 W e capaz de prover uma tensão elétrica de até 700 V aos cabos de medida, em grau de adquirir até 48 canais simultaneamente (Fig. 1) e de comandar automaticamente a inversão da corrente. Nesta configuração, o resistivímetro comanda, de forma síncrona, o gerador interno, com geração de ondas quadradas.

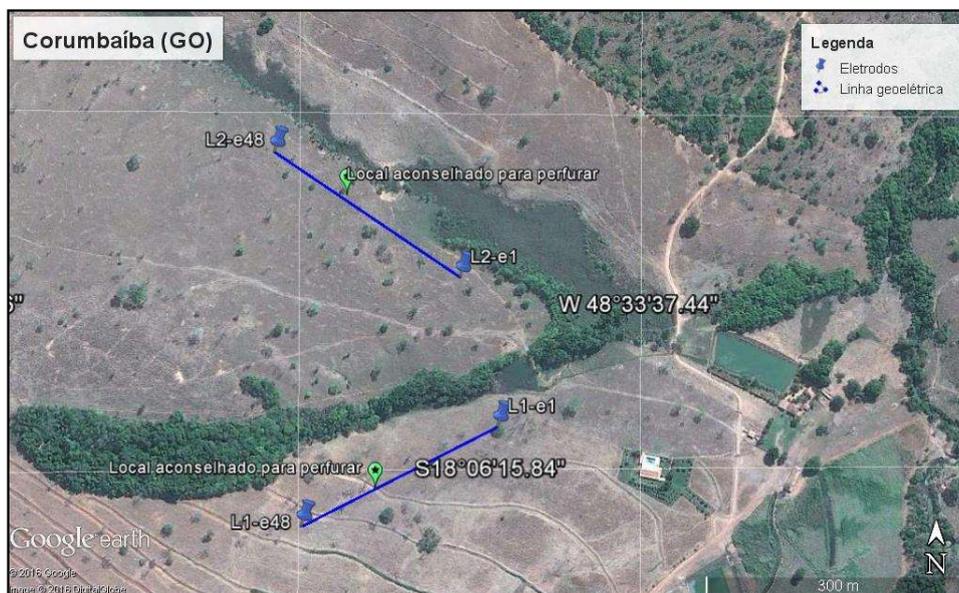
Os dados de resistividade aparente foram medidos e processados através do software RES2DINV. A inversão dos dados de resistividade foi conduzida pelo método dos mínimos quadrados envolvendo métodos de diferenças finitas e elementos finitos.

Tratando-se de uma morfologia irregular, foi aplicada a correção topográfica com base nos dados topográficos levantados sucessivamente à campanha geofísica.

#### 4 - CONTEXTO GEOLÓGICO DAS REGIÕES DE ESTUDO

Duas linhas de pesquisa geoeétrica foram analisadas em Corumbaíba, Goiás, na área da indústria de laticínios Italac na Rodovia GO-139, s/n, Setor Industrial, conforme o mapa na Fig. 2. As coordenadas do primeiro e último eletrodo (n° 48) da linha 1 são, de acordo com o Datum WGS 84:  $18^{\circ} 6'14.36''$  S,  $48^{\circ}33'42.92''$  O e  $18^{\circ}6'17.90''$  S,  $48^{\circ}33'50.35''$  O, respectivamente. Considerando o mesmo Datum, o eletrodo 1 da linha 2 está em  $18^{\circ}6'8.88''$  S,  $48^{\circ}33'44.35''$  O enquanto o eletrodo 48 se encontra em  $18^{\circ}6'4.32''$  S,  $48^{\circ}33'51.42''$  O. Ambas as linhas têm 235 m de comprimento.

