



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Instituto de Astronomia, Geofísica e
Ciências Atmosféricas
Departamento de Geofísica
Programa de Pós-Graduação em Geofísica



Imageamento Elétrico para Auxílio na Locação de Perfuração de Poços Tubulares – Estudo de Casos em Aquíferos Fraturados

HENRIQUE SOARES DE SÁ

Janeiro, 2017

São Paulo (SP)

2017

HENRIQUE SOARES DE SÁ

**Imageamento Elétrico para Auxílio na Locação de Perfuração de Poços
Tubulares – Estudo de Casos em Aquíferos Fraturados**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica Aplicada do Departamento de Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Área de concentração: Geoeletrica aplicada a Hidrogeologia

Orientador: Prof.º Dr.º Vagner Roberto Elis

São Paulo (SP)

2017

Dedico este trabalho aos meus pais, por todo o amor que eles me deram. Dedico este trabalho à Deus, por através dos meus pais e de tudo e todos ao meu redor, ter constantemente me amado, apoiado e aconselhado. E por fim dedico este trabalho a quem utilizará o conhecimento contido aqui para aprofundar nosso conhecimento sobre a ciência geofísica.

AGRADECIMENTOS

De alguma forma ou de outra quem somos, onde estamos e as oportunidades que temos são resultado de quem viveu e do que fez no passado e no presente. Então agradeço a todos que no passado e atualmente têm atitudes motivadas por sua consciência, tentando sinceramente fazer o bem, não importa a quem.

A todos os cientistas, saibam eles que foram isso ou não, em especial os relacionados à ciência geofísica.

Ao Prof. Dr. Vagner Roberto Elis, por transmitir sem reservas seu conhecimento e pela simpatia de sempre, o qual espero que eu possa rever muitas vezes ao longo de nossas vidas.

Aos professores do IAG-USP ao longo do curso de mestrado pela dedicação às aulas.

Aos colegas de classe, dos quais alguns desejo que se tornem amigos, como Nelson e Ana Paula e possamos discutir sobre geofísica por toda a vida.

Ao CARP (Colegiado Acadêmico para Reflexão de Princípios) por garantir minha acomodação durante o período do mestrado e permitir que tenha tido ótimas experiências através de trabalhos voluntários. Agradeço em especial a todos os membros do CARP que estiveram comigo no dia a dia permitindo que esses dois anos tenham sido agradáveis, a citar: Heung Gun “Hungs”, Sun Shim “Sun”, Enilsson “Jack”, Dário “Darião!”, Miguel “Myguis”, Samuel “Samuca”, Greise, Shin Joon e Miquéias “Miq”; assim como ao Presidente Koichi Sasaki e Pr. Naoki por todo aconselhamento, apoio e por fazer do meu mestrado se tornar um benefício para a sociedade, além do benefício técnico e científico.

Aos meus amados pais que independente das dificuldades demonstraram, ao longo da minha vida, amor incondicional de pais. De verdade, muito obrigado!

À minha querida irmã Eduarda, pelos sorrisos e por ser um incentivo para que eu faça tudo corretamente para ser um bom exemplo para ela.

À Deus. Porque analisando minha trajetória de vida percebo que não houve acaso, e sim uma conjunção de fatores bastante anormais que em conjunto me trouxeram até aqui, onde me sinto feliz e realizado com minha profissão e área de estudo. A isso atribuo ao árduo trabalho de Deus e dos meus bons antepassados que estiveram e ainda estão guiando e cuidando de mim.

Imageamento Elétrico para Auxílio na Locação de Perfuração de Poços Tubulares – Estudo de Casos em Aquíferos Fraturados

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 geométrica de imageamento elétrico multi-eletrodos à geometria variável, visou-se localizar lineamentos estruturais nas rochas em subsuperfície, aptas a armazenarem água. Analisou-se quatro casos de aquíferos em rochas cristalinas: i) três deles em metassedimentos e corpos graníticos do Grupo Araxá; ii) e outro 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 todas as situações os poços foram perfurados de acordo com o resultado do imageamento elétrico e em todas elas os poços perfurados apresentaram vazão de água.

Palavras-chave: Imageamento elétrico. Geometria variável. Aquíferos fraturados.

Electrical Imaging to Define de Location of Tubular Well Drilling – Case Study in Fractured Aquifers

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 four cases of aquifers in crystalline rocks: i) three of them in the metasediments and granitic bodies of the Araxá Group; ii) and the other in the 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 all situations the wells were drilled in accordance with the result of the electric imaging and in all of them the drilled wells showed water flow.

Keywords: Electrical Imaging. Variable Geometry. Fractured Aquifers.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MODELO CONCEITUAL PARA DEFINIR A RESISTIVIDADE ELÉTRICA.	5
FIGURA 2 - A FORMA GERAL DA CONFIGURAÇÃO DE ELETRODOS USADA EM MEDIÇÕES DE RESISTIVIDADE. FONTE: KEAREY ET AL., 2009, P. 318, TRADUZIDO POR MARIA CRISTINA MOREIRA COELHO.	7
FIGURA 3 – FAIXA DE VALORES DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA ALGUMAS LITOLOGIAS PREDOMINANTES NO CONTEXTO GEOLÓGICO. ADAPTADO DE KEAREY ET AL., 2002.	7
FIGURA 4 – RELAÇÃO ENTRE A RESISTIVIDADE ELÉTRICA E A PORCENTAGEM VOLUMÉTRICA DE ÁGUA NOS POROS DE 4 DIFERENTES TERRENOS ARGILOSOS. FONTE: A. SAMOUËLIAN ET AL., 2005.	8
FIGURA 5 - MODELO DE AQUÍFERO FRATURADO.	10
FIGURA 6 - MAPA GEOLÓGICO SIMPLIFICADO DO BRASIL.	11
FIGURA 7 – A) MODELO DE AQUÍFERO FRATURADO; B) MODELO DE RESISTIVIDADE REAL DO TERRENO.	13
FIGURA 8 - (A) CONFIGURAÇÃO EM CAMPO DO IMAGEAMENTO ELÉTRICO MULTI-ELETRODOS E CORRESPONDENTE (B) MODELO DE RESISTIVIDADE REAL DO TERRENO.	16
FIGURA 9 - ESQUEMA DE REALIZAÇÃO DE UM CAMINHAMENTO POLO-DIPOLO A PASSO 10 M.	18
FIGURA 10 - ESQUEMA DE CABO MULTIPOLAR NA SUPERFÍCIE CONECTADO A ELETRODOS ESPAÇADOS EM 10 M, ILUSTRANDO O ESQUEMA DE GEOMETRIA VARIÁVEL E SUA CONSEQUENTE PERDA DE RESOLUÇÃO VERTICAL (FIGURA NÃO EXATAMENTE CORRESPONDENTE À TABELA 1).	19
FIGURA 11 - RESISTIVIDADES APARENTES MEDIDAS E CALCULADAS NO SENTIDO DIRETO E INVERSO.	20
FIGURA 12 - RESISTIVÍMETRO EEG AL48, CABOS MULTIPOLARES E ELETRODO.	24
FIGURA 13 - LOCAIS ONDE FORAM REALIZADAS AS PESQUISAS GEOFÍSICAS. SÍMBOLO EM AZUL: INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS EM CORUMBAÍBA, GOIÁS; SÍMBOLO EM LARANJA: FAZENDA EM MOITA BONITA, SERGIPE; E SÍMBOLO EM VERDE: CIDADE DE APARECIDA DE GOIÂNIA E SENADOR CANEDO, GOIÁS.	27
FIGURA 14 - DISPOSIÇÃO DAS LINHAS GEOELÉTRICAS 1 E 2 NA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS EM CORUMBAÍBA (GO).	28
FIGURA 15 - DISPOSIÇÃO DAS LINHAS GEOELÉTRICAS 1 E 2 NA PROPRIEDADE EM MOITA BONITA (SE).	29
FIGURA 16 - DISPOSIÇÃO DAS LINHAS GEOELÉTRICAS 1 E 2 NA ESCOLA DOM FERNANDO EM APARECIDA DE GOIÂNIA (GO).	31
FIGURA 17 - MAPA GEOLÓGICO DE APARECIDA DE GOIÂNIA.	32
FIGURA 18 - DISPOSIÇÃO DAS LINHAS GEOELÉTRICAS 1, 2 E 3 NO CONDOMÍNIO MANSÕES MORUMBI EM APARECIDA DE GOIÂNIA (GO).	34
FIGURA 19 - (A) MODELO DE RESISTIVIDADE REAL DO TERRENO DA LINHA 1 DE PESQUISA EM CORUMBAÍBA (GO) E SEU CORRESPONDENTE (B) PERFIL INTERPRETADO.	38
FIGURA 20 - (A) MODELO DE RESISTIVIDADE REAL DO TERRENO DA LINHA 2 DE PESQUISA EM CORUMBAÍBA (GO) E SEU CORRESPONDENTE (B) PERFIL INTERPRETADO.	39
FIGURA 21 - (A) MODELO DE RESISTIVIDADE REAL DO TERRENO DA LINHA 1 DE PESQUISA EM MOITA BONITA (SE) E SEU CORRESPONDENTE (B) PERFIL INTERPRETADO.	41
FIGURA 22 - (A) MODELO DE RESISTIVIDADE REAL DO TERRENO DA LINHA 2 DE PESQUISA EM MOITA BONITA (SE) E SEU CORRESPONDENTE (B) PERFIL INTERPRETADO.	42
FIGURA 23 - LOCAL ACONSELHADO PARA PERFURAR NA ESCOLA DOM FERNANDO EM APARECIDA DE GOIÂNIA, GOIÁS.	44
FIGURA 24 - (A) MODELO DE RESISTIVIDADE REAL DO TERRENO DA LINHA 1 DE PESQUISA NA ESCOLA DOM FERNANDO EM APARECIDA DE GOIÂNIA (GO) E SEU CORRESPONDENTE (B) PERFIL INTERPRETADO.	45
FIGURA 25 - (A) MODELO DE RESISTIVIDADE REAL DO TERRENO DA LINHA 2 DE PESQUISA NA ESCOLA DOM FERNANDO EM APARECIDA DE GOIÂNIA (GO) E SEU CORRESPONDENTE (B) PERFIL INTERPRETADO.	46
FIGURA 26 - PROJEÇÃO NA SUPERFÍCIE (FAIXAS VERDES), AO LONGO DAS LINHAS GEOELÉTRICAS, DAS ZONAS DE ALTA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA EM SUBSUPERFÍCIE E SEUS RESPECTIVOS LOCAIS ACONSELHADOS PARA PERFURAR (BALÕES VERDES).	48
FIGURA 27 - LOCAL ACONSELHADO PARA PERFURAR DENTRO DO POLÍGONO EM SUPERFÍCIE CORRESPONDENTE À ZONAS CONDUTIVAS EM SUBSUPERFÍCIE.	49
FIGURA 28 - (A) MODELO DE RESISTIVIDADE REAL DO TERRENO DA LINHA 1 DE PESQUISA NO CONDOMÍNIO MANSÕES MORUMBI EM APARECIDA DE GOIÂNIA (GO) E SEU CORRESPONDENTE (B) PERFIL INTERPRETADO.	51
FIGURA 29 - (A) MODELO DE RESISTIVIDADE REAL DO TERRENO DA LINHA 2 DE PESQUISA NO CONDOMÍNIO MANSÕES MORUMBI EM APARECIDA DE GOIÂNIA (GO) E SEU CORRESPONDENTE (B) PERFIL INTERPRETADO.	52
FIGURA 30 - (A) MODELO DE RESISTIVIDADE REAL DO TERRENO DA LINHA 3 DE PESQUISA NO CONDOMÍNIO MANSÕES MORUMBI EM APARECIDA DE GOIÂNIA (GO) E SEU CORRESPONDENTE (B) PERFIL INTERPRETADO.	53

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - POSIÇÃO DOS ELETRODOS DE CORRENTE E CORRESPONDENTES ELETRODOS DE POTENCIAL ATRAVÉS DA GEOMETRIA VARIÁVEL EM UMA PESQUISA A PASSO 10 M.....	21
TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS GEOELÉTRICAS. L1 – e1: ELETRODO 1 DA LINHA 1; L1 – e48: ELETRODO FINAL DA LINHA 1; L2 – e1: ELETRODO 1 DA LINHA 2; E L2 – e48: ELETRODO FINAL DA LINHA 2.....	28
TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS GEOELÉTRICAS. L1 – e1: ELETRODO 1 DA LINHA 1; L1 – e48: ELETRODO FINAL DA LINHA 1; L2 – e1: ELETRODO 1 DA LINHA 2; E L2 – e48: ELETRODO FINAL DA LINHA 2.....	30
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS GEOELÉTRICAS. L1 – e1: ELETRODO 1 DA LINHA 1; L1 – e48: ELETRODO FINAL DA LINHA 1; L2 – e1: ELETRODO 1 DA LINHA 2; E L2 – e48: ELETRODO FINAL DA LINHA 2.....	31
TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS GEOELÉTRICAS. L1 - I: ELETRODO 1 DA LINHA 1; L1 - F: ELETRODO FINAL DA LINHA 1; L2 – I: ELETRODO 1 DA LINHA 2; E L2 - F: ELETRODO FINAL DA LINHA 2; L3 – I: ELETRODO 1 DA LINHA 3; E L3 - F: ELETRODO FINAL DA LINHA 3.	33

Sumário

1. Introdução	1
2. Método Geométrico para Investigação de Aquíferos Cristalinos	4
2.1. Contexto da Aplicação Geofísica para Água Subterrânea	4
2.2. Fundamentos do Método Geométrico	5
2.3. Aquíferos Cristalinos e sua Resposta Geométrica	9
2.4. Histórico de Aplicações de Métodos Geométricos para Aquíferos Cristalinos	14
3. Imageamento Elétrico Multi-eletrodos 2D – Configuração Polo-dipolo à Geometria Variável	16
4. Aquisição e Tratamento dos Dados	22
4.1. Resistivímetro EEG AL48	23
4.2. Metodologia de Aquisição	24
4.3. Tratamento dos Dados	25
5. Localização e Contexto Geológico das Regiões de Estudo	26
5.1. Caso 1 – Indústria de Laticínios em Corumbáiba, Goiás.....	27
5.2. Caso 2 – Fazenda em Moita Bonita, Sergipe	29
5.3. Caso 3 – Escola Dom Fernando em Aparecida de Goiânia, Goiás.....	30
5.4. Caso 4 – Condomínio Mansões Morumbi em Senador Canedo, Goiás.....	33
6. Interpretação dos Perfis Geométricos e seus Resultados	35
6.1. Caso 1 – Indústria de Laticínios em Corumbáiba, Goiás.....	36
6.2. Caso 2 – Fazenda em Moita Bonita, Sergipe	40
6.3. Caso 3 – Escola Dom Fernando em Aparecida de Goiânia, Goiás.....	43
6.4. Caso 4 – Condomínio Mansões Morumbi em Aparecida de Goiânia, Goiás	47
7. Discussão e Conclusões	54
Referências	55

1. Introdução

A aplicação de pesquisa geofísica para locação de poços tubulares tem sido intensificada por causa do aumento do número de perfurações tanto pela indústria como por condomínios. O motivo é a crescente crise hídrica, especialmente no sudeste do país, como por exemplo se intensificou no estado de São Paulo a partir de janeiro de 2014.

Em janeiro e fevereiro de 2015 o DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) registrou 231 autorizações para abrir poços, enquanto no ano anterior foram 127 solicitações no estado de São Paulo, um crescimento de cerca de 82%. Segundo a Companhia de Saneamento Básico desse estado (Sabesp), este é o maior usuário dos recursos hídricos subterrâneos do país, com cerca de 65% das cidades e 90% das indústrias paulistas, de forma parcial ou total, sendo abastecidas por poços tubulares.

O aumento do interesse em perfuração de poços não se restringe apenas ao sudeste, mas sim a todo o Brasil. De 2013 para 2014 as perfurações aumentaram em 70% na Paraíba (de acordo com a CDRM - Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba). Neste mesmo ano 600 poços foram registrados na Secretaria dos Recursos Hídricos (SRH) no Governo do Estado do Ceará através do Programa Cearense de Perfuração de Poços, número 6 vezes maior do que o contabilizado em 2007, quando perfurou-se 90 poços. O aumento das perfurações ocorreu, principalmente, graças à adoção da nova política estabelecida em julho de 2014, que determina que toda e qualquer solicitação de perfuração de poços deverá vir acompanhada pela devida pesquisa geofísica, por reduzir a taxa de perfurações sem sucesso e de alto risco devido à seca. Após o início do programa, mais de 2.300 poços foram perfurados em todo o estado, com o benefício para mais de 1 milhão de cearenses, em todos os 184 municípios.

Além disso, nos últimos 25 anos foram perfurados mais de 12 milhões de poços no mundo. Visando aumentar as chances de perfurações de sucesso a ferramenta geofísica tem sido aplicada, não para encontrar a água em si, mas sim os locais geologicamente viáveis para o acúmulo da água, ou seja, aquíferos. Dentre os métodos geofísicos aplicados à hidrogeologia pode-se citar os: i) potenciais, de gravidade e magnéticos, para delinear aquíferos regionais e bacias sedimentares de larga escala; ii) métodos sísmicos, para aquíferos no topo rochoso e em rochas fraturadas; iii) emanção natural de radônio, em zonas de falhas de rochas com pouca ou nenhuma cobertura, especialmente ricas em urânio e; iv) métodos eletromagnéticos e elétricos, que são aplicáveis a diversas situações geológicas, investigando características críticas para a hidrogeologia, como permeabilidade e porosidade das rochas, que podem ser correlacionáveis com os valores de condutividade elétrica obtidos por esses métodos.

Dentre estes o principal método aplicado é o geoeletrico. Diante disso é de essencial importância analisar sua aplicação, não sendo repetitivo o estudo de casos, como outros trabalhos já expuseram, isso porque a geologia em geral contém situações bastante particulares e muitas vezes complexas. Portanto quanto mais situações forem estudadas maior será o nível de conhecimento proporcionado ao meio acadêmico e técnico, o que pode aumentar a probabilidade de acertos ao se utilizar os métodos geoeletricos no estudo de aquíferos fraturados. Diversas são as técnicas elétricas (ou geoeletricas) aplicadas na pesquisa geofísica para locação de poços tubulares, entre elas 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) à Geometria Variável, que basicamente trata-se da aquisição automatizada e com maior número de valores obtidos 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. “Geometria variável” refere-se à programação do resistivímetro para que a medida que a diferença de potencial medida entre os dipolos de potencial se torna muito baixa, a distância entre estes polos aumenta, conseqüentemente melhorando a relação sinal-ruído e a qualidade dos dados adquiridos (mais detalhes no Item 3).