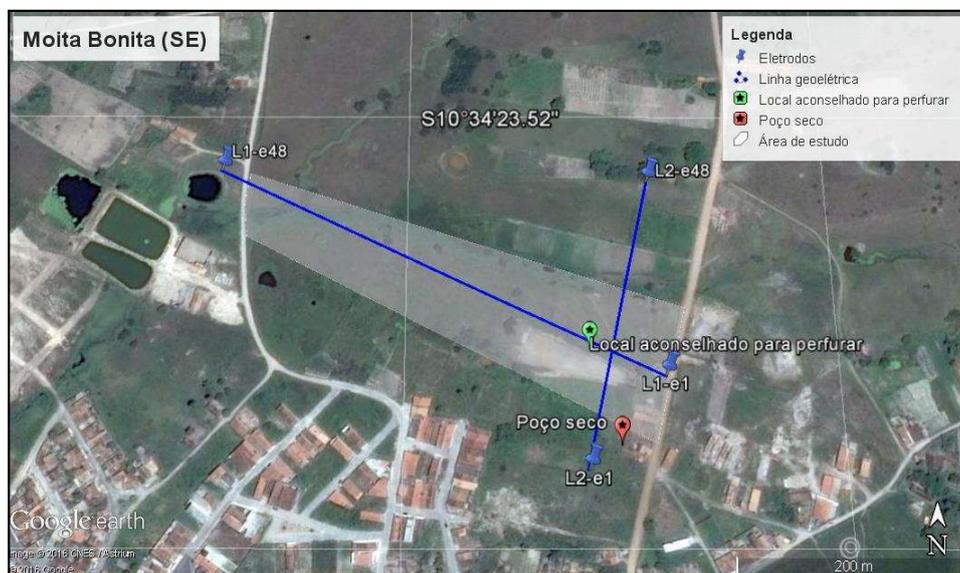
A área de estudo se encontra no Grupo Araxá, constituído por uma sequência de metassedimentos e corpos graníticos associados. Segundo Queiroz et al. (2000) os principais lineamentos estruturais nesta região são na direção noroeste-sudeste, por este motivo a linha geoeétrica 1 foi traçada na direção sudoeste-nordeste, visando, com um ângulo próximo ao de  $90^{\circ}$ , identificar esses lineamentos principais ou secundários. A linha 2 foi traçada perpendicular à primeira, para tentar compreender a região em mais de uma direção. Outro motivo para o traçado da linha 2 foi a presença de um rio paralelo a esta; geralmente existem fraturas ou mesmo falhamentos cruzando os rios, portanto uma linha de pesquisa geoeétrica paralela ao rio pode identificar estas anomalias estruturais.



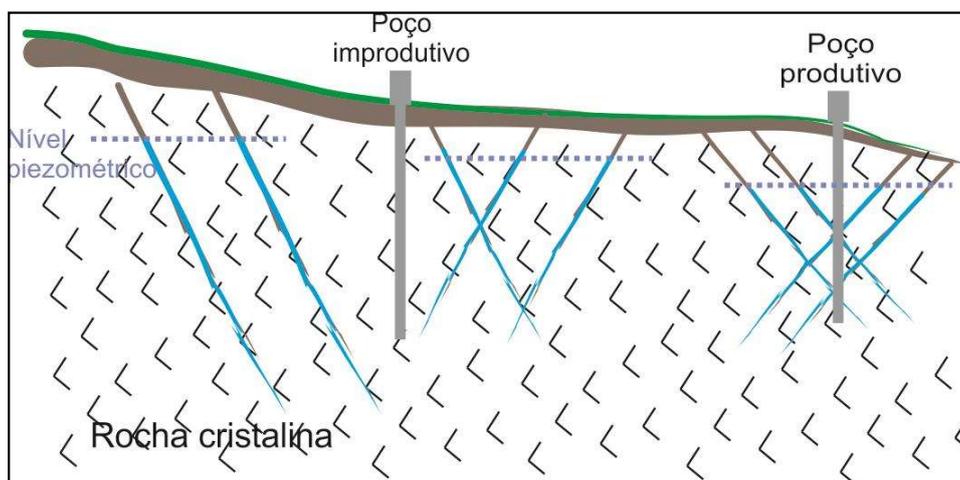
**Figura 2. Disposição das linhas geoeétricas 1 e 2 na indústria de laticínios em Corumbaíba (GO).**

Em Moita Bonita (SE) também duas linhas foram obtidas, porém apenas o perfil ao longo do qual o poço foi perfurado será demonstrado aqui. As coordenadas do primeiro eletrodo da primeira linha são, de acordo com o Datum WGS 84:  $10^{\circ}34'31.63''$  S,  $37^{\circ}20'26.29''$  O; e do último eletrodo:  $10^{\circ}34'25.27''$  S,  $37^{\circ}20'39.95''$  O. E as coordenadas do primeiro eletrodo da segunda linha são:

10°34'34.34" S, 37°20'28.64" O; e do último eletrodo: 10°34'25.64" S, 37°20'26.68" O. A primeira linha tem 470 m de comprimento (47 espaçamentos de 10 m com 48 eletrodos) enquanto a segunda tem 282 m (passo 6 m). Esta é menor devido a limitação de espaço para estender os cabos multipolares.