O presente trabalho visa aprofundar, de forma prática, o conhecimento a respeito da utilização deste tipo de ferramenta de estudo de aquíferos, considerando alguns casos reais de pesquisas geofísicas realizadas para a 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, como: anticlinal, sinclinal, dique, e principalmente diversos tipos de falhas, fraturas ou zonas de cisalhamento. Portanto analisar-se-á o método geoeletrico nestes contextos geológicos, com suas particularidades, vantagens e desvantagens, ao encontrar e, de acordo com os limites de resolução, mapear tais lineamentos estruturais.

Os casos aqui citados compreendem investigações a profundidade rasa (até 250 m) e localizadas (dezenas a centenas de metros de linhas de pesquisa), o que torna mais difícil identificar estruturas geológicas tais como anticlinais, sinclinais e diques, por serem no geral encontradas em grandes dimensões. Portanto é mais comum a identificação de falhas e zonas de rocha fraturada, tanto é que os quatro casos estudados indicam corresponder a estas situações geológicas.

O primeiro caso é em uma indústria de laticínios denominada Italac, na unidade localizada em Corumbáiba, Goiás, presente no Grupo Araxá, caracterizado no local 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, em embasamento gnáissico. Os terceiro e quarto caso são em Aparecida de Goiânia e Senador Canedo, Goiás, respectivamente, e também estão dentro do contexto geológico do Grupo Araxá, sendo situados no terreno de uma escola, denominada Dom Fernando, e em uma ampla área de um condomínio residencial, chamado Mansões Morumbi.

O resultado do IEM tentará identificar materiais inconsolidados, 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 do meio, baseado nas possibilidades estruturais indicadas pelas informações geológicas regionais, a real situação em subsuperfície, de forma a localizar, caso existam, aquíferos.

A presente dissertação está dividida em 7 tópicos, a contar deste. O Item “2 Método Geoeletrico para Investigação de Aquíferos Cristalinos” aborda o papel da ferramenta geofísica atualmente nos estudos hidrogeológicos, com foco em locação de poços tubulares, indicando as razões de esta não ser ainda abundantemente utilizada. Porém, o seu uso tem sido cada vez mais requisitado, graças a fatores como bons resultados, amplo acervo técnico divulgado em revistas, meios eletrônicos, eventos e artigos acadêmicos e profissionais. Apresenta ainda a base teórica existente até então sobre o método eletrorresistivo, com foco na propriedade física resistividade elétrica, que dentre os parâmetros físicos na Terra, é um dos mais amplos na escala de valores, o que ameniza um dos sérios problemas das investigações geofísicas: a ambigüidade. E explica os aquíferos cristalinos e quais suas respostas geoeletricas, compreendendo as respectivas limitações. Tal capítulo é finalizado com uma discussão das terminologias atualmente utilizadas e um breve histórico das aplicações dos métodos geoeletricos para aquíferos cristalinos.

O Item “3 Imageamento Elétrico Multi-eletrodos 2D – Configuração Polo-dipolo à Geometria Variável” detalha o arranjo polo-dipolo utilizado nos quatro casos deste trabalho. E explica em detalhe o que é “geometria variável”, demonstrando como funciona, quais suas vantagens e desvantagens.

“4 Aquisição e Tratamento dos Dados”, apresenta a sistemática seguida desde a aquisição dos dados em campo até a elaboração final dos perfis geofísicos, citando: especificações técnicas do resistímetro utilizado, metodologia de aquisição, software e etapas de processamento utilizados.

Em “5 Localização e Contexto Geológico das Regiões de Estudo”, apresenta as localizações das linhas geoeletricas, sua direção, sentido, dimensão e qual o contexto litológico e estrutural estudado.

Com a síntese de informações geológicas regionais e, quando há, dos perfis litológicos, em conjunto com o devido conhecimento técnico, obtém-se no Item 6, a interpretação dos perfis geoeletricos. De acordo com a locação do poço, os poços perfurados são apresentados assim como sua vazão.

A dissertação se encerra e ao mesmo tempo abre novas possibilidades de estudo e reflexões no Item “7 Discussão e Conclusões”. Tal parte visa sintetizar o conhecimento adquirido através deste trabalho, de forma imparcial e correspondente o máximo possível única e exclusivamente aos dados e resultados obtidos, buscando contribuir para diminuir dúvidas e ao mesmo tempo abrir novos horizontes.

2. Método Geométrico para Investigação de Aquíferos Cristalinos

2.1. Contexto da Aplicação Geofísica para Água Subterrânea

Dentro das geociências, utiliza-se geofísica principalmente para exploração de hidrocarbonetos, com investigações de alguns quilômetros de profundidade. Já as aplicações para água subterrânea se limitam geralmente aos 250 m abaixo da superfície, envolvendo espessura de aquíferos, definição de topo rochoso, localização de lençol freático, delimitação de aquíferos confinados e suas respectivas unidades confinantes, fluxo do fluido avaliando se é contaminado ou não, avanço da cunha salina em regiões litorâneas, e lineamentos estruturais (falhas, fraturas, dobras, etc.) em rochas cristalinas.

O uso da geofísica para mapeamento de aquíferos e avaliação de qualidade da água tem crescido, devido em grande parte aos resultados positivos alcançados associado ao avanço nas soluções de modelamento numérico. Apesar disso, a geofísica para água subterrânea ainda é pouco utilizada, a isso pode-se associar vários fatores, como: i) pouca publicidade tanto nos meios acadêmicos para outras áreas, como engenharia, quanto para a sociedade em geral; ii) má aplicação, muitas vezes esperando que a geofísica alcance um resultado de forma isolada de outras informações essenciais, como geologia regional, perfis litológicos, imagens de satélite indicando direção de lineamentos, entre outros dados pertinentes, que quando associados com as informações geofísicas geralmente resultam em ótimos resultados. Considerar que a geofísica por si só pode gerar uma conclusão como o local para perfurar um poço é um tanto arriscado; iii) alto custo, já que em regiões como no nordeste, em que para perfurar um poço de cerca de 60 m de profundidade o custo é de cerca de R\$ 3.000,00, ao passo que uma pesquisa geofísica especializada para uma região desta, como caminhamento elétrico visando encontrar possíveis falhas/fraturas, pode estar na faixa de no mínimo o mesmo valor da perfuração, a depender da extensão da área pesquisada e das condições de acesso ao local; iv) dificuldade de implementação, porque alguns métodos, como o geométrico, envolvem extensão de cabos ao longo de centenas de metros ou as vezes alguns quilômetros para investigar a profundidade necessária, além de ser necessário haver terreno aberto para que os eletrodos sejam cravados, sendo que muitos locais não dispõem de tal espaço e área superficial adequada; v) limitações dos sinais obtidos, já que vários artefatos em subsuperfície mascaram os dados referentes à geologia, especialmente quando se trata de dados elétricos e em grandes cidades, que contêm adutoras, cabos de alta tensão enterrados e aéreos, cercas elétricas, entre outros fatores que interferem nas medidas de diferença de potencial do meio.

Como dito no parágrafo anterior, os resultados positivos, expostos por órgãos públicos acadêmicos, como universidades, de gestão dos recursos naturais, como a CPRM (Serviço Geológico do Brasil), e empresas privadas, têm motivado cada vez mais o uso de métodos geofísicos para localizar poços tubulares. Nos últimos 20 anos, um grande avanço da geofísica foi em relação aos métodos que medem a resistividade, que se deu graças a capacidade dos equipamentos de adquirir mais dados em menor tempo e fazer um processamento mais simplificado e uma interpretação com menos ambiguidade.

Além disso, as bases teóricas dos diversos métodos geofísicos têm sido extensivamente revisadas e podem ser consultadas em livros conceituados no assunto, como por exemplo: Telford et al. (1990) e Kearey et al. (2002), enquanto outros livros já focam na aplicação direta da geofísica para águas subterrâneas, como Braga (2016), no recente livro “Métodos Geométricos em Hidrogeologia”.

Internacionalmente, vários jornais acadêmicos publicam sobre geofísica associada a água subterrânea, como *Geophysics*, *Geophysical Prospecting*, *Applied Geophysics*, *Journal of*

Environmental & Engineering Geophysics e Ground Water. No Brasil há periódicos como a Revista Brasileira de Geofísica e a Revista Águas Subterrâneas.

Como citado na introdução, diversos são os métodos geofísicos aplicados para água subterrânea, como: radar de penetração no solo (GPR), potenciais (gravimétrico e magnético), sísmicos e elétricos. O mais aplicado, quando se trata de pequenas regiões, como para estudo em condomínios ou indústrias, é o método elétrico, por se tratar de uma pesquisa a nível local (área com limites lineares de dezenas a centenas de metros), que consegue identificar aquíferos com uma precisão de poucos metros, necessária para definir o local de perfuração de um poço tubular, além de ter profundidade de investigação dentro da faixa de até cerca de 250 m, que equilibra custo-benefício na hora de perfurar um poço. Esse tipo de poço em grande parte das situações pode prover a vazão de água necessária para o condomínio ou indústria em questão sem ter que atingir altas profundidades, que inviabilizaria a perfuração pelo alto custo.

2.2. Fundamentos do Método Geoelétrico

A geofísica aplicada em geral visa obter informações da subsuperfície através de parâmetros físicos medidos pelos diferentes métodos geofísicos. A metodologia geoelétrica auxilia na reconstrução da geologia investigada por meio de dados de resistividade elétrica (ρ). Conceitualmente este pode ser entendido como a resistência em *ohms* ao longo do comprimento, L , entre as faces, de área A , do cubo do material, de resistência R , ao qual se trata (Figura 1):

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

Equação 2-1 - Conceito matemático de resistividade elétrica.

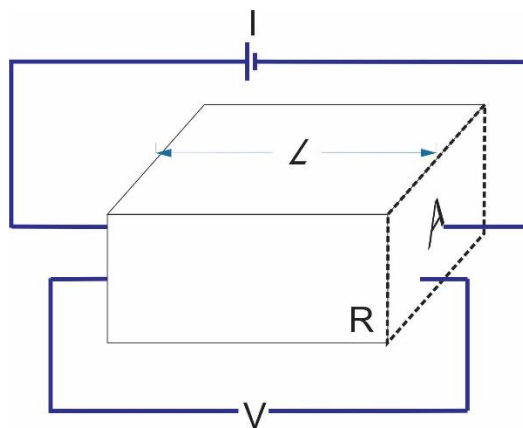


Figura 1 - Modelo conceitual para definir a resistividade elétrica.

Neste cubo, devido a passagem de corrente elétrica, há diferença de potencial entre as faces, portanto segundo a Lei de Ohm e utilizando a Equação 2-1 temos:

$$V = RI = \frac{\rho L}{A} I$$

Equação 2-2 - Lei de Ohm associada a resistividade elétrica.

Segundo Kearey et al. (2002, p. 318) o potencial V_r na distância r é dado por:

$$V_r = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

Equação 2-3

Tal equação permite calcular o potencial em qualquer distância r em um material de resistividade elétrica ρ , portanto homogêneo, após uma corrente elétrica I ter sido inserida em um semi-espço, assim como ocorre em uma pesquisa geoeletrica quando a corrente elétrica artificial é inserida por meio de eletrodos no solo adentrando na subsuperfície (a diferença, é que o meio geológico real dificilmente pode ser considerado homogêneo). A Figura 2 representa uma configuração geral da disposição dos eletrodos de corrente e potencial para adquirir dados de resistividade elétrica. Com isso temos que o potencial em V_C é a soma dos potenciais em V_A e V_B :

$$V_C = V_A + V_B = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B} \right)$$

Equação 2-4

assim também ocorre em V_D :

$$V_D = V_A + V_B = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} \right)$$

Equação 2-5

Como os potenciais absolutos são difíceis de monitorar convém calcular a diferença de potencial entre os polos de medida, V_C e V_D :

$$\Delta V = V_C - V_D = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B} - \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right)$$

Equação 2-6

com isso temos que:

$$\rho = \frac{2\pi \Delta V}{I} \frac{1}{\left(\frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B} - \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right)}$$

Equação 2-7

onde

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B} - \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right)}$$

Equação 2-8

e é chamado de fator geométrico, já que varia de acordo com o arranjo geométrico da técnica geoeletrica a ser aplicada (veja a dedução para o arranjo polo-dipolo no Item 3). Por fim, de forma simplificada temos a equação de resistividade elétrica:

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

Equação 2-9 - Definição de resistividade elétrica.

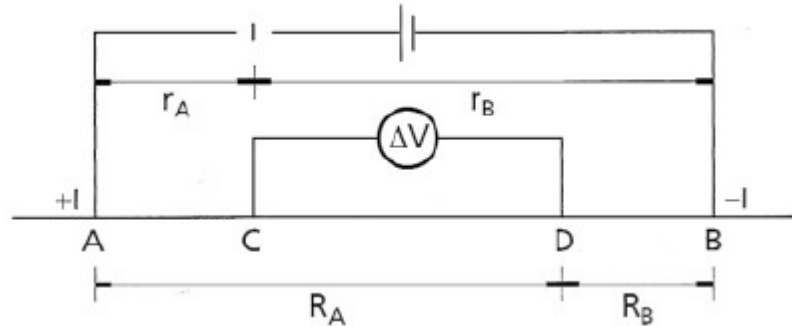


Figura 2 - A forma geral da configuração de eletrodos usada em medições de resistividade. Fonte: KEAREY et al., 2009, p. 318, traduzido por Maria Cristina Moreira Coelho.

Se o meio fosse homogêneo (uniformidade da litologia, lito-estrutura, umidade, composição, entre outros fatores que influem nas propriedades físicas) poderíamos considerar a resistividade elétrica obtida pela fórmula acima como real, porém se tratando de um meio heterogêneo a resistividade que se obtém em campo é chamada de resistividade aparente.

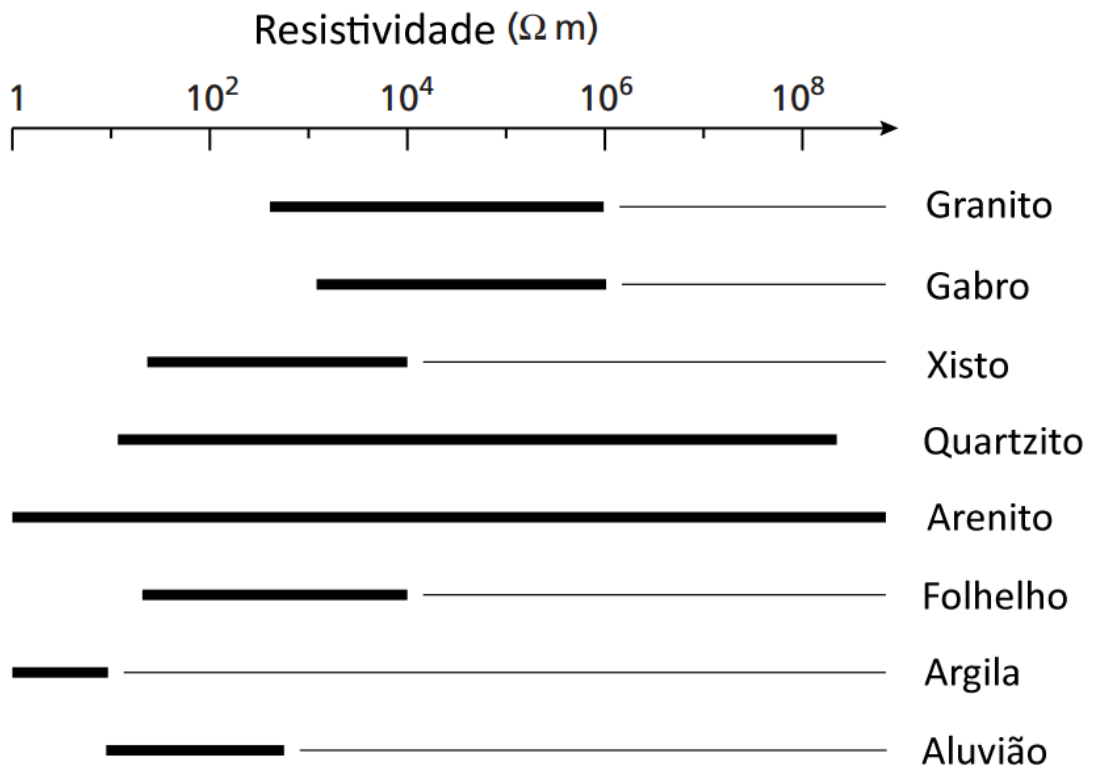


Figura 3 – Faixa de valores de resistividade elétrica para algumas litologias predominantes no contexto geológico. Adaptado de Kearey et al., 2002.

A Figura 3 proporciona uma noção das faixas de valores de resistividade elétrica comum para os principais tipos de rochas. Como se vê tais valores se sobrepõem, o que justifica não ser possível definir a litologia apenas por métodos geoeletricos. Ainda assim, é clara a tendência

das rochas ígneas e metamórficas (granito, gabro, xisto) terem maior resistividade do que as rochas sedimentares (como o folhelho) e terrenos soltos (argila, aluvião).

Cada corpo rochoso apresenta um amplo campo de variabilidade dos próprios valores de resistividade elétrica, dependendo da sua homogeneidade, do nível de alteração e, para rochas cristalinas, do grau de fraturamento. Por exemplo, em caso de terrenos soltos, como depósitos aluviais recentes, a resistividade depende da granulometria, dos fluidos neles contidos e do conteúdo em sal. Desta regra fazem exceção as argilas que, mesmo quando compactas, têm sempre valores de resistividade extremamente baixos: isso é devido, principalmente, às características do retículo cristalino dos minerais que as compõem e ao seu grau de saturação.

A Figura 4 mostra uma interessante relação entre a resistividade elétrica variando de acordo com a porcentagem volumétrica de água nos poros de diferentes tipos de solo. Quanto maior a porcentagem de água mais facilmente a corrente elétrica transita no meio diminuindo a resistividade elétrica daquele terreno. A resistividade é uma das propriedades físicas mais variáveis.

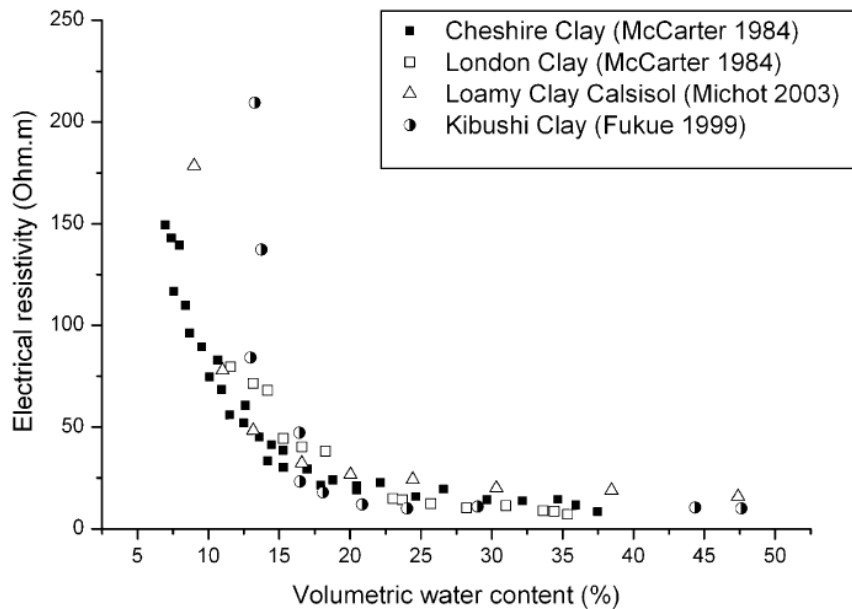


Figura 4 – Relação entre a resistividade elétrica e a porcentagem volumétrica de água nos poros de 4 diferentes terrenos argilosos. Fonte: A. SAMOUËLIAN et al., 2005.¹

Alguns minerais, como os metálicos e grafite, possibilitam a passagem de elétrons, porém, a maioria dos minerais que formam as rochas é isolante, assim a passagem de corrente elétrica se dá pelos íons no fluido dentro dos poros. Já que o processo predominante de condução elétrica é eletrolítico, mais do que eletrônico, então o fator predominante de controle da resistividade é a porosidade das rochas, havendo uma relação de que quanto maior a porosidade, menor a resistividade elétrica e vice-versa. No caso de rochas cristalinas, não há alto grau de porosidade, portanto elas geralmente apresentam valores de resistividade maiores, exceto na presença de falhas ou fraturas onde há passagem de fluidos e argilominerais.

¹ *Electrical resistivity*: resistividade elétrica, *volumetric water content*: conteúdo volumétrico de água, *clay*: argila.

Retomando o assunto relacionado do arranjo utilizado e considerando o conhecimento de resistividade real e aparente, pode-se entender que ao se mudar o arranjo dos eletrodos para um mesmo meio heterogêneo haverá diferentes valores de resistividade, enquanto que para um meio homogêneo, independente do arranjo eletrodico, o valor de resistividade se manteria, já que se estaria lhe dando com o valor real da resistividade.

2.3. Aquíferos Cristalinos e sua Resposta Geoelétrica

Segundo a ABAS (Associação Brasileira de Águas Subterrâneas) a água subterrânea tem como grande vantagem na grande maioria das vezes não precisar de tratamento, isso porque naturalmente ao percolar na subsuperfície ela sofre um processo natural de filtração por processos físico-químicos (troca iônica, decaimento radioativo, remoção de sólidos em suspensão, neutralização de pH em meio poroso, entre outros) e bacteriológicos (eliminação de microrganismos devido à ausência de nutrientes e oxigênio) se tornando própria para o consumo humano.

Segundo o órgão ANA (Agência Nacional das Águas), 2013, a reserva subterrânea potencial explorável no Brasil, ou seja, a disponibilidade hídrica subterrânea, é de 11.430 m³/s enquanto a recarga potencial direta está em torno de 34.413 m³/s. Computa-se ainda que as águas subterrâneas abastecem 39% dos municípios brasileiros.

A infiltração da água superficial na subsuperfície depende de alguns fatores:

- Cobertura vegetal: quanto mais densa a vegetação, menos fluído conseguirá adentrar o subsolo;
- Conteúdo de argila nos terrenos e rochas: a argila funciona como um material impermeável que impede a passagem de fluídos, isso porque preenche os poros que seriam o trajeto;
- Declividade: a velocidade do fluxo aumenta quanto mais acentuada a declividade do terreno, diminuindo o fluído que penetra no subsolo;
- Tipo de chuva: chuvas finas a moderadas gradativamente permitem que a água adentre no solo, ao passo que chuvas intensas rapidamente saturam o terreno.

Formações geológicas compostas por litologias associadas a uma estrutura geológica que permitem a acumulação de água são chamadas aquíferos. A água da superfície adentra o solo, lentamente percolando pelas rochas permeáveis até se acumular nos espaços intergranulares de rochas porosas e permeáveis (rochas sedimentares) ou nas fissuras, falhas e/ou fraturas (porosidades secundárias) de rochas cristalinas. A primeira situação caracteriza os aquíferos porosos, granulares ou sedimentares, enquanto a última os aquíferos fraturados, fissurados ou cristalinos (Figura 5).

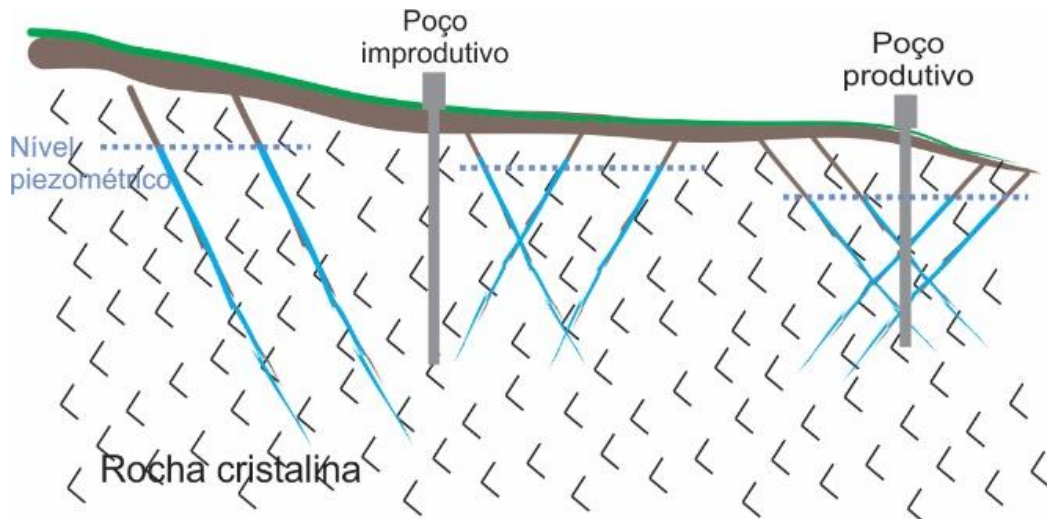


Figura 5 - Modelo de aquífero fraturado.

Aquíferos cristalinos ocorrem em rochas ígneas ou metamórficas. A quantidade de água armazenada é muito maior em aquíferos sedimentares do que em cristalinos, porém em diversas regiões do Brasil não há a opção de perfuração em um ambiente de rochas sedimentares, devendo-se recorrer ao estudo dos lineamentos estruturais aptos a armazenar água nas rochas cristalinas. No Brasil é ampla a área com predominância de rochas cristalinas, conforme pode-se observar na Figura 6, que mostra as áreas com predominância de certos tipos de rochas cristalinas: i) vermelho: rochas ígneas intrusivas (corpos irregulares); ii) verde claro: rochas ígneas vulcânicas (derrames basálticos) e; iii) rosa: rochas metamórficas. Visualmente verifica-se uma concentração na região sul de rochas ígneas vulcânicas; além de estarem presentes no nordeste do estado de São Paulo e sudoeste do Mato Grosso do Sul. As rochas metamórficas e ígneas intrusivas encontram-se ao longo de todo o litoral leste, adentrando mais no continente na região sudeste e nordeste, até a região central do estado de Minas Gerais e Bahia; e sendo predominante na maioria dos estados do nordeste, como Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará; e em grande parte dos estados de Goiás, Tocantins, Pará; região norte do Mato Grosso; em praticamente todo o território de Rondônia; e no norte da região Norte do Brasil, compreendendo o estado do Amapá e norte de Roraima.

A capacidade de armazenar água nestas rochas dependerá da dimensão e conexão das fissuras. Como pode-se observar na Figura 5, quanto mais conexões houverem entre as fissuras maior a quantidade de água possível de ser explorada em determinado poço, já que haverá acesso não apenas à fratura/falha que se atingiu, mas também às que estão conectadas a esta.

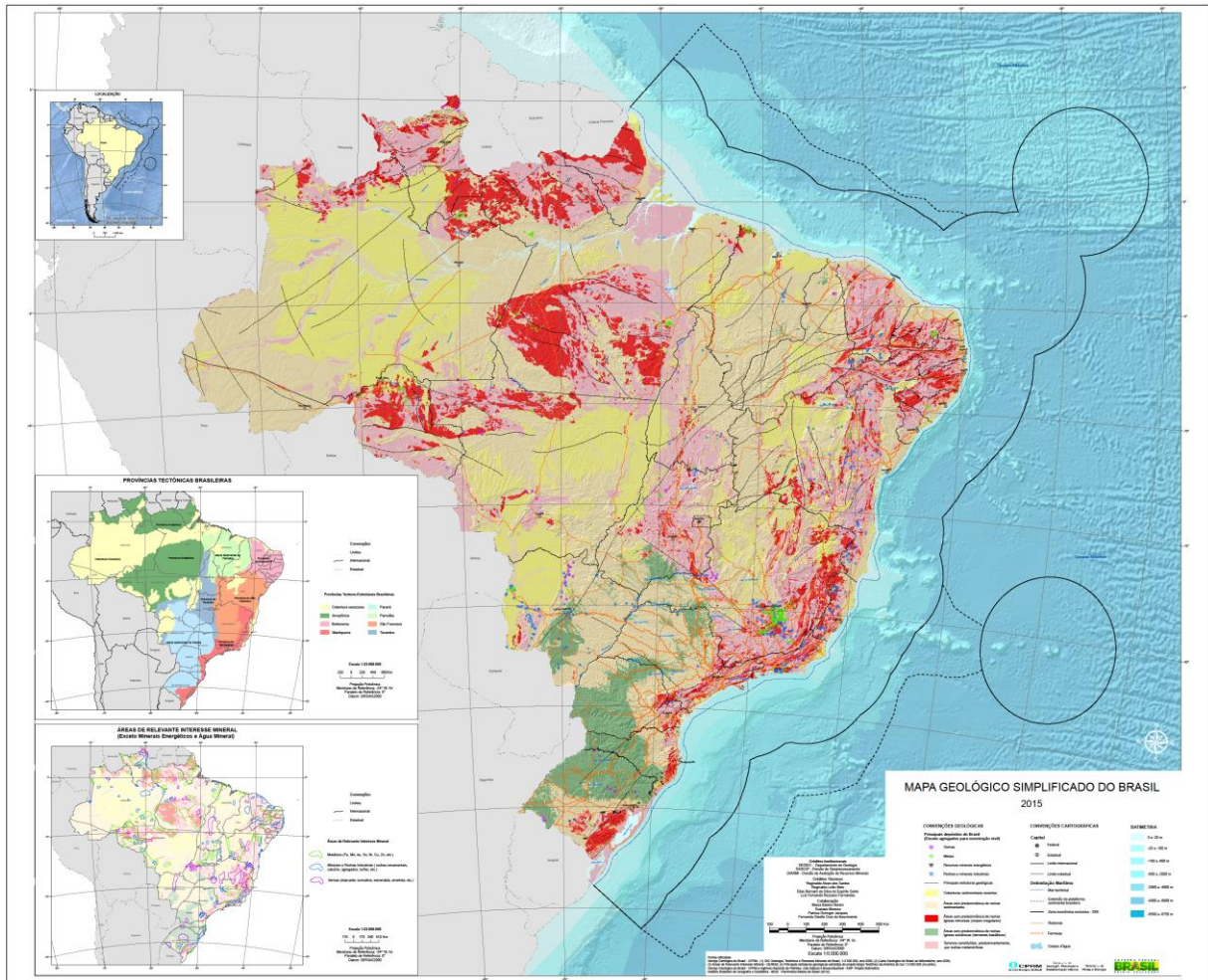


Figura 6 - Mapa Geológico Simplificado do Brasil

Nos aquíferos sedimentares, caso não haja uma barreira, a água se distribui por toda a camada porosa da rocha armazenadora, viabilizando a perfuração de um poço produtivo de forma mais fácil. O contrário ocorre em aquíferos cristalinos, que como pode-se observar na Figura 5, precisam ser perfurados em locais específicos que contenham os lineamentos fissurais, do contrário, por mais que se perfure relativamente perto, o resultado será um poço improdutivo. Por este motivo a geofísica se mostra essencial como estudo prévio em regiões de rochas ígneas e metamórficas, em especial o estudo geolétrico, que sendo realizado em conjunto com outras informações geológicas, como fotos aéreas indicando possíveis lineamentos estruturais na região de estudo, podem gerar perfis de resistividade que indiquem essas fissuras em subsuperfície ou uma ampla região de rocha fraturada, também apta a armazenar água.

A Figura 7a ilustra um modelo convencional de aquífero cristalino: i) camada superficial composta por solo e terrenos soltos; ii) seguida de uma zona saprolítica, podendo conter água, na forma de um lençol freático, que se acumula sobre o topo rochoso relativamente impermeável e; iii) rocha ígnea ou metamórfica com presença de falha ou fratura podendo conter água e/ou argilominerais residuais da passagem de algum fluido. A Figura 7b ilustra a resposta geolétrica através do modelo de resistividade real do terreno. Este é o resultado da inversão dos dados adquiridos em campo, que produz uma seção visando reproduzir a

resistividade real da configuração geológica do meio. Como explicado no item “2.2 Fundamentos do Método Geométrico”, rochas cristalinas geralmente têm altas resistividades quando comparadas com solo de alteração, como normalmente se verifica acima de topos rochosos. Materiais inconsolidados apresentam baixas resistividades devido ao conteúdo de argila e água, neste caso o perfil geométrico indicou valores abaixo de 500 ohm.m, enquanto para a rocha são há valores de até 9.000 ohm.m, exceto na região fissurada onde os valores de resistividade elétrica se assemelham ao dos materiais acima do topo rochoso. É comum nessas interfaces a presença de água, porém pode ser que haja apenas argilominerais. Em ambos os casos a resposta geométrica é bastante semelhante, portanto não se pode afirmar que existe a presença de água.

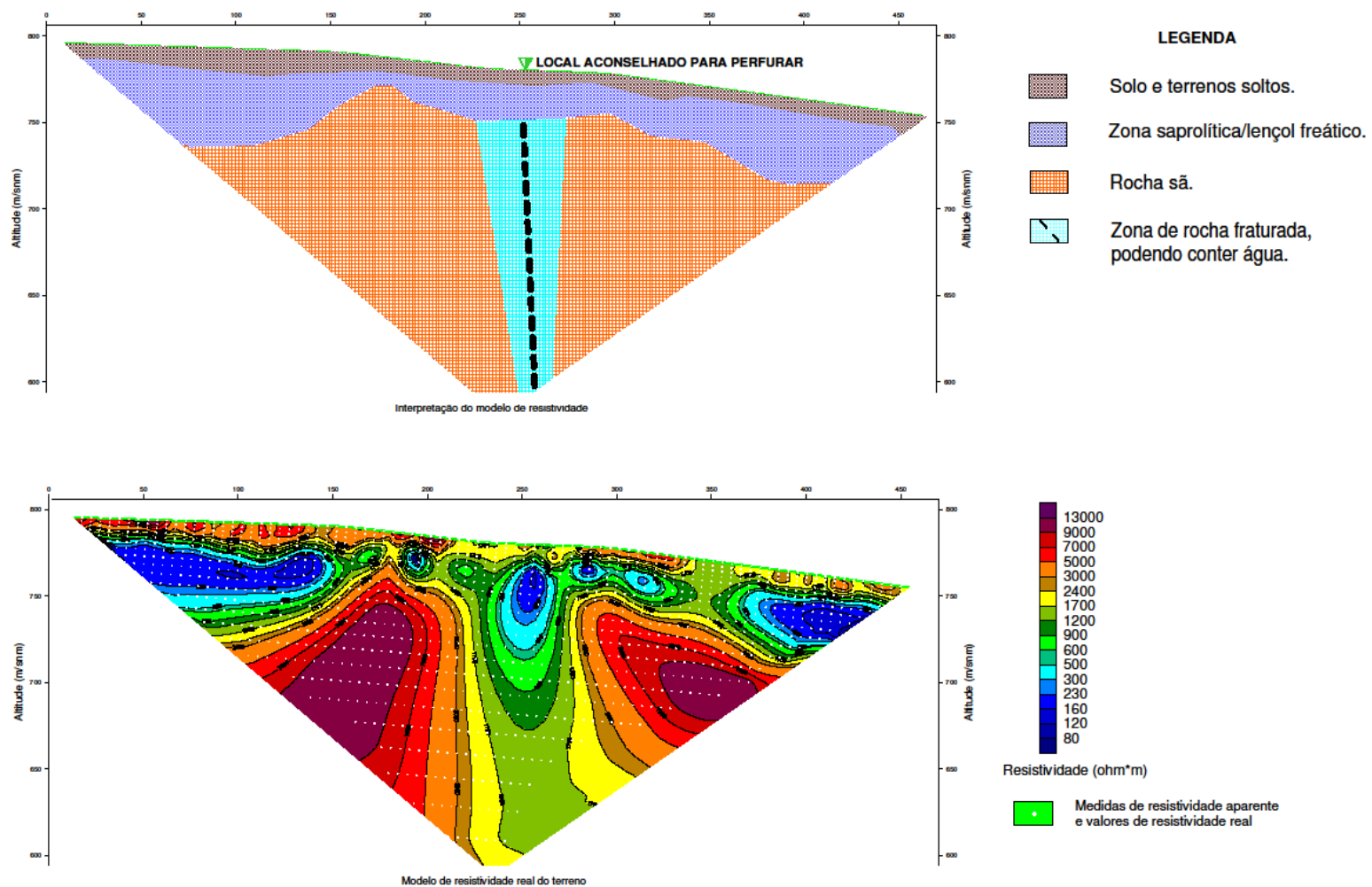


Figura 7 – a) Modelo de aquífero fraturado; b) modelo de resistividade real do terreno.

2.4. Histórico de Aplicações de Métodos Geoelétricos para Aquíferos Cristalinos

Neste Item serão apresentados alguns trabalhos que também utilizam a geoelétrica para localizar poços tubulares ou simplesmente localizar falhas/fraturas. Mas primeiro atenção é dada à terminologia associada ao caminhamento elétrico.

Segundo Gandolfo, O. C. B. (2007) várias terminologias, em periódicos estrangeiros e nacionais, são encontradas para designar o caminhamento elétrico, como: “*lateral profiling*”, “*electrical profiling*”, “*continuous profiling*”, “*electrical mapping*”, “*electrical imaging*”, “*resistivity imaging*”, “*2D (two-dimensional) resistivity imaging*”, “*constant-separation traversing*”, “*electrical resistivity tomography*”, “*electric trenching*” etc. O penúltimo termo citado pode ser traduzido como “tomografia de resistividade elétrica”, nomenclatura esta que é amplamente utilizada no Brasil, mesmo por empresas do setor, porém, ainda de acordo com o autor:

...pode-se observar que o termo “tomografia” em geofísica está relacionado aos ensaios envolvendo, ao menos, um furo de sondagem (“*cross-borehole*” e “*borehole-to-surface*”) e não deve ser utilizado como sinônimo do caminhamento elétrico, uma vez que este tipo de ensaio é exclusivamente realizado na superfície. (GANDOLFO, 2007, p. 18).