**Figura 3. Disposição das linhas geoeletricas 1 e 2 na propriedade em Moita Bonita (SE).**



**Figura 4. Modelo de aquífero fraturado.**

No local pesquisado há afloramento do embasamento cristalino arqueano/paleoproterozóico da Formação Itabaiana – Simão Dias, composta por domos gnáissicos-migmatíticos (A. Uhlein et al., 2011). O traçado da linha 1 foi definido de forma longitudinal ao polígono de estudo, conforme a Fig. 3, sendo a linha 2 perpendicular a esta, para também poder compreender a geologia em subsuperfície em mais de uma direção. Segundo o banco de dados corporativo (Geobank) da CPRM (Serviço Geológico do Brasil) as principais tendências dos lineamentos estruturais nesta região são oés-noroeste – és-sudeste (ONO-ESE); porém, lineamentos de menor expressão, mas mais

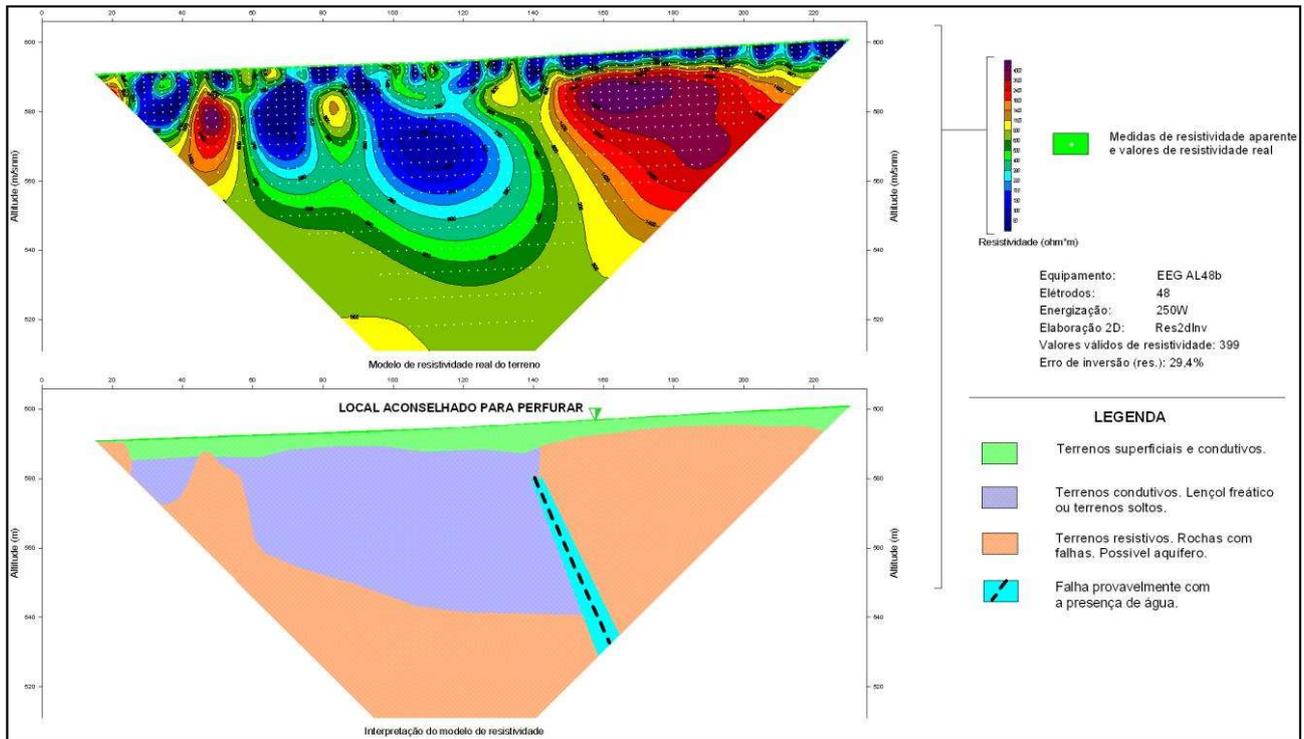
próximos, estão na direção sudoeste-nordeste (SO-NE). Desta forma a linha 1 foi disposta apta a identificar estes lineamentos mais próximos, enquanto a linha 2 poderia identificar os lineamentos regionais.