Gandolfo, O. C. B. (2007) complementa que o termo “imageamento elétrico” é o resultado da técnica de inversão dos dados brutos obtidos em campo, ou seja, é o produto final quantitativo (porque qualitativo seria a interpretação associada aos dados geológicos e demais informações pertinentes) do levantamento geofísico utilizando o caminhamento elétrico.

Ferreira et al., 2003 realizou um imageamento elétrico no campus da Universidade Federal do Paraná (UFPR) através de 50 m de sedimentos até investigar discontinuidades no embasamento gnáissico-migmatítico. Foram 7.460 m de caminhamento elétrico pelo arranjo dipolo-dipolo com espaçamento entre os dipolos de 40-50 m. Quatro poços foram perfurados baseados na pesquisa geofísica, desses 3 foram produtivos com vazões entre 5 e 9 m³/h.

Xavier F. F., 2004 por caminhamento elétrico (dipolo-dipolo) e SEV (Schlumberger) investigou fissuras em rochas gnáissica-granulíticas no município de Araquari, Santa Catarina. Verificou-se que o poço inicialmente perfurado está fora da zona de fratura na rocha, local este onde um novo poço foi locado, atingindo vazão de aproximadamente 7,6 m³/h, bem maior que o primeiro de 1,2 m³/h.

Gallas J.D.F. et al., 2016 relatou a locação de três poços através do arranjo dipolo-dipolo em áreas de ocorrência de rochas granito-gnáissicas. Dois poços tiveram excelente produção para a região. Na terceira locação, a resposta geofísica levou a interpretações ambíguas: depósito de tálus, possível bom aquífero, ou rochas xistosas, potencial mau aquífero, onde se confirmou a segunda opção.

Lopes R.O. et al., 2004 relatam a sondagem geoelétrica por SEV e caminhamento elétrico realizada na cidade de Rorainópolis, Roraima, visando melhoria do sistema de abastecimento municipal. Geologicamente trata-se de rochas gnáissicas e granodioríticas, onde foram definidos pela geofísica, associada a outras informações geológicas e hidrogeológicas, sete pontos viáveis de se perfurar, dos quais quatro foram perfurados, todos apresentando boas vazões, sendo que um deles obteve a maior vazão de teste obtida em rochas cristalinas no estado de Roraima.

Pereira C.M.A., 2009 visando investigar fissuras definiu alvos através de uma pesquisa regional, por fotos aéreas e sensoriamento remoto, para posteriormente utilizar métodos de detalhe como o eletrorresistivo, de potencial espontâneo e eletromagnético associados a análise

da emanção natural de radônio. O trabalho correlacionou anomalias geelétricas possivelmente correspondentes a zonas de fraturas com altas taxas de emanção natural de radônio.

Gandolfo O. C. B., 2007 realizou um extensivo estudo sobre o estudo do imageamento geelétrico na investigação rasa, comparando os arranjos dipolo-dipolo, polo-dipolo, polo-polo e Wenner, além de uma aquisição 3D através do polo-polo. Para SEV usou o arranjo Schlumberger. Constatou que os arranjos dipolo-dipolo e polo-dipolo permitem um número muito maior de níveis de investigação quando comparado aos outros (superiores a 8), mantendo a qualidade do sinal. Cita ainda a eficácia do que ele chamou de “múltiplos espaçamentos entre eletrodos sobre um mesmo perfil de levantamento”, que se refere à “geometria variável”.

Segundo A. Samouelian et al., 2005 avanços tecnológicos em pesquisas geelétricas têm ocorrido no quesito de tempo de medida. Isso graças ao dispositivo chamado geometria variável realizado automaticamente pelo sistema computacional aplicado à resistímetros modernos, onde o espaçamento entre os polos ou dipolos de corrente/potencial varia de acordo com uma pré-programação que permite, instalando uma série de eletrodos ao longo da linha de pesquisa, que a sequência de aquisição de dados se locomova ao longo desta linha de forma automática. Assim a medida de dados elétricos é inteiramente automatizada e a área de estudo pode ser densamente estudada com uma grande quantidade de dados em curto tempo. É justamente esse sistema de aquisição de dados que foi utilizado para o presente trabalho, que pode ser melhor entendido no Item seguinte.

3. Imageamento Elétrico Multi-eletrodos 2D – Configuração Polo-dipolo à Geometria Variável

Como explicado acima, os métodos de prospecção geolétrica permitem a reconstrução estratigráfica do subsolo utilizando como parâmetro físico a resistividade elétrica aparente das formações que o constituem, resultando em um imageamento elétrico da subsuperfície, conforme a Figura 8.

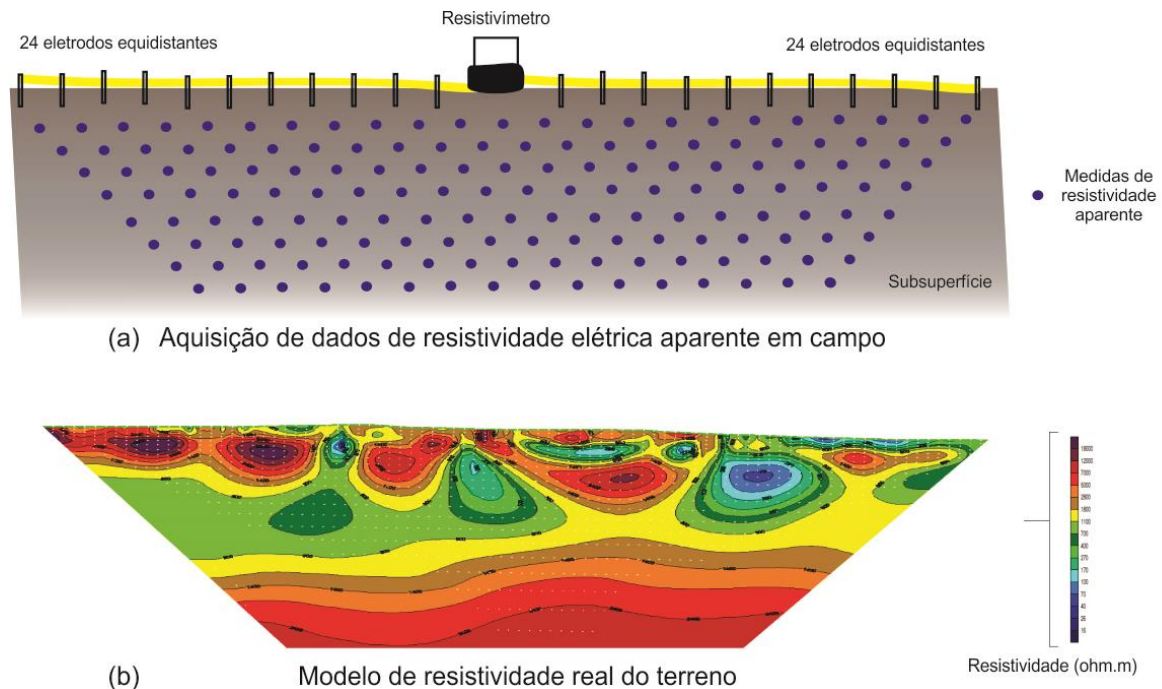


Figura 8 - (a) configuração em campo do imageamento elétrico multi-eletrodos e correspondente (b) modelo de resistividade real do terreno.

O Imageamento Elétrico Multi-eletrodos é realizado medindo os valores do campo elétrico em correspondência com um alinhamento de até 48 eletrodos equidistantes. A interdistância depende do grau de detalhe necessário e da profundidade do terreno a ser estudado. A configuração adotada é o polo-dipolo, onde o campo elétrico é gerado:

- Por um primeiro polo de corrente chamado “A”, colocado ao extremo da linha de medida;
- Por um segundo polo de corrente chamado “B” (que atua em conjunto com o “A”) colocado afastado “ao infinito” (o mais distante possível).

Visando medidas de qualidade, recomenda-se uma distância para o polo B no mínimo igual ao espaçamento entre os eletrodos extremos do levantamento. Então se em um levantamento a passo 10 m com 48 eletrodos, conforme ilustrado na Figura 8, há 470 m entre os eletrodos extremos, portanto o polo B deve ser colocado ao menos esta distância do centro da linha de pesquisa.

Os dipolos de medida de potencial “MN”, distribuídos em duplas de eletrodos em linha, medirão a diferença de potencial induzida, no terreno, pela passagem da corrente entre A e B, mantendo o padrão do fator geométrico K :

$$K = 2\pi n(n + 1)a$$

Equação 3-1

onde a distância entre o polo de corrente A e o dipolo MN é dado por na enquanto o espaçamento M-N considera-se a .

Tal relação para K é obtida utilizando a Equação 2-8 aplicada em um esquema como o da Figura 9, onde o polo B tende ao infinito, teoricamente eliminando a influência desse potencial sobre os polos de medida. Neste caso tem-se que o potencial em “M” e “N” são dados por:

$$V_M = V_A + V_B = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{na} + \frac{1}{\infty} \right)$$

Equação 3-2

e

$$V_N = V_A + V_B = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{na + a} + \frac{1}{\infty} \right)$$

Equação 3-3

Na aquisição o valor medido corresponde à diferença de potencial entre M e N, portanto:

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{na} - \frac{1}{na + a} \right)$$

Equação 3-4

isolando ρ e igualando com a “Equação 2-9 - Definição de resistividade elétrica.”, é obtido a relação para o fator geométrico, conforme a Equação 3-1.

Aumentando o espaçamento entre os eletrodos, dado por a , assim como o espaçamento entre o polo de corrente e o dipolo de medida, dado por na , tem-se o aumento da profundidade investigada. Portanto a profundidade de investigação está ligada a esses dois fatores. Porém, a medida que se aumenta o valor de a , diminui a resolução vertical investigada, sendo preciso analisar um ponto de equilíbrio ideal de acordo com o alvo da pesquisa.

A configuração básica que está indicada na Figura 9 é logo deslocada homogeneamente por todo o comprimento da linha de pesquisa. Esse deslocamento é feito automaticamente pelo resistivímetro (Item “4.1 Resistivímetro EEG AL48”), ao longo dos eletrodos cravados no terreno. Assim as medidas de potencial são realizadas em correspondência de cada dupla de eletrodos MN. Mantendo fixa a posição do polo A, medidas progressivas de dipolos MN, a distâncias cada vez maiores, correspondem a níveis diferentes e mais profundos do terreno. Porém, em determinado momento, com o maior afastamento do dipolo MN em relação ao polo A, a região de potencial medida estará em alta profundidade, onde a densidade de corrente elétrica é baixa, conseqüentemente a diferença de potencial também é pequena, por esse motivo é necessário a “geometria variável” - sistema que aumenta a distância entre os eletrodos de potencial possibilitando medir diferenças de potencial em um intervalo de espaço maior, conseqüentemente obtendo diferenças de potencial maiores e mais confiáveis, mesmo em profundidades relativamente grandes.

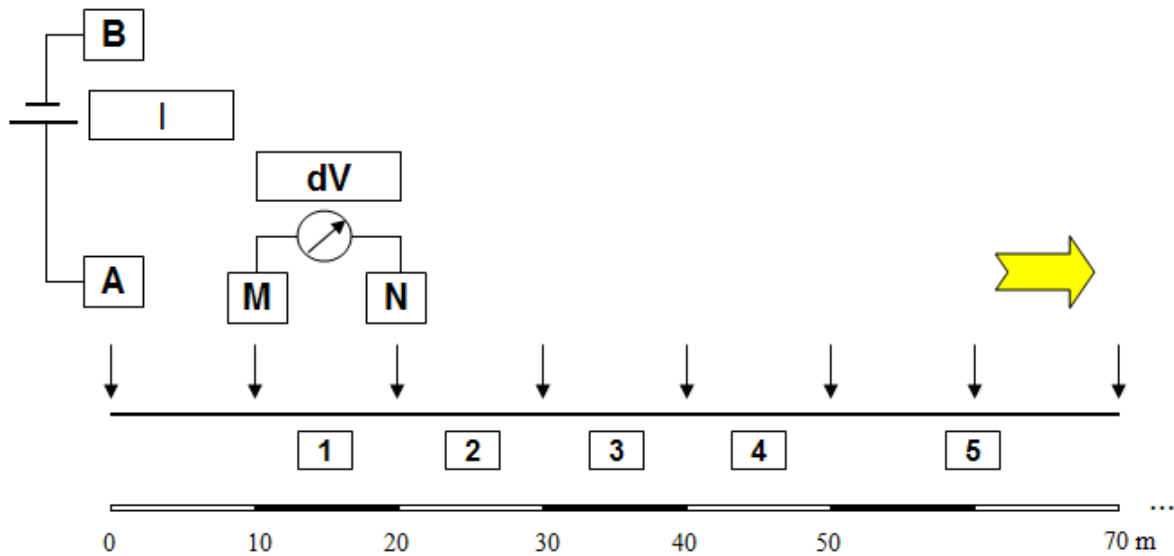


Figura 9 - Esquema de realização de um caminhamento polo-dipolo a passo 10 m.

Esse sistema de geometria variável é pré-programado no resistivímetro utilizado nesta pesquisa (Resistivímetro EEG AL48), conforme a Tabela 1, onde para cada posição de eletrodo de corrente existe certo número de dipolos de potencial a diferentes níveis de investigação (MN-1, MN-2, MN-3, ..., MN-13), totalizando 13 níveis. A medida que o dipolo de potencial se afasta do polo de corrente, os níveis de investigação aumentam, e como explicado, é necessário aumentar, em determinado momento, a distância entre os polos de potencial. Por exemplo, para o polo de corrente A na posição 0 m, polo B afastado por se tratar do arranjo polo-dipolo, sendo o passo da pesquisa 10 m, o primeiro dipolo de medida de potencial correspondente ao primeiro nível de investigação (MN-1) terá seus eletrodos na posição 10 e 20 m; o segundo na posição 20 e 30 m; o terceiro em 30 e 40 m; o quarto em 40 e 50 m; e o quinto em 50 e 70 m. Repare que neste último dipolo o espaçamento entre os eletrodos não é mais de 10 m como nos iniciais, mas sim de 20 m. Isso porque pressupõe-se que a partir dessa profundidade de investigação a diferença de potencial medida por eletrodos de potencial distantes em 10 m é relativamente pequena, gerando um grau de incerteza alto, portanto aumenta-se a distância entre os eletrodos consequentemente medindo maiores diferenças de potencial, que são mais confiáveis. Porém, ao aumentar a distância entre os eletrodos perde-se em número de medidas (que não adiantariam por serem incertas) e resolução vertical, conforme pode-se observar na Figura 10. A diferença de profundidade, para um terreno homogêneo, de um nível de investigação para o anterior ou seguinte, a mesmo espaçamento entre os eletrodos, é a mesma; como, por exemplo, ocorre nos níveis do 1 ao 4. Já no nível 5, onde o espaçamento entre os eletrodos de potencial aumenta, a profundidade investigada está além do que seria medido caso se mantivesse o mesmo espaçamento que os dipolos anteriores.

A grande vantagem da geometria variável, é que ao utilizar múltiplos espaçamentos em uma mesma seção de levantamento geofísico, possibilita estudar bem a porção rasa do terreno (ao iniciar com pequenas distância polo-dipolo), e também a porção profunda (ao aumentar o espaçamento polo-dipolo e entre os polos de medida de potencial).

Segundo Gallas, 2000 uma das vantagens do arranjo polo-dipolo em relação ao dipolo-dipolo é que o potencial de uma fonte polar decresce menos rapidamente do que o de uma fonte dipolar, assim com mais densidade de corrente em uma mesma profundidade, tem-se uma melhora na razão sinal/ruído. Portanto a depender do caso, a perda de resolução vertical no

arranjo dipolo-dipolo pode ser ainda maior do que no polo-dipolo, porque pela maior perda de potencial de acordo com a profundidade, pode ser preciso aumentar o espaçamento entre os eletrodos de potencial em níveis de investigação menores do que o aumento de espaçamento ocorreria no arranjo polo-dipolo. Ou seja, pode ser que no arranjo dipolo-dipolo para conseguir medir uma diferença de potencial confiável, a uma mesma profundidade quando comparado com o arranjo polo-dipolo, seja preciso ampliar o espaçamento entre os eletrodos de potencial já no nível 4, por exemplo, enquanto no polo-dipolo necessita realizar isso apenas no nível 5.

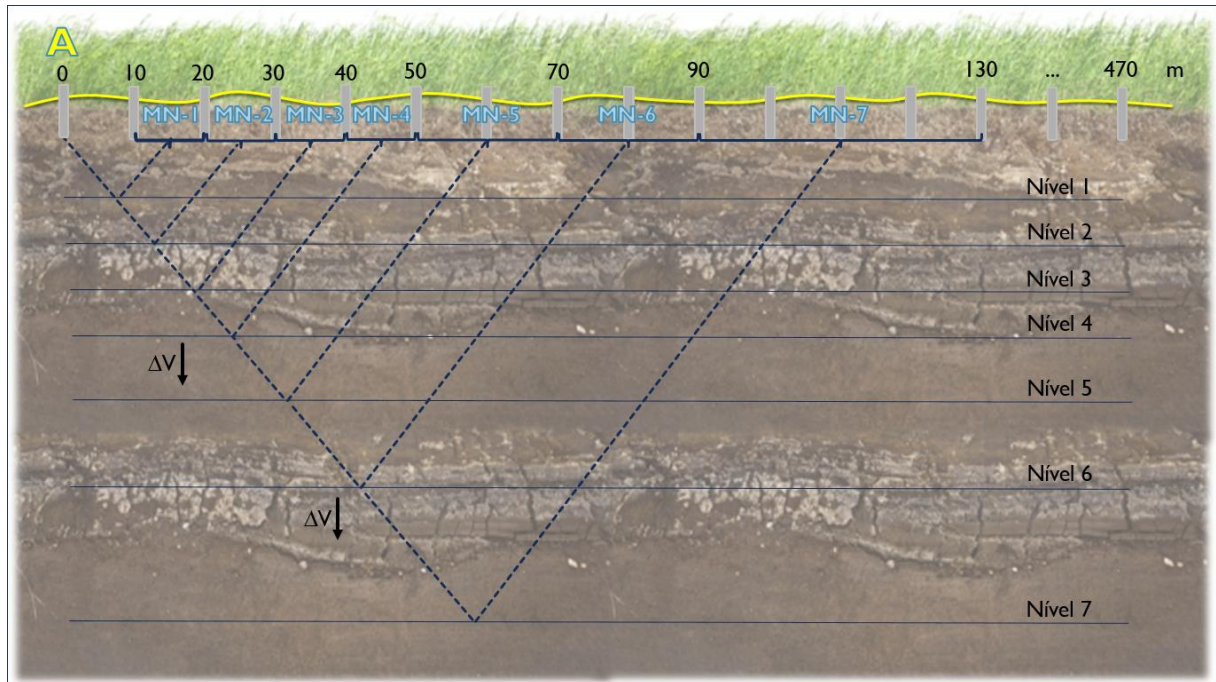


Figura 10 - Esquema de cabo multipolar na superfície conectado a eletrodos espaçados em 10 m, ilustrando o esquema de geometria variável e sua conseqüente perda de resolução vertical (Figura não exatamente correspondente à Tabela 1).

O principal ponto fraco desse arranjo é que a depender da direção de aquisição diferentes pseudo-seções da subsuperfície são obtidas, o que dificulta a interpretação. Isso ocorre porque não há um eixo de simetria entre o polo de corrente e o dipolo de medida. No arranjo dipolo-dipolo há um eixo vertical simétrico em relação ao dipolo de corrente com o de medida, portanto por mais que se varie a corrente elétrica inserida no terreno, ainda assim o potencial medido será o mesmo, independente das heterogeneidades do meio. Visando eliminar este efeito o levantamento pode ser realizado também no sentido oposto.

A Figura 11 ilustra os resultados das pesquisas onde os dois perfis à direita são o resultado de interpolação dos dados experimentais obtidos em campo, chamados de dados de resistividade aparente medidos; como dito, para eliminar o efeito da assimetria do arranjo polo-dipolo eles são realizados nos dois sentidos, denominados dipolos diretos e inversos. As cruzes brancas correspondem a esses dados, não havendo uniformidade na malha de dados justamente porque alguns deles não foram obtidos, por falta de eletrodo em determinado ponto, ou mais provavelmente porque já foram eliminados por se tratarem de dados ruidosos. Os pontos medidos em subsuperfície correspondem a 13 níveis de investigação, logarithmicamente crescentes, como suavemente pode-se observar na mesma figura.

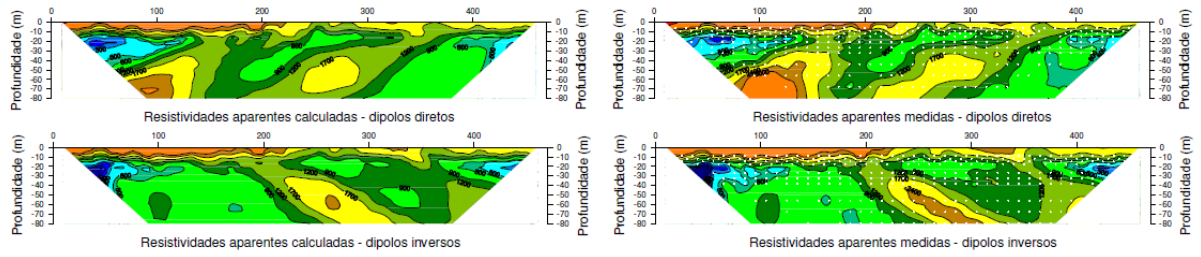


Figura 11 - Resistividades aparentes medidas e calculadas no sentido direto e inverso.

Tabela 1 - Posição dos eletrodos de corrente e correspondentes eletrodos de potencial através da geometria variável em uma pesquisa a passo 10 m.

Corrente (m)		Passo (m)	Potencial (m)																											
A	B		10	MN-1		MN-2		MN-3		MN-4		MN-5		MN-6		MN-7		MN-8		MN-9		MN-10		MN-11		MN-12		MN-13		
0	afastado	10	10	20	20	30	30	40	40	50	50	70	70	90	90	110	110	150	150	190	190	230	230	310	310	390	390	470		
10	afastado	10	20	30	30	40	40	50	50	60	60	80	80	100	100	120	120	160	160	200	200	240	240	320	320	400	-	-		
20	afastado	10	30	40	40	50	50	60	60	70	70	90	90	110	110	130	130	170	170	210	210	250	250	330	330	410	-	-		
30	afastado	10	40	50	50	60	60	70	70	80	80	100	100	120	120	140	140	180	180	220	220	260	260	340	340	420	-	-		
40	afastado	10	50	60	60	70	70	80	80	90	90	110	110	130	130	150	150	190	190	230	230	270	270	350	350	430	-	-		
50	afastado	10	60	70	70	80	80	90	90	100	100	120	120	140	140	160	160	200	200	240	240	280	280	360	-	-	-	-		
60	afastado	10	70	80	80	90	90	100	100	110	110	130	130	150	150	170	170	210	210	250	250	290	290	370	-	-	-	-		
70	afastado	10	80	90	90	100	100	110	110	120	120	140	140	160	160	180	180	220	220	260	260	300	300	380	-	-	-	-		
80	afastado	10	90	100	100	110	110	120	120	130	130	150	150	170	170	190	190	230	230	270	270	310	310	390	-	-	-	-		
90	afastado	10	100	110	110	120	120	130	130	140	140	160	160	180	180	200	200	240	240	280	280	320	-	-	-	-	-	-		
100	afastado	10	110	120	120	130	130	140	140	150	150	170	170	190	190	210	210	250	250	290	290	330	-	-	-	-	-	-		
.	
.		
.		
390	afastado	10	380	370	370	360	360	350	350	340	340	320	320	300	300	280	280	240	240	200	200	160	160	80	80	0	-	-		
400	afastado	10	390	380	380	370	370	360	360	350	350	330	330	310	310	290	290	250	250	210	210	170	170	90	90	10	-	-		
410	afastado	10	400	390	390	380	380	370	370	360	360	340	340	320	320	300	300	260	260	220	220	180	180	100	100	20	-	-		
420	afastado	10	410	400	400	390	390	380	380	370	370	350	350	330	330	310	310	270	270	230	230	190	190	110	110	30	-	-		
430	afastado	10	420	410	410	400	400	390	390	380	380	360	360	340	340	320	320	280	280	240	240	200	200	120	120	40	-			
440	afastado	10	430	420	420	410	410	400	400	390	390	370	370	350	350	330	330	290	290	250	250	210	210	130	130	50	-	-		
450	afastado	10	440	430	430	420	420	410	410	400	400	380	380	360	360	340	340	300	300	260	260	220	220	140	140	60	-	-		
460	afastado	10	450	440	440	430	430	420	420	410	410	390	390	370	370	350	350	310	310	270	270	230	230	150	150	70	-	-		
470	afastado	10	460	450	450	440	440	430	430	420	420	400	400	380	380	360	360	320	320	280	280	240	240	160	160	80	80	0		

4. Aquisição e Tratamento dos Dados

Para o sucesso de uma pesquisa geoeletrica visando localizar poço tubular o pré-planejamento é essencial, sendo na grande maioria das vezes decisivo. Como exposto o objetivo é identificar em subsuperfície as fendas na rocha maciça, porém como explanado no Item “Método Geoeletrico para Investigação de Aquíferos Cristalinos” anomalias que podem corresponder as falhas/fraturas também podem ser geradas por outros artefatos que não constituem aquíferos. Então cabe ao pré-planejamento restringir as chances de erro, procurando outros indícios de lineamentos estruturais. Existem várias ferramentas e métodos que colaboram, como: i) imagens de satélite, que permitem visualizar como um todo a região de pesquisa, incluindo mudança na vegetação, que relaciona-se com mudança superficial na geologia podendo determinar ao longo de uma mudança drástica de vegetação um lineamento estrutural; ii) perfis topográficos, perfis geoeletricos são preferencialmente realizados cruzando vales já que normalmente correspondem a lineamentos estruturais; iii) hidrografia, é comum falhas/fraturas cruzando rios, portanto é bem provável que elas estejam preenchidas por água doce, diante disso realizar perfis paralelos aos rios é uma alternativa interessante; iv) mapas estruturais, através dos quais pode-se conhecer os mais proeminentes lineamentos estruturais da região deixando para a geofísica a missão de apenas confirmar sua presença de forma mais detalhada. Portanto esperar muito da geofísica por si só muito provavelmente resultará em insucesso.

É bastante comum indústrias, condomínios e mais geralmente pessoas físicas recorrerem à geofísica apenas depois de já terem perfurado um poço seco ou que não atenda a demanda de água por ter sido perfurado em um local que não corresponde a todo o potencial da região. Recorrer a geofísica também não garante perfurar um poço com sucesso ou com a maior vazão possível da região. Porém aumenta as chances de isso ocorrer enormemente, ainda mais em região de rocha cristalina, onde fatores como intercessão das fendas ou maior área fraturada aumentam gradativamente as possibilidades de haver água e em maior vazão do que quando comparado com regiões de fendas isoladas e/ou pequena área fraturada, havendo consequentemente pouco espaço para o acúmulo de água.

É também comum o uso de outras ferramentas com menor custo antes de usar a geofísica, como a radiestesia: “O problema é que a ciência até hoje não conseguiu comprovar se essa técnica realmente funciona. Mesmo assim, quem bota fé no método acha que as pessoas podem aperfeiçoar sua sensibilidade natural a ponto de fazerem descobertas cada vez mais precisas. Seria possível, por exemplo, estabelecer a profundidade do lençol freático a partir do número de vezes que a forquilha se mexe. Os cétricos duvidam... já fizemos vários experimentos e a forquilha nunca deu resultado”, diz o engenheiro Daniel Sottomaior, da USP. Também vale lembrar que, até agora, ninguém conseguiu medir o campo magnético que emana da água em movimento, nem demonstrar que a sensibilidade humana para essa radiação realmente existe.” (Revista Mundo Estranho, 2015). Portanto, aplicar estudo geofísico prévio à perfuração deve sempre ser levado em consideração a benefício de vários fatores, como: i) econômico, na região sudeste e sul, normalmente o valor de perfuração do poço é bem maior que o custo da pesquisa geofísica, sendo bastante compensativo um pequeno investimento a mais para aplicar conscientemente uma quantia muito maior na perfuração; ii) meio ambiente, perfurações com pesquisa prévia em regiões próximas ao litoral podem evitar o avanço da cunha salina assim como prever a perfuração em um local de água salgada, inviabilizando o novo poço; iii) técnico, maiores vazões podem ser obtidas ao compreender a intercessão de fendas e/ou amplas áreas de rocha fraturada; iv) organizacional, antes de elaborar a planta de um condomínio ou indústria é melhor definir pontos de perfuração através da geofísica, para que não venha a ocorrer, como geralmente vislumbra-se, dos pontos viáveis para perfurar estarem abaixo de um lote a venda

ou até vendido, ou de ser necessário gastar demasiadamente com tubulações para distribuir a água pelo condomínio ou locais específicos da indústria.

4.1. Resistímetro EEG AL48

A obtenção dos dados foi realizada pelo resistímetro EEG AL48, com um energizador interno de 300 W e capaz de prover uma tensão elétrica de até 700 V aos cabos de medida, com capacidade de adquirir até 48 canais simultaneamente e de comandar automaticamente a inversão da corrente (Figura 12). Nesta configuração, o resistímetro comanda, de forma síncrona, o gerador interno, com geração de ondas quadradas.

As linhas geelétricas foram realizadas com o seguinte equipamento:

- Um Resistímetro EEG AL48;
- 48 elétrodos de alumínio, para os contatos com o terreno;
- 48 garras modelo jacaré conectando os elétrodos ao cabo multipolar;
- 2 cabos elétricos multipolares de tipo 25x24 AWG, cada um com 24 polos a passo 10,00 m, para o levantamento de perfis unitários de até 470 m de comprimento (47 x 10,00 m);
- 700 m de cabo unipolar de bitola adequada (2,5 mm²) para conectar o “Polo B” colocado “ao infinito”, ou seja, a uma distância relativamente grande da linha de medição.

Nesta configuração, o resistímetro EEG AL48 realiza, em sequência, as medidas de potencial (dV) e de emissão de corrente (I).



Figura 12 - Resistivímetro EEG AL48, cabos multipolares e eletrodo.

4.2. Metodologia de Aquisição

A pesquisa de campo precisa ser minuciosamente planejada tanto para o melhor aproveitamento dos dados a serem adquiridos quanto para evitar atrasos no calendário dos projetos o que pode causar inclusive prejuízos financeiros, já que para uma pesquisa para água, considerada de baixo porte, um dia a mais de campo pode representar o prejuízo da pesquisa. Há vários fatores a serem considerados, sendo os mais relevantes: i) conferir se todos os equipamentos estão sendo levados, já que em uma região isolada de difícil acesso, a falta de um cabo de energização

do resistivímetro, bateria ou mesmo um eletrodo pode impedir ou, como no último caso, prejudicar a aquisição dos dados; ii) viabilidade de extensão dos cabos ao longo da linha de pesquisa, já que normalmente as linhas para imageamento elétrico multi-eletrodos precisam de grandes comprimentos, o que nem sempre é fácil obter hoje em dia, porque nas cidades há cada vez novas edificações, e em áreas afastadas dos centros urbanos há os obstáculos de vegetação densa e alta, vales, rios, lagos, mangues, regiões íngremes, entre outros; iii) necessidade ou não de abertura de picadas, caso o único impedimento seja a vegetação densa e/ou alta é preciso verificar se não se trata de reserva ambiental, em caso negativo, verificar a natureza da vegetação para estimar o tempo e equipamento necessário para abrir caminho para os cabos serem estendidos; iv) previsão do tempo, porque chuvas intensas podem vir acompanhadas por descargas elétricas, nesse caso é altamente perigoso efetuar a pesquisa durante esse período, tanto para os operadores quanto para o equipamento. Isso porque caso todo o sistema esteja conectado (eletrodos, cabos multipolares e resistivímetro), a descarga elétrica pode queimar o equipamento, ou ainda, no caso do operador estar em contato com o eletrodo no momento que o raio ocorrer então a corrente transmitida ao terreno pode ser passada ao operador electrocutando-o. Preferencialmente é recomendado que haja uma pessoa conhecedora da região, ainda melhor se nasceu nos arredores.

As etapas para a preparação do equipamento em campo envolvem distribuir os cabos multipolares em linha reta, conforme pré-planejado; e cravar os eletrodos em cada conector, totalizando 48 eletrodos, equidistantes de acordo com o passo da pesquisa. Os 48 eletrodos utilizados são enterrados em furos previamente realizados e preenchidos por água com sal para diminuir a resistência elétrica de contato e facilitar ainda mais a passagem de corrente no terreno. Essa providência, mesmo prejudicando a produtividade diária, permite obter medidas de melhor qualidade, quando comparadas a não realização desses procedimentos. Por se tratar de um arranjo polo-dipolo o polo B precisa estar distante, de preferência perpendicularmente, da linha de pesquisa, por isso é necessário estender um cabo perpendicularmente à linha de pesquisa até o ponto designado para o polo B, onde outro eletrodo será cravado.

Alguns fatores beneficiam a profundidade de investigação, como:

1. Maior passo, quanto maior o espaçamento entre os eletrodos maior será a profundidade teórica investigada, de acordo com a relação “*prof. real = 16 x passo*” para a profundidade real e “*prof. apar. = 8 x passo*” para profundidade aparente, isso porque a profundidade de penetração de corrente aumenta com o aumento da separação dos eletrodos;
2. Eletrodo(s) do polo B bem conectado(s), diminuem a resistência elétrica terreno/eletrodo beneficiando a passagem de corrente, o que aumenta a penetração da corrente em subsuperfície e sua razão sinal/ruído, diminuindo as chances de eliminar dados em profundidade;
3. Camada superficial resistiva em relação à camada inferior, já que assim a corrente elétrica é atraída para profundidades maiores, enquanto que na situação oposta é difícil para a corrente elétrica aprofundar.

4.3. Tratamento dos Dados

O software utilizado para processamento dos dados foi o RES2DINV que permitiu:

- Eliminar medidas ruidosas manualmente e automaticamente;
- Inverter por mínimos quadrados os dados adquiridos gerando um imageamento elétrico da subsuperfície pesquisada e;

- Inserir dados topográficos.

Tratando-se de uma morfologia irregular, a topografia aproximada foi utilizada para as correções topográficas das linhas, lembrando que uma topografia aproximada aumenta os erros quando comparada ao fato de termos uma topografia mais apurada, porém tratando-se de uma morfologia regular, como ocorre com todos os casos neste trabalho analisados, esse fator não é relevante.

O resistivímetro comanda a aquisição em ambos os sentidos da linha de pesquisa, para eliminar o efeito da assimetria. Quando há um dado ruidoso na medida inversa, e um no mesmo ponto com boa qualidade na medida direta, então o RES2DINV permite que manualmente aquele dado seja eliminado, se assim não for, o dado de qualidade por ser compatível com os demais dados ao redor tem erro reduzido, já o dado ruidoso não, por isso, após a inversão, utilizando a função de corte estatístico este dado é eliminado.

5. Localização e Contexto Geológico das Regiões de Estudo

Tanto em Corumbaíba (Caso 1) quanto em Moita Bonita (Caso 2), Aparecida de Goiânia (Caso 3) e Senador Canedo (Caso 4) o que se espera é que os perfis geoeletricos cruzem possíveis falhas ou fraturas conforme o modelo na Figura 5, aumentando as chances de perfuração de poços produtivos.

A Figura 13 indica de forma aproximada os locais das pesquisas, sendo que as figuras que ilustram a disposição das linhas de pesquisa mostram em detalhe os locais pesquisados assim como as coordenadas do início e fim das linhas de pesquisa avaliadas neste trabalho.