Tanto em Corumbaíba quanto em Moita Bonita, o que se espera é que o perfil geoeletrico cruze possíveis falhas ou fraturas conforme o modelo na Fig. 4, aumentando as chances de perfuração de poços produtivos.

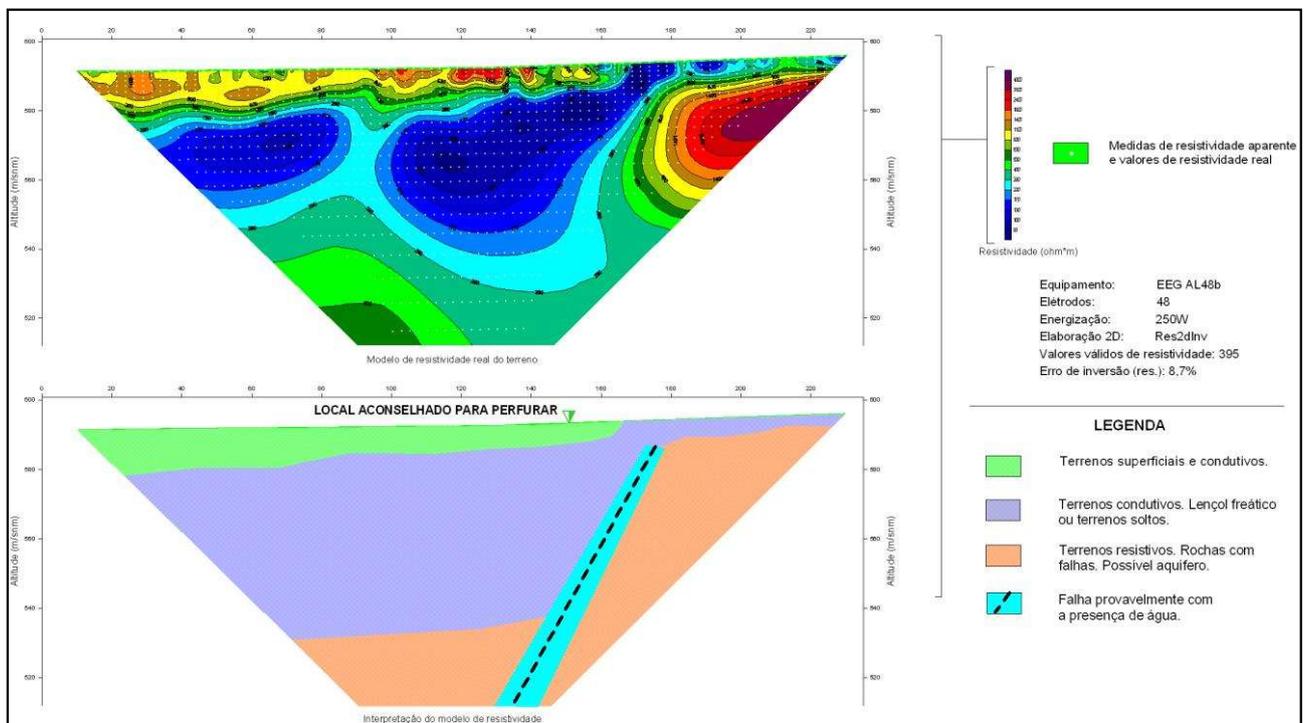
## 5 - RESULTADOS

A Fig. 5a mostra o modelo de resistividade real do terreno ao longo da linha de pesquisa geoeletrica 1. Entre 140 e 235 m de comprimento há uma região de cerca de 5 m de espessura com baixa resistividade (100 a 300 ohm.m) contrastando com uma zona de alta resistividade (até 4.000 ohm.m) que se estende até o limite lateral a sudoeste e em profundidade estudado por este perfil. Zona resistiva semelhante a esta aparece novamente no polígono que se estende ao longo do comprimento de 40 e 55 m da linha de pesquisa, delimitado na parte superior pela profundidade de cerca de 5 m e se estendendo até o limite inferior estudado pelo perfil. A parte central do perfil, de 60 a 140 m de comprimento há de 0 a cerca de 20 m de profundidade a presença de terrenos fortemente condutivos, a partir desta profundidade há uma tendência gradual de aumento de resistividade. Considerando as informações geológicas da região, com afloramentos rochosos, pressupõe-se que as zonas resistivas correspondem à rocha sã; a camada superficial de cerca de 5 m de espessura pode ser uma camada de solo e rocha alterada; enquanto a zona relativamente condutiva na região central do perfil deve corresponder a lençol freático ou terrenos soltos argilosos acumulados devido ao rebaixamento dessa região central por causa de um falhamento, este indicado no modelo geológico na Fig. 5b.

O perfil 2, contido na Fig. 6a, demonstra certa correspondência com o perfil 1: zona resistiva no polígono entre 170 e 235 m de comprimento, a partir de 5 m de profundidade até o final inferior e noroeste do perfil; região central com gradual aumento da resistividade dos terrenos a partir de 5 m de profundidade até o limite inferior investigado. Interpretação, baseada nas informações geológicas e no perfil 1 é dada por uma camada superficial de aproximadamente 5 m de espessura, composta pela camada superior anômala, de 0 a 170 m de comprimento (mais resistiva que a camada inferior); zona resistiva, sendo identificada como rocha sã, tanto a forte zona resistiva a noroeste quanto a tendência ao aumento da resistividade a medida que aumenta a profundidade ao longo de todo o perfil. Mais uma vez a zona central fortemente condutiva em relação a zona resistiva pode ser identificada como lençol freático ou mesmo a presença de terrenos soltos argilosos ocupando o espaço gerado pelo falhamento indicado pela linha tracejada.