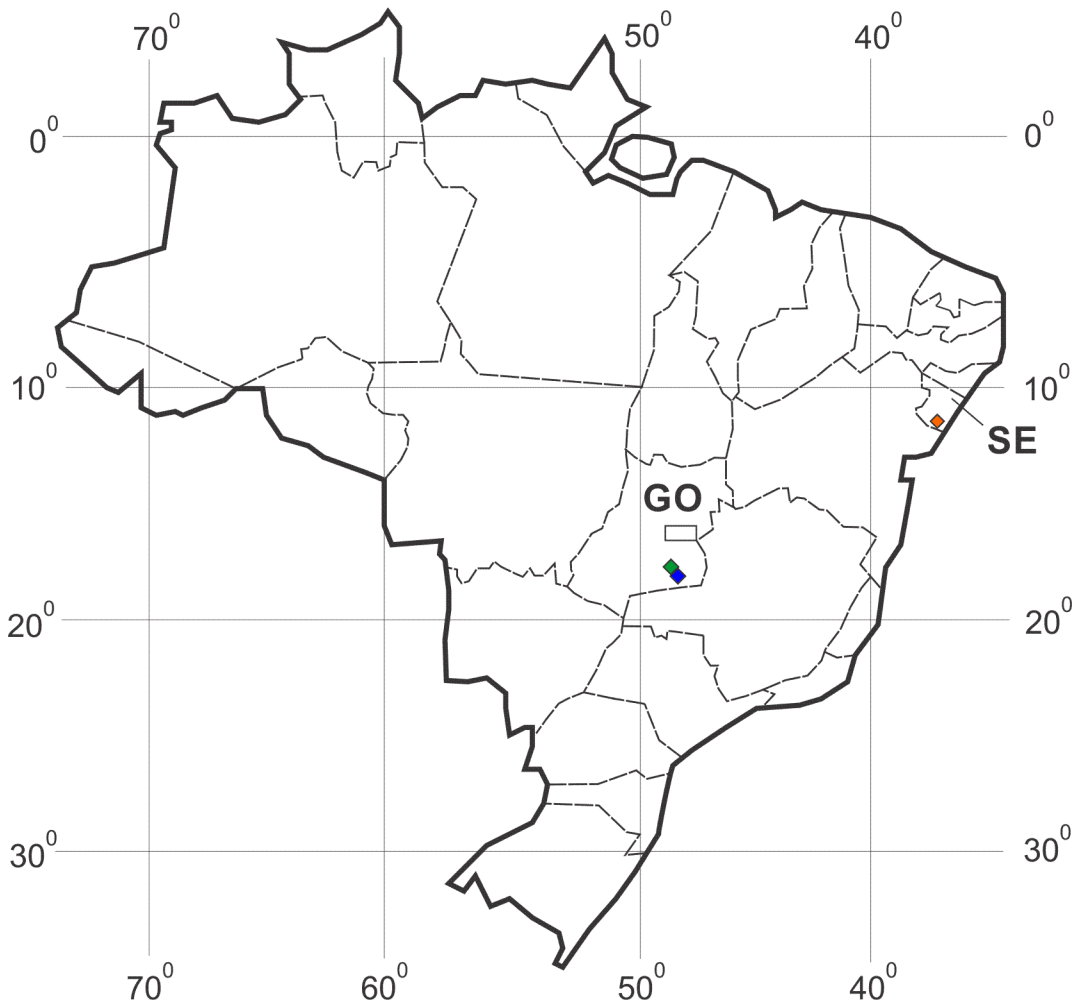


Figura 13 - Locais onde foram realizadas as pesquisas geofísicas. Símbolo em azul: indústria de laticínios em Corumbáiba, Goiás; símbolo em laranja: fazenda em Moita Bonita, Sergipe; e símbolo em verde: cidade de Aparecida de Goiânia e Senador Canedo, Goiás.

Trata-se de quatro casos estudados, todos em ambiente de rocha cristalina, onde duas ou mais linhas de pesquisa, dispostas perpendicularmente, foram efetuadas, com comprimento variando de 235 até 470 m de comprimento cada, com respectiva profundidade real variando de 80 a 160 m, a depender do espaçamento entre os eletrodos.

O Caso 1 refere-se à indústria de laticínios da empresa Italc com unidade em Corumbáiba, Goiás, sobre o Grupo Araxá, com predominância de rochas metassedimentares. O Caso 2 estuda uma fazenda no início do agreste sergipano, em Moita Bonita, assentada sobre a Formação Itabaiana – Simão Dias, composta por domos gnáissicos-migmatíticos. O Caso 3 visou solucionar o abastecimento de água em uma escola, em Aparecida de Goiânia, Goiás, enquanto o Caso 4 foi em um condomínio, ambos também sobre o Grupo Araxá, com predomínio de rochas metamórficas.

5.1. Caso 1 – Indústria de Laticínios em Corumbáiba, Goiás

O primeiro caso trata-se da necessidade da unidade da indústria de laticínios Italc em Corumbáiba, Goiás, de obter mais água para os processos industriais, dentre eles a limpeza de reservatórios, que consome uma elevada quantia de água. Por isso, no dia 05 de fevereiro de 2015, duas linhas de pesquisa geoeletrica foram analisadas em Corumbáiba, Goiás, na área da

indústria de laticínios Italac, localizada na Rodovia GO-139, s/n, Setor Industrial, conforme o mapa na Figura 14. As coordenadas do primeiro e último eletrodo (n° 48) da linha 1 e 2, de acordo com o Datum WGS 84, estão na Tabela 2. Ambas as linhas têm 235 m de comprimento, por ter sido usado o passo de 5 m.

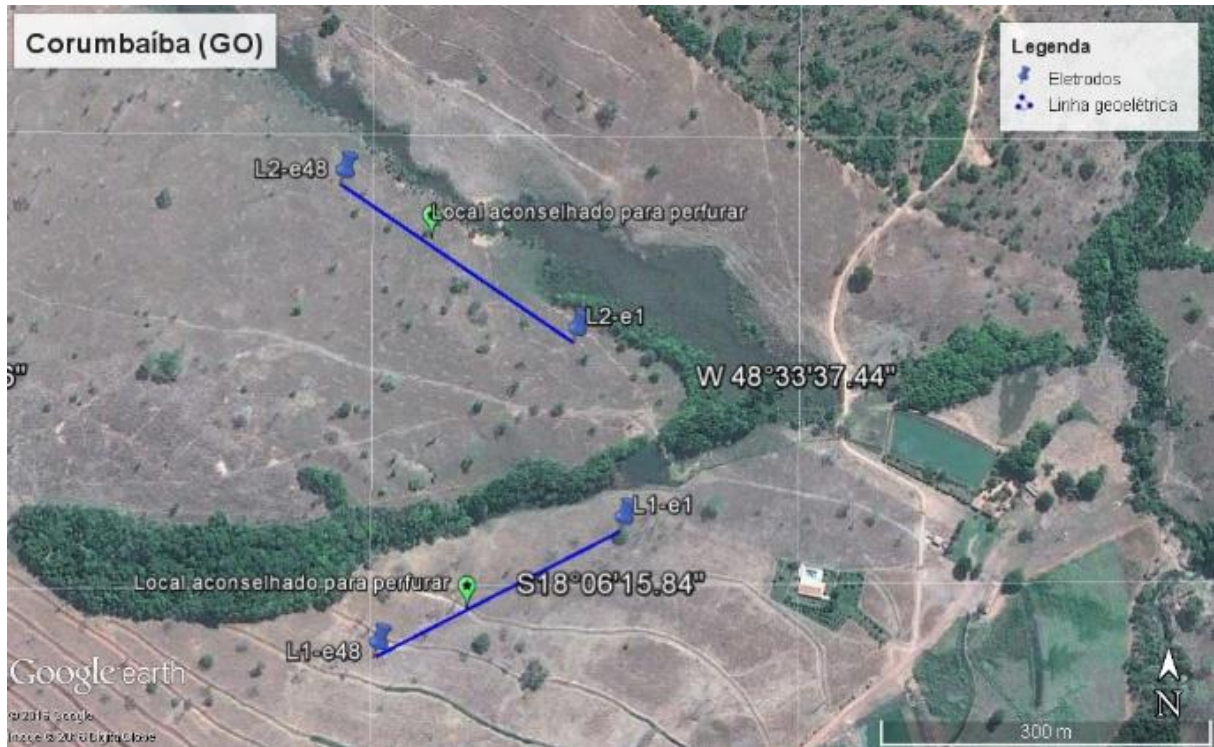


Figura 14 - Disposição das linhas geoeletricas 1 e 2 na indústria de laticínios em Corumbáiba (GO).

Tabela 2 - Características das linhas geoeletricas. L1 – e1: eletrodo 1 da linha 1; L1 – e48: eletrodo final da linha 1; L2 – e1: eletrodo 1 da linha 2; e L2 – e48: eletrodo final da linha 2..

Linha	Coordenadas (Datum WGS 84)		Passo (m)	Comprimento (m)	Orientação aproximada das linhas
	Latitude	Longitude			
L1-e1 Início	18° 6'14.36" S	48°33'42.92" O	5,0	235	NE - SO
L1-e48 Fim	18°6'17.90" S	48°33'50.35" O			
L2-e1 Início	18°6'8.88" S	48°33'44.35" O	5,0	235	SE - NO
L2-e48 Fim	18°6'4.32" S	48°33'51.42" O			

A área de estudo se encontra no Grupo Araxá, constituído por uma sequência de metassedimentos e corpos graníticos associados. Segundo Queiroz, C. L. 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° , 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.

5.2. Caso 2 – Fazenda em Moita Bonita, Sergipe

O segundo caso é em uma fazenda no início do sertão sergipano, na cidade chamada Moita Bonita, onde um poço já havia sido perfurado, porém sem sucesso. Então em 07 de janeiro de 2016, também duas linhas foram obtidas. As coordenadas de ambas as linhas estão na Tabela 3. 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.

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 Figura 15, sendo a linha 2 perpendicular àquela, 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, ambos dentro da província tectono-estrutural Borborema.

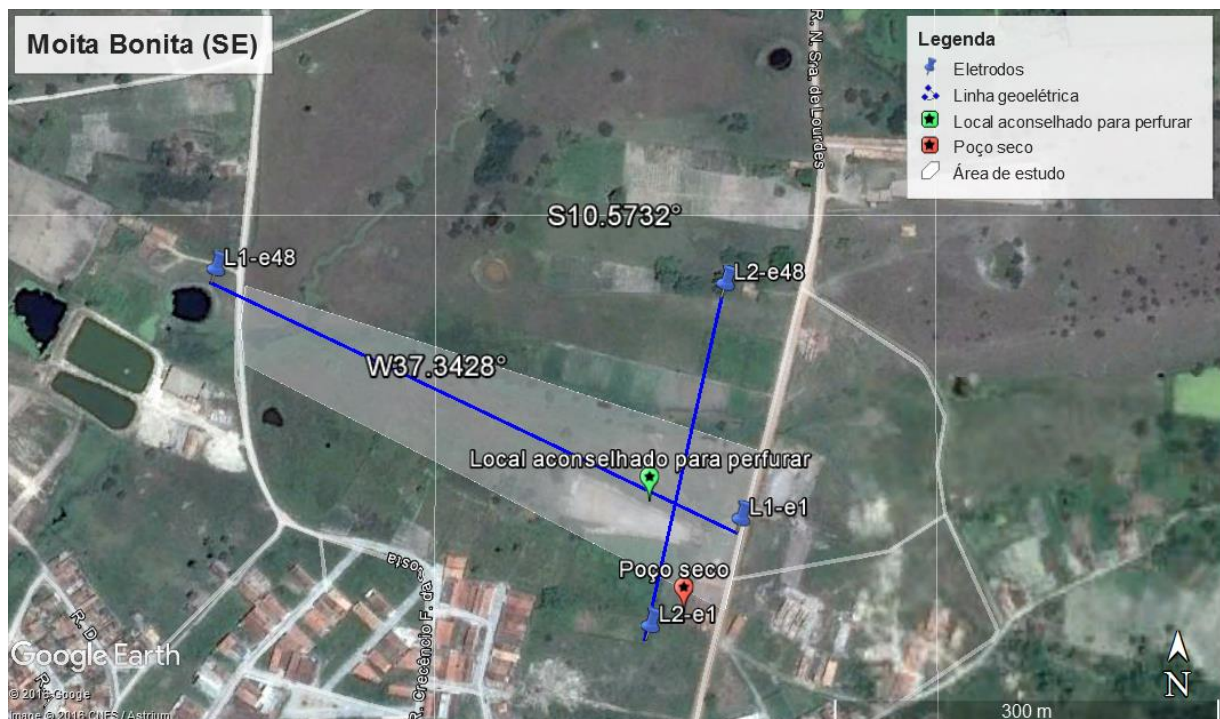


Figura 15 - Disposição das linhas geoeétricas 1 e 2 na propriedade em Moita Bonita (SE).

Tabela 3 - Características das linhas geoeletricas. L1 – e1: eletrodo 1 da linha 1; L1 – e48: eletrodo final da linha 1; L2 – e1: eletrodo 1 da linha 2; e L2 – e48: eletrodo final da linha 2..

Linha	Coordenadas (Datum WGS 84)		Passo (m)	Comprimento (m)	Orientação aproximada das linhas
	Latitude	Longitude			
L1-e1 Início	10°34'31.63"S	37°20'26.29"O	10,0	470	ESE - ONO
L1-e48 Fim	10°34'25.27"S	37°20'39.95"O			
L2-e1 Início	10°34'34.34"S	37°20'28.64"O	6,0	282	S - N
L2-e48 Fim	10°34'25.64"S	37°20'26.68"O			

5.3. Caso 3 – Escola Dom Fernando em Aparecida de Goiânia, Goiás

No dia 09 de maio de 2016, duas linhas de pesquisa geoeletrica foram adquiridas dentro e nos arredores do terreno da Escola Dom Fernando em Aparecida de Goiânia, Goiás, localizada na Rua Tesourinha, s/n°, no Jardim Riviera, conforme a Figura 16. As coordenadas do início e fim das linhas estão na Tabela 4. Há evidências que o topo rochoso está em torno de 21 a 24 m de profundidade, portanto o passo escolhido foi 5 m, totalizando, a depender da geologia local, cerca de 80 m de profundidade de investigação e 235 m de comprimento de cada linha, sendo que não é investigado a profundidade de 80 m ao longo de todo o perfil, mas apenas na parte central, conforme um trapézio invertido, como pode-se observar na Figura 19 até a Figura 28.

Segundo Lacerda Filho et al., 1999 a geologia no município de Aparecida de Goiânia é composta totalmente por um conjunto de rochas metamórficas, que compõem o Grupo Araxá. Para ser mais específico, Marini, 1981; Fuck et al., 1993 e 2000; e Pimentel, 1992 e 1995 dizem que o Grupo Araxá é caracterizado por xistos e quartzitos. Xistos são rochas ricas em micas, dentre elas biotita, clorita e muscovita, tendo na sua composição predominantemente quartzo e granada, sendo mais rara a presença de feldspatos e turmalina. Já os quartzitos são rochas ricas em quartzo e podem conter diferentes proporções de variações de micas. A orientação dos minerais micáceos determina a foliação das rochas xistosas e quartzíticas.

A Figura 17 - Mapa Geológico de Aparecida de Goiânia, mostra as três grandes unidades presentes: micaxisto (marrom), quartzito (amarelo) e quartzo xisto (verde), sendo que a escola estudada assim como o Caso 4 se encontram na primeira unidade, micaxisto.



Figura 16 - Disposição das linhas geolétricas 1 e 2 na escola Dom Fernando em Aparecida de Goiânia (GO).

Tabela 4 - Características das linhas geolétricas. L1 – e1: eletrodo 1 da linha 1; L1 – e48: eletrodo final da linha 1; L2 – e1: eletrodo 1 da linha 2; e L2 – e48: eletrodo final da linha 2.

Linha	Coordenadas (Datum WGS 84)		Passo (m)	Comprimento (m)	Orientação aproximada das linhas
	Latitude	Longitude			
L1-e1 Início	16°49'25.49"S	49°17'50.88"O	5,0	235	NNE - SSO
L1-e48 Fim	16°49'32.96"S	49°17'52.39"O			
L2-e1 Início	16°49'31.15"S	49°17'48.67"O	5,0	235	ESE - ONO
L2-e48 Fim	16°49'29.51"S	49°17'56.11"O			

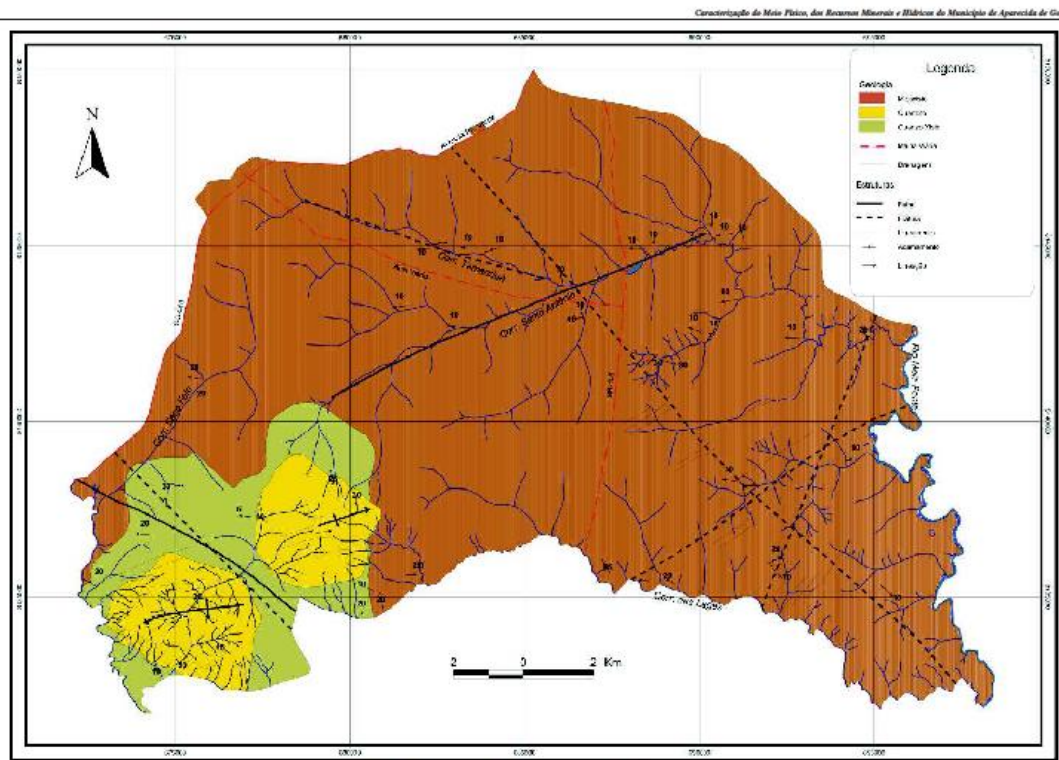


Figura 17 - Mapa Geológico de Aparecida de Goiânia.

A área está dentro da província tectono-estrutural brasileira do Tocantins, porém, devido as limitações impostas pela área urbana não há mobilidade para escolher qual a melhor direção de aplicação dos perfis, sendo a única opção possível na região a que foi aplicada, ainda graças a algumas implementações. A linha 1 atravessa o asfalto e adentra a casa de um morador, na sua parte final. Portanto houve colaboração do morador que permitiu que cerca de dois eletrodos fossem cravados dentro da área externa no terreno de sua casa. Como foi mencionado no Item 3, um fator determinante da profundidade investigada é a distância entre o eletrodo de corrente e os de medida do potencial, então se caso eletrodos ao final ou início do perfil não são colocados isso diminuiu a cobertura de dados obtida em profundidade, tornando a base do trapézio da pseudo-seção geoeletrica mais afunilada. Então estender o cabo ao longo dos 235 m cravando todos os eletrodos possíveis é importante para ao melhor aproveitamento da pesquisa adquirindo todos os dados possíveis. Interessante citar que foi possível cravar o segundo eletrodo da linha 2, por mais que fosse acima do asfalto, isso porque havia um profundo buraco logo no local do segundo eletrodo, permitindo que o eletrodo fosse fixado e a corrente elétrica pudesse passar para o terreno. Ainda considerando a linha 2, pelo fato dela ter que atravessar o muro e para não ser necessário quebrá-lo, foi utilizado um cabo multipolar passo 10 m para que, cravando os eletrodos de 5 em 5 m pudesse ainda sobrar cabo para transpor o muro de cerca de 2,5 m de altura.