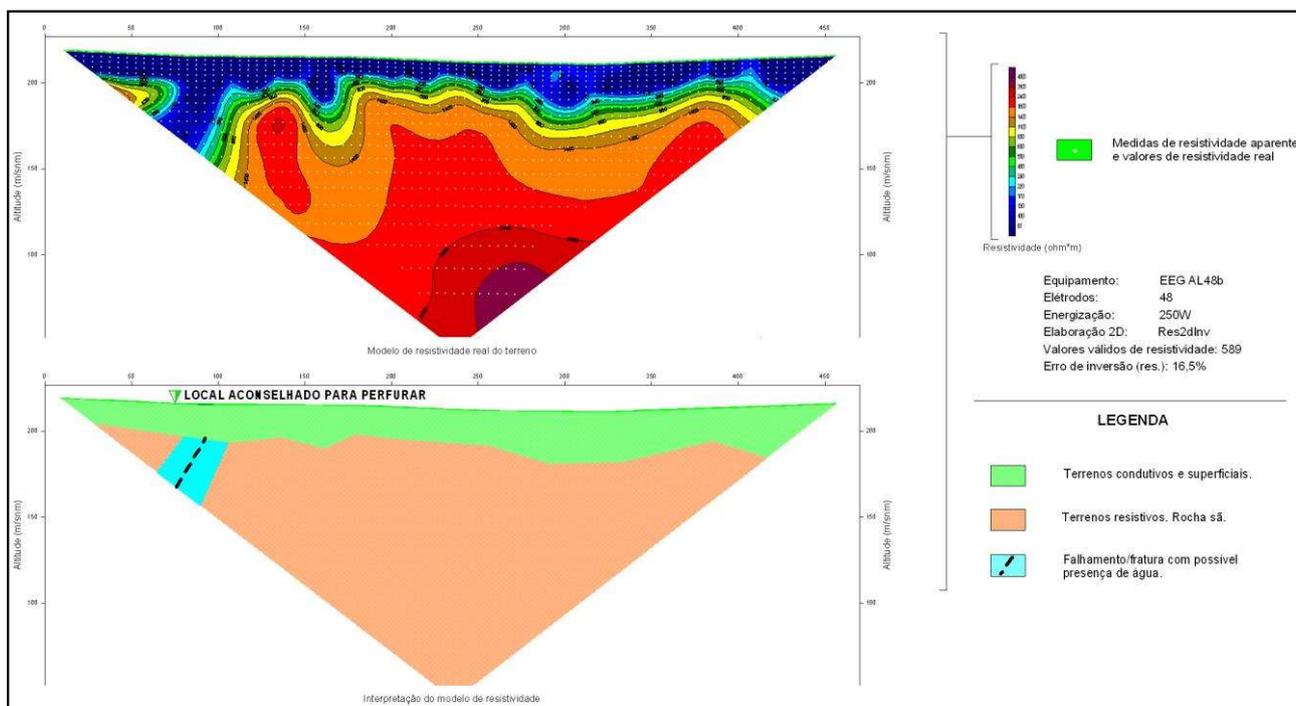


**Figura 5. (a) modelo de resistividade real do terreno da linha 1 de pesquisa em Corumbá (GO) e seu correspondente (b) perfil interpretado.**



**Figura 6. (a) modelo de resistividade real do terreno da linha 2 de pesquisa em Corumbá (GO) e seu correspondente (b) perfil interpretado.**

Considerando que há a presença de fortes lineamentos estruturais na região que se supõe que cruzam os perfis geoeletricos, optou-se pela interpretação da presença de falhamentos nos dois perfis. Diante disso os poços foram locados visando atingir os falhamentos em profundidade, conforme indica os triângulos em 157 m (Fig. 5b) e 153 m (Fig. 6b) de comprimento do perfil 1 e 2, respectivamente.



**Figura 7. (a) modelo de resistividade real do terreno da linha 1 de pesquisa em Moita Bonita (SE) e seu correspondente (b) perfil interpretado.**

Perfurados os poços, em ambos: a presença da rocha sã foi confirmada e a vazão obtida foi entre 12 e 15 m<sup>3</sup>/hora, considerada alta em relação aos poços anteriormente existentes. Informações mais específicas a respeito da perfuração, como perfil litológico, não puderam ser divulgadas.

Em Moita Bonita, Sergipe, foi adquirido o perfil contido na Fig. 7a. Verifica-se uma camada superficial em torno de 10 m de espessura com resistividades relativamente baixas (<100 ohm.m) se mantendo regularmente sobre uma camada resistiva (até 4.000 ohm.m) que se estende abaixo desta até o limite inferior da pesquisa geoeletrica; essa regularidade tem exceção em três locais: no comprimento do perfil em torno de 160 m e 300 m onde essa faixa superficial mais condutiva se expande além da generalização de 10 m de profundidade até aproximadamente 20-25 m; e entre 75 e 105 m de comprimento do perfil há uma forte anomalia horizontal, onde a zona resistiva é interrompida verticalmente pela zona condutiva.

Na região de estudo já havia sido perfurado um poço a cerca de 70 m a sul deste perfil (poço seco na Fig. 3), onde o topo da rocha sã iniciou em torno de 8 m de profundidade. Portanto pôde-se

supor que a zona condutiva se trata de terrenos soltos enquanto a zona resistiva representa a rocha sã. A Fig. 7b relaciona o perfil geofísico da Fig. 7a com modelos de aquíferos cristalinos que contêm falhamentos/fraturamentos subverticais. Nestes é normal a presença de terreno argiloso e/ou água gerando baixa nas medidas de resistividade.

Por isso, locou-se o poço tubular ao longo de 75 m de comprimento deste perfil mais uma vez visando encontrar a falha/fratura em profundidade. Sugeriu-se a perfuração até 50 m de profundidade, porém observa-se no perfil que essa zona condutiva, com possível presença de água, já se encontra a partir de cerca de 20 m de profundidade. Feita a perfuração, relatou-se que em 18 m iniciou a vazão de água do poço. Este foi perfurado até 45 m de profundidade, contendo vazão de 2.5 m<sup>3</sup>/h (conforme teste de vazão). A rocha sã conforme o primeiro poço e a indicação do perfil geoeletrico iniciou em 8 m de profundidade.