Conforme citado no Item 5.1, os principais lineamentos estruturais nesta região são na direção noroeste-sudeste, então, como dito, devido às limitações urbanas as linhas de pesquisa não puderam ser traçadas de uma forma que cruzassem ao menos perto de um ângulo de 90°

tais possíveis lineamentos. De qualquer forma, ambas contêm certo ângulo possível de identificar lineamentos nesta região, além do que, por mais que predominantemente os lineamentos sejam noroeste-sudeste, não está eliminada a possibilidade de haver falhas, fraturas, etc. em outras direções, inclusive favoráveis às linhas de pesquisa traçada.

5.4. Caso 4 – Condomínio Mansões Morumbi em Senador Canedo, Goiás

Nos dias 03, 04 e 05 de março de 2016, foi realizado um levantamento geofísico através da técnica geolétrica de Imageamento Elétrico Multi-eletrodos 2D no Condomínio Mansões Morumbi em Senador Canedo - GO no local conforme indicado na Figura 18, com a finalidade de local um poço tubular (ou mais) através da compreensão da situação geológica em detalhe sob o subsolo do alvo. Objetivava-se determinar o local e a profundidade de perfuração do futuro poço tubular, individualizando os pontos mais favoráveis à elevada vazão de água, relacionados com pontos de fraqueza do substrato rochoso (a citar: falhas e fraturas), de forma a local um poço que viesse a atender a demanda de água do condomínio em questão.

Três linhas de pesquisa foram efetuadas, duas paralelas e uma perpendicular a estas, de acordo com as coordenadas na Tabela 5. As linhas deveriam estar alinhadas com as ruas do condomínio, o que faz com que todas tenham um ângulo regular, cerca de 45°, com a direção principal dos lineamentos estruturais do Grupo Araxá, noroeste-sudeste, o que não é ideal, mas ainda pode identificar possíveis lineamentos. Além disso, as ruas do condomínio foram determinadas de forma a estarem alinhadas com a topografia local, ou seja, elas cruzam os principais vales e são coincidentes com os principais gradientes de altitude. Tais vales são sugestivos de zonas de falha também, portanto os perfis ao estarem coincidentes com as ruas acabam por cruzá-los.

Tabela 5 - Características das linhas geolétricas. L1 - I: eletrodo 1 da linha 1; L1 - F: eletrodo final da linha 1; L2 - I: eletrodo 1 da linha 2; e L2 - F: eletrodo final da linha 2; L3 - I: eletrodo 1 da linha 3; e L3 - F: eletrodo final da linha 3.

Linha	Coordenadas (Datum WGS 84)		Passo (m)	Comprimento (m)	Orientação aproximada das linhas
	Latitude	Longitude			
L1-I Início	16°48'38.91"S	49° 7'51.81"O	10,0	1.090	S - N
L1-F Fim	16°48'3.52"S	49° 7'53.98"O			
L2-I Início	16°48'20.03"S	49° 7'29.09"O	10,0	940	L - O
L2-F Fim	16°48'21.83"S	49° 8'0.73"O			

L3-I Início	16°48'30.83"S	49° 7'44.14"O	10,0	710	L - O
L3-F Fim	16°48'32.09"S	49° 8'8.07"O			

O substrato geológico local é representado predominantemente por micaxisto, e inicia o topo rochoso em torno de 14-17 m. Foi relatado, de acordo com poços anteriormente perfurados que não há lentes de quartzo, sendo a litologia do corpo rochoso de micaxisto, até cerca de 220 m de profundidade.

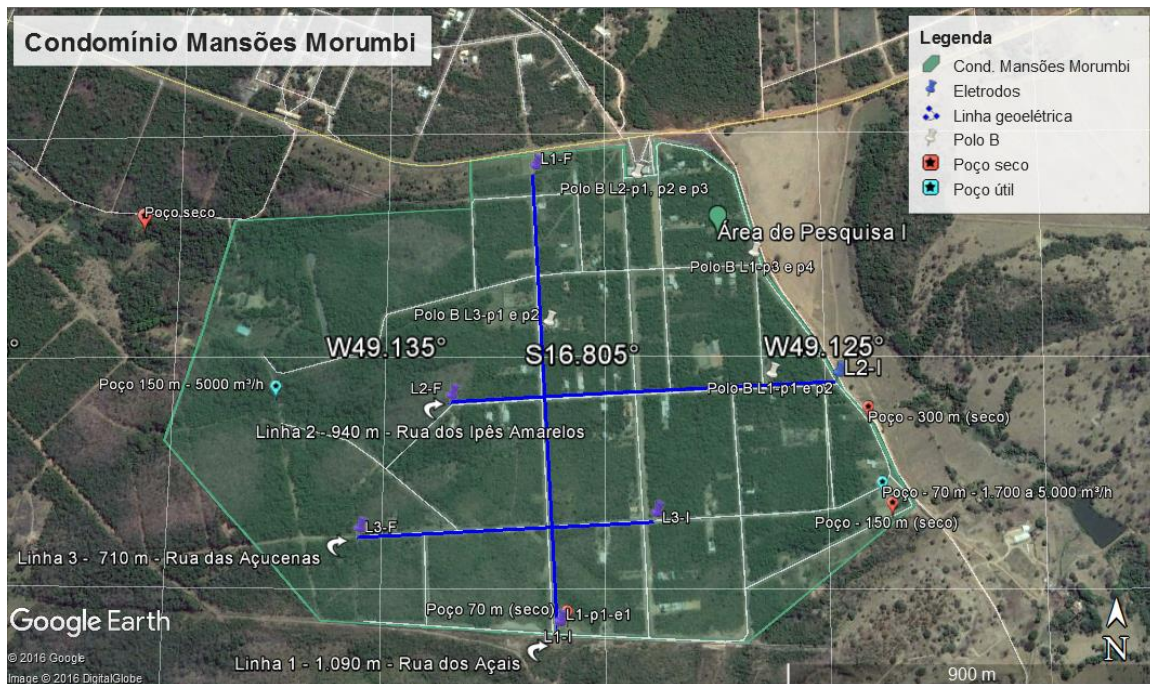


Figura 18 - Disposição das linhas geelétricas 1, 2 e 3 no condomínio Mansões Morumbi em Aparecida de Goiânia (GO).

6. Interpretação dos Perfis Geoelétricos e seus Resultados

A correta interpretação de um perfil geoelétrico precisa de determinados fatores que caso não existam, podem levar a erros decisivos podendo, no caso de pesquisa para poços tubulares, locar um poço em um local errôneo, desacreditando a geofísica e causando prejuízo ao agente que contratou a perfuração. No nosso caso, estamos estudando aquíferos cristalinos, porém, se analisamos um dado pensando que ele seja oriundo de uma área com rocha cristalina, mas na verdade se trata de camadas sedimentares, a interpretação será completamente diferente da real situação geológica. Consequentemente é pouco provável que o ponto locado para perfurar seja o correto, gerando uma falha no uso da geofísica. Esse é um dos motivos pelos quais não se deve utilizar a geofísica como ferramenta de pesquisa isolada. Portanto, o primeiro ponto para uma interpretação fidedigna é conhecer a geologia geral da região de estudo, o que normalmente não é difícil, já que atualmente a maior parte do território brasileiro, já foi mapeado ao menos em grande escala. Além disso, normalmente há perfurações próximas que podem confirmar a profundidade do topo rochoso, quando este não aflora, no caso de ambientes compostos por corpos rochosos.

Conhecido o ambiente geológico, deve-se determinar qual o alvo que a geofísica está visando. No caso de aquíferos cristalinos, como já foi exposto neste trabalho, procura-se lineamentos estruturais, sejam anticlinal, sinclinal, dique, diversos tipos de falhas, fraturas ou zona de cisalhamento. Então é preciso conhecer como esses alvos normalmente aparecem na resposta do perfil de resistividade, quais suas variações e principalmente se a técnica que está sendo utilizada é viável para esse tipo de anomalia. No caso estudado por este trabalho, o arranjo polo-dípolo, funcionando como caminhamento elétrico, consegue registrar bem anomalias condutoras, que são o tipo que ocorrem em lineamentos estruturais. Com o ambiente geológico bem definido, a técnica e o arranjo corretamente escolhidos, o próximo passo é tentar compreender se realmente há algum lineamento a ser identificado pela geofísica e caso haja, qual sua direção. Pistas a respeito da presença desta e/ou de sua direção podem ser obtidas através de vários métodos, como:

1. Topografia
 - a. Altos e baixos topográficos podem corresponder ao eixo da anticlinal ou da sinclinal, respectivamente, pelo fato da rocha que anteriormente estava sobre esta ter sido erodida por ser menos resistente mecanicamente quando comparado com a rocha que atualmente forma as dobras;
 - b. Talude íngreme separando planícies pode representar um falhamento recente;
2. Direção de fraturas nas rochas aflorantes: a análise de amostras de rochas aflorantes geralmente contém direções de fraturas principais e/ou secundárias;
3. Imagens de satélite:
 - a. Variação brusca na vegetação superficial, pode ser resultado da diferença de solo, resultante da diferença litológica entre uma área e outra, essa diferença litológica brusca geralmente foi gerada por um falhamento;
 - b. Identificação de unidades litológicas por processamento digital de imagens;
4. Informações geológicas de acesso público: alguns órgãos de fomento à pesquisa geológica no país fornecem livremente dados litológicos, estruturais, de corpos d'água e até de registro de poços perfurados.

Definido(s) o(s) provável(is) local(is) que perpassa o lineamento estrutural assim como sua direção, pode-se definir as linhas geoelétricas de pesquisa, que para melhor identificarmos devem transpassá-lo, sendo perpendiculares ao lineamento. Outro fator importante para atentar é se a profundidade de investigação irá conseguir atingir boa parte do alvo.

Por mais que a resposta geofísica obtenha a resposta esperada por meio do perfil de resistividade, pode ser que o sinal não corresponda ao alvo almejado. Isso porque, a depender da área de estudo, existem vários artefatos que podem gerar ruído semelhante ao sinal de um lineamento estrutural. Por exemplo, se o perfil geofísico cruzar uma adutora de ferro de grande diâmetro isso pode gerar uma anomalia profunda semelhante a um falhamento. Já se for uma adutora de plástico não há efeito, pela sua característica de não conduzir corrente elétrica. Outros artefatos em subsuperfície, como cabos de alta tensão enterrados ou canos de esgoto de diâmetros relativamente grandes geram ruídos que mascaram a real situação geológica ou mesmo podem enganar o intérprete fazendo-o pensar que o ruído se trata do alvo estrutural que ele procura. Nesse caso, quando perfurar além de não encontrar água poderá destruir um encanamento ou mesmo interromper o abastecimento de energia elétrica local.

A informação mais útil para uma interpretação geoelétrica é o perfil litológico de um poço perfurado ao longo ou ao menos próximo da linha de pesquisa. Porque assim é possível correlacionar as diferentes faixas de resistividade elétrica com as camadas geológicas. Com isso por mais que haja outras regiões de estudo, sendo elas próximas, há alta possibilidade de também correlacionar a seção geoelétrica dos outros perfis com este poço perfurado, já que a sequência das camadas dificilmente muda drasticamente em uma região. Se não há dados diretos de perfuração facilmente pode-se haver ambiguidade, por exemplo: de uma camada de baixa resistividade estreita sobre uma espessa camada mais resistiva, podendo caracterizar tanto um lençol freático sobre o topo rochoso ou uma cobertura aluvial argilosa sobre este mesmo topo rochoso.

Como explanado no Item 2.2, cada corpo rochoso apresenta um amplo campo de variabilidade dos próprios valores de resistividade, dependendo da sua homogeneidade, do nível de alteração e, para rochas cristalinas, do grau de fraturamento. A interpretação de um perfil de resistividade é composto por valores de resistividade interpolados, variando de valores desde 10^{-1} até 10^5 ohm.m.

6.1. Caso 1 – Indústria de Laticínios em Corumbaíba, Goiás

Quanto mais perfis geofísicos se tem da região de estudo mais confiável a interpretação se torna, isso quando os perfis coincidem no quesito geológico, ou seja, camadas com faixa de resistividades e espessura semelhantes. Essa comprovação mútua entre os perfis é ainda mais importante quando há alto erro de inversão provocado por algum ruído na região de estudo. É o que ocorre em Corumbaíba, na indústria de laticínios da empresa Italac. O perfil 1 apresentou alto erro de inversão, 29,4%, sendo o melhor valor sendo possível chegar, já que caso mais dados fossem excluídos o prejuízo seria maior do que deixá-los, mesmo com um erro considerável. Porém, tanto o perfil 1 quanto o 2 indicam uma interpretação possível e coincidente.

Ambos indicam a presença de terrenos contrastantes quanto a resistividade elétrica entre resistivos (até 4.000 ohm.m) e condutivos (até 100 ohm.m). Esse contraste não é vertical, mas sim horizontal, justamente o que procura-se.

A Figura 19a mostra o modelo de resistividade real do terreno ao longo da linha de pesquisa geoelétrica 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. Na parte central do perfil, de 60 a 140 m de comprimento, de 0 a cerca de 20 m de profundidade tem-se 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 Figura 19b.

O perfil 2, contido na Figura 20a, 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.

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 (Figura 19b) e 153 m (Figura 20b) de comprimento do perfil 1 e 2, respectivamente.

Perfurados os poços, em ambos: a presença da rocha sã foi confirmada e a vazão obtida foi entre 12 e 15 m³/hora, considerada alta em relação aos poços anteriormente existentes. Informações mais específicas a respeito da perfuração, como perfil litológico, não puderam ser divulgadas.

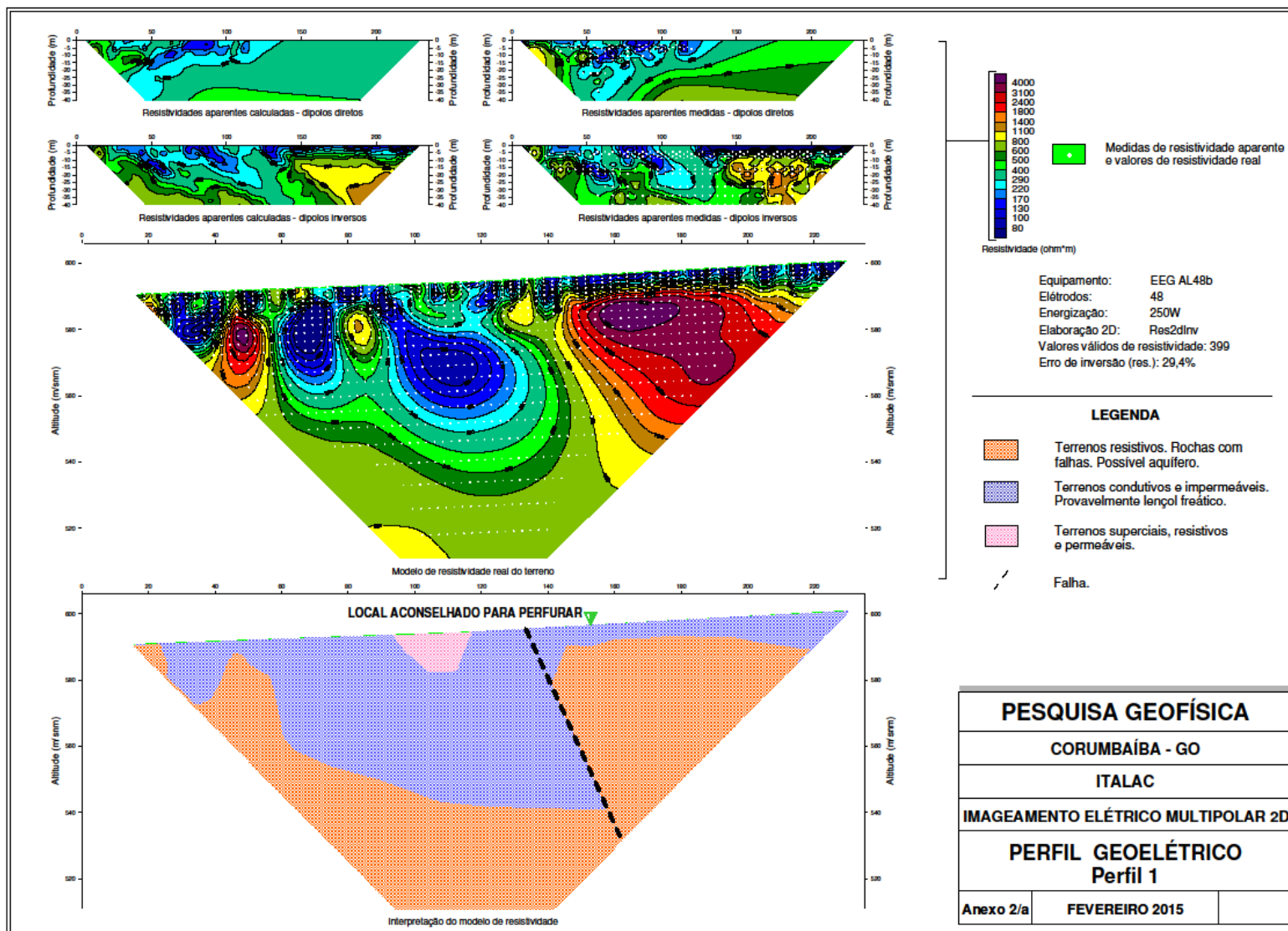


Figura 19 - (a) Modelo de resistividade real do terreno da linha 1 de pesquisa em Corumbáiba (GO) e seu correspondente (b) perfil interpretado.