## 6 - DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Nas duas regiões de estudo o perfil geoeletrico definiu bem a anomalia horizontal identificada como falhas ou fraturas, sendo que em Moita Bonita – SE consegue inclusive definir a espessura daquela. A alta densidade de dados permite uma resolução de 1 m para os dois perfis em Corumbáiba (GO), realizados a passo 5 m entre cada eletrodo, e 2 m para o perfil em Moita Bonita (SE), onde foi utilizado o passo 10 m. O método geoeletrico se mostra viável para identificar aquíferos cristalinos pelo fato destes gerarem alto contraste da propriedade de resistividade elétrica, principalmente por causa da presença de terrenos úmidos e/ou argila nesses lineamentos estruturais, que geralmente diminuem consideravelmente a resistividade aparente da região, contrastando com a maior resistividade geralmente de rochas sãs. Além disso, a geoeletrica foi eficiente para definir o topo rochoso, conforme verificado pelos dois poços perfurados em Moita Bonita onde a rocha sã iniciou em torno de 8 m, correspondendo ao imageamento elétrico.

É importante ressaltar que os dados geofísicos sem associações geológicas abrem espaço para inúmeras possibilidades sendo arriscado tomar decisões baseando-se apenas nesse critério de informações, por isso foi utilizado o termo “auxílio” no título do presente trabalho. Tratando-se de utilizar o método geoeletrico para auxiliar na locação de poços tubulares deve-se, no mínimo: 1) compreender que tipo de aquífero pode existir na região, aquífero cristalino, sedimentar ou cárstico; 2) verificar a existência de poços já perfurados próximos à região de estudo, visando conhecer a profundidade da rocha sã, litologias presentes, regiões favoráveis (poços com boa vazão de água) e regiões não favoráveis (alta taxa de poços secos) à perfuração; 3) ter uma noção da profundidade necessária a ser estudada, lembrando que esta não depende apenas do espaçamento entre eletrodos utilizados, mas também da geologia local, sendo que se houver terrenos altamente condutivos em

superfície e altamente resistivos em profundidade a profundidades de investigação será prejudicada, enquanto caso ocorra o posto esta será beneficiada.

Realizar um estudo geofísico prévio à perfuração demonstrou-se muito útil. Quando se analisa, por exemplo, o caso em Moita Bonita, ao longo dos 470 metros de linha geométrica estudada verificou-se a presença de local viável para perfurar apenas na região entre 60 e 100 m de comprimento do perfil, ou seja, uma linha de 40 m, o que corresponde a cerca de apenas 8,5% de chance de acerto caso a escolha do local fosse feita aleatoriamente sem estudo prévio. No caso em Corumbáiba os diretores da empresa de laticínios Italac relataram que os poços indicados através da geofísica são os que obtiveram maiores vazões quando comparados a poços perfurados sem o uso da geofísica.

## **7 - REFERÊNCIAS**

Queiroz, C. L., Meneses, P. R., Jost, H., 2000. Lineamentos em Imagens de Sensores Remotos e seu Significado Estrutural nos Terrenos Granito-Greenstone Belt De Orixás (GO). Revista Brasileira de Geociências 30(4):655-662.

Uhlein, A., Caxito, F. A., Sanglard, J. C. D., Uhlein, G. J., Suckau, G. L., 2011. Estratigrafia e tectônica das faixas neoproterozóicas da porção norte do Craton do São Francisco. Geonomos, vol. 19, n. 2, Edição Especial - 30 Anos do CPMTC.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao diretor de operações Carlos da Italac de Corumbáiba (GO) e ao proprietário da fazenda em Moita Bonita (SE), Henrique Andrade, pelas informações fornecidas com relação aos poços perfurados e pela confiança em permitir que realizássemos as referidas pesquisas geofísicas. Henrique de Sá agradece ao CAPES pela bolsa de mestrado.