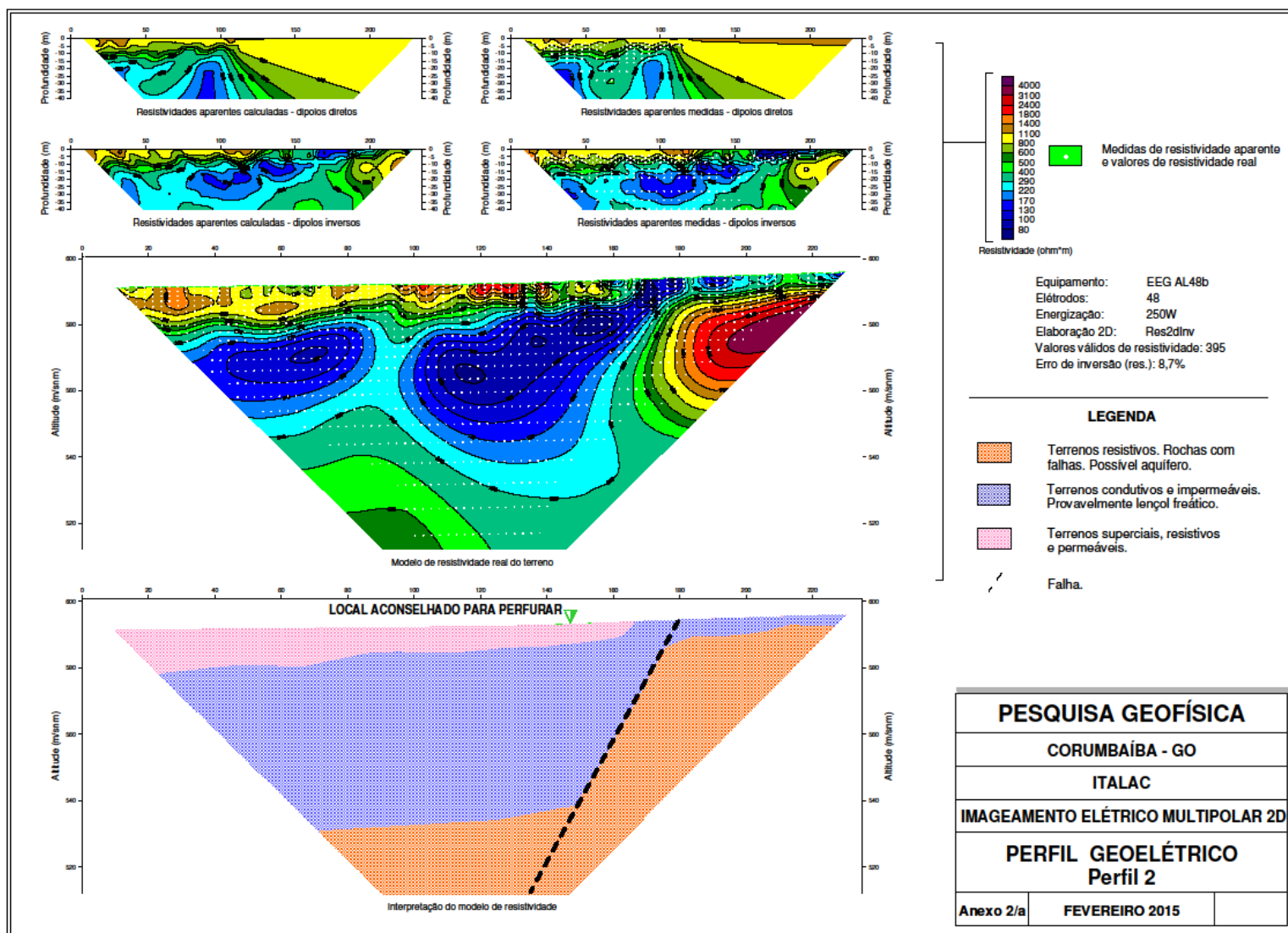


Figura 20 - (a) Modelo de resistividade real do terreno da linha 2 de pesquisa em Corumbáiba (GO) e seu correspondente (b) perfil interpretado.

6.2. Caso 2 – Fazenda em Moita Bonita, Sergipe

Em Moita Bonita, Sergipe, foi adquirido o perfil contido na Figura 21a. 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 geolétrica; 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 Figura 15), 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 Figura 21b relaciona o perfil geofísico da Figura 21a com modelos de aquíferos cristalinos que contêm falhamentos/fraturamentos subverticais. Nestes é normal a presença de terreno argiloso e/ou água gerando baixos valores 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 $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ (conforme teste de vazão). A rocha sã conforme o primeiro poço e a indicação do perfil geolétrico iniciou em 8 m de profundidade.

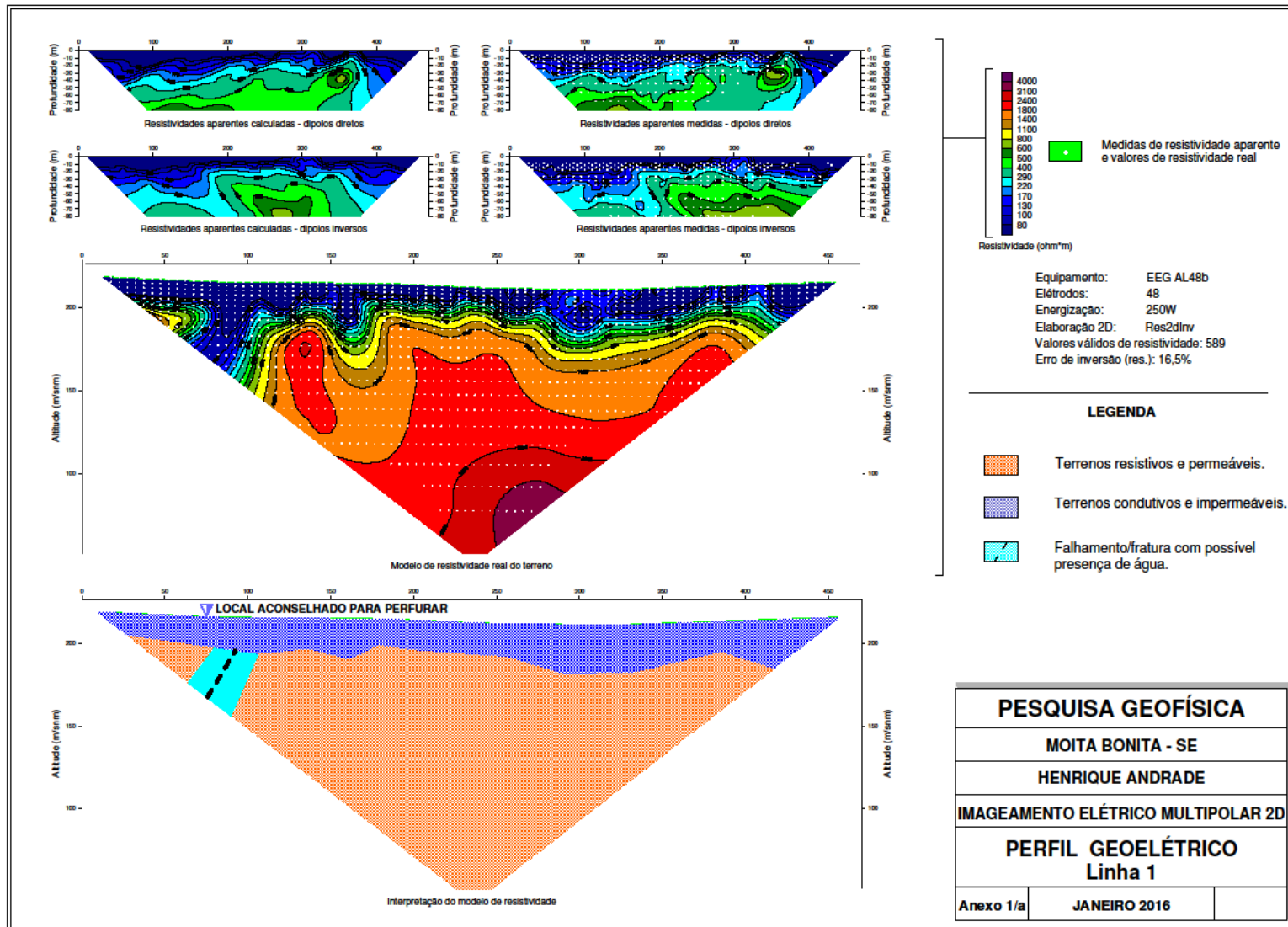


Figura 21 - (a) Modelo de resistividade real do terreno da linha 1 de pesquisa em Moita Bonita (SE) e seu correspondente (b) perfil interpretado

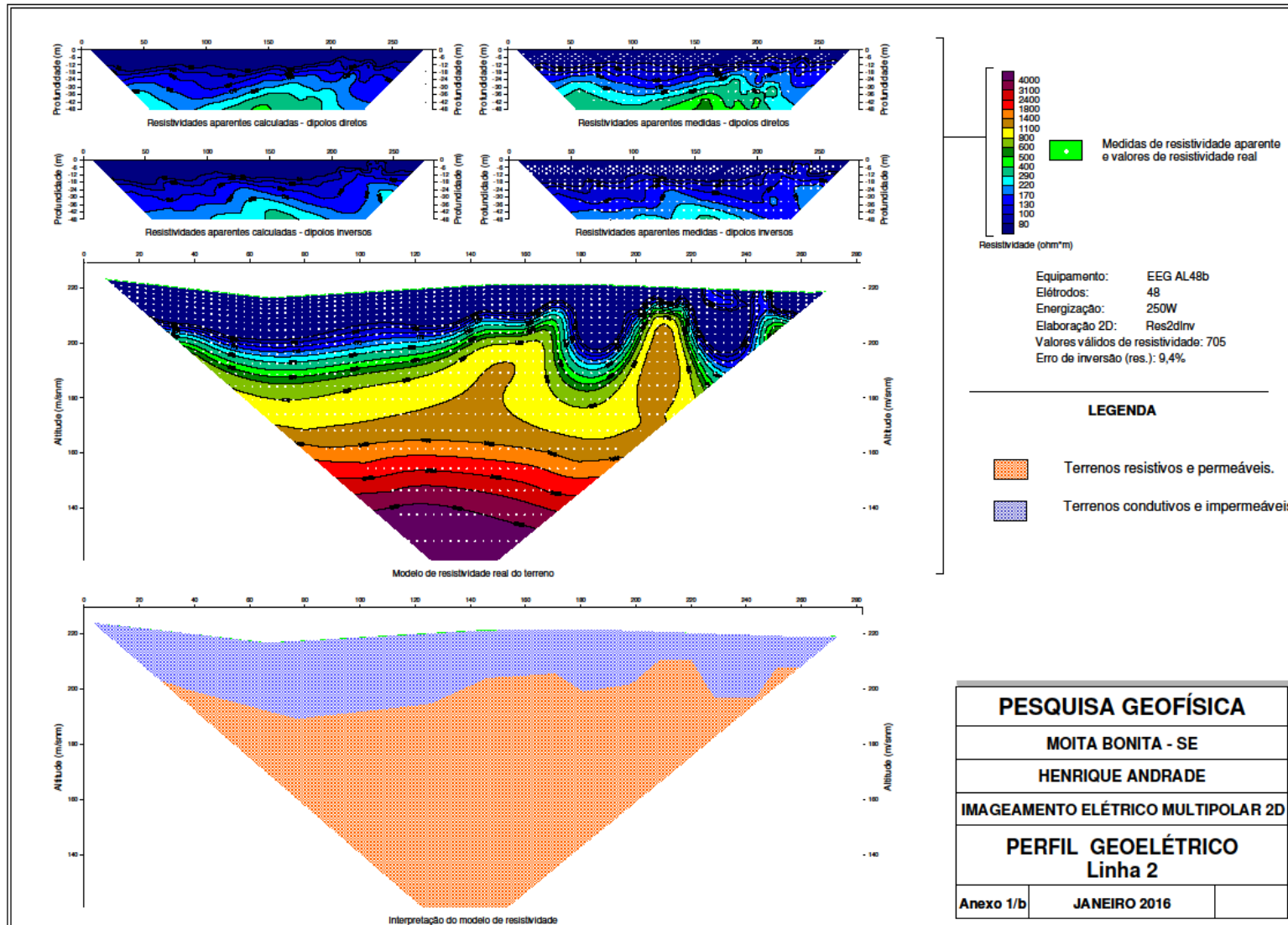


Figura 22 - (a) Modelo de resistividade real do terreno da linha 2 de pesquisa em Moita Bonita (SE) e seu correspondente (b) perfil interpretado.

6.3. Caso 3 – Escola Dom Fernando em Aparecida de Goiânia, Goiás

Em Aparecida de Goiânia predomina o Grupo Araxá, caracterizado por xistos e quartzitos. No local da Escola Dom Fernando foram perfurados dois mini poços, um de 13 e outro de 22 m de profundidade, portanto sem encontrar rocha sã. O resultado em vazão desses mini poços foram de 200 L/h (0,2 m³/h), sendo provenientes da chamada “capa da rocha”. Como esse tipo de poço visa a captação de água dos terrenos soltos superficiais, pode haver problemas com a qualidade da água e redução da vazão em épocas de estiagem. Por isso a pesquisa geofísica foi solicitada para investigando o corpo rochoso determinar onde perfurar um poço tubular.

Ambos os perfis apresentam baixo erro de inversão, 12,4% e 10,6%, e de forma geral apresentam faixas de resistividade elétrica mais resistivas e mais condutivas dispostas de forma semelhante quanto a profundidade e espessura. A faixa de variação de resistividade não é ampla, apenas de 30 até 1.300 ohm.m, o que dificulta a interpretação, porque tal faixa de variação de apenas cerca de 1.000 ohm.m poderia representar apenas um tipo de rocha ou terreno, mas como esses valores se dividem bem ao longo da profundidade no perfil pode-se correlacionar com diferentes camadas geológicas. Além disso o valor de 30 ohm.m, bastante baixo, muito provavelmente corresponde a argila (Figura 3).

Analisando o contexto geral dos dois perfis observa-se uma camada superior resistiva de aproximadamente 15 m de espessura, de cerca de 200 a até 1.300 ohm.m. No meio há uma ampla camada com resistividade diminuindo rapidamente para valores bem baixos, onde sua forma é mais regular no perfil 2 (Figura 25) com espessura de cerca de 40 m. A partir de 50-60 m de profundidade o campo de resistividade elétrica volta a aumentar gradativamente, até o final da investigação.

Sabe-se através dos mini poços perfurados que a camada superior não corresponde a rocha sã, além disso não se vê afloramentos na região. A segunda camada, pela sua alta condutividade, também não pode corresponder a uma rocha sã. A rocha inalterada pode estar representada pela terceira camada identificada pela variação das resistividades elétricas dos dois perfis, abaixo dos 50-60 m de profundidade. Considerando essa interpretação, os terrenos superiores devem ser soltos e resultado de rocha alterada. No perfil 1 (Figura 24a), há uma anomalia horizontal nessa possível camada de rocha, entre 100 e 120 m de comprimento da linha geoeletrica, o que não ocorre no perfil 2 (Figura 25a). Portanto essa anomalia horizontal pode representar uma fissura da rocha sã que ao longo do tempo foi se expandindo gerando um bom aquífero. Então a camada intermediária deve corresponder à rocha altamente alterada, já há muito sobre a influência de umidade, por isso acumulando minerais argilosos, que são responsáveis por essa resistividade elétrica tão baixa (<100 ohm.m). Esta camada ainda deve funcionar como um impermeabilizante na profundidade de aproximadamente 15-20 m, sendo responsável por funcionar como uma base através da qual a água dificilmente se aprofunda, originando a água da citada “capa da rocha” dos mini poços perfurados na região. Por fim, a camada superior caracteriza terrenos superficiais soltos originados tanto da alteração rochosa quanto de deposição sedimentar na região. Sua alta resistividade deve-se ao baixo teor de umidade.

A camada intermediária argilosa deve ainda funcionar como um impermeabilizante também para a água no aquífero cristalino na rocha fraturada provavelmente identificada na Figura 24a e assim interpretada, conforme a Figura 24b.

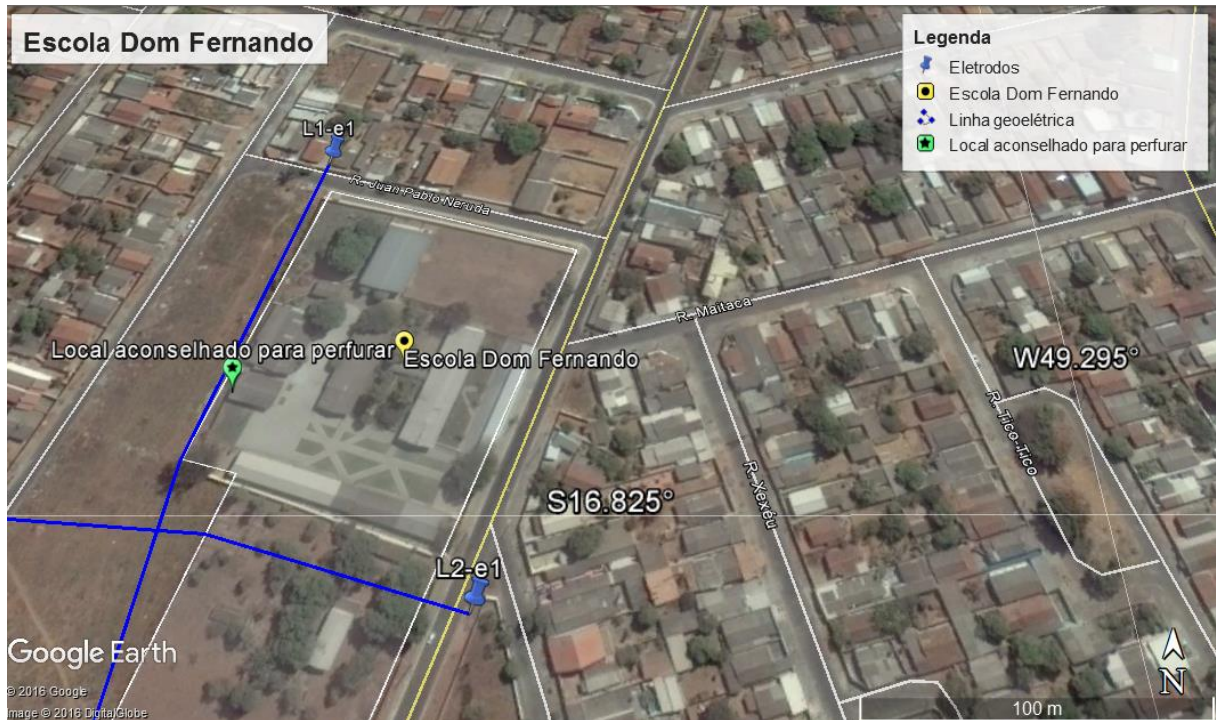


Figura 23 - Local aconselhado para perfurar na Escola Dom Fernando em Aparecida de Goiânia, Goiás.

Diante dos dados encontrados, em associação com as informações fornecidas ao longo do trabalho e o conhecimento técnico aqui apresentado, pode-se pressupor que o melhor local para perfuração de um poço tubular se encontra em torno do comprimento de 100 m do perfil 1 (conforme a seta verde, “LOCAL ACONSELHADO PARA PERFURAR” na Figura 24b) a partir de aproximadamente 60 m de profundidade até em torno de 80 m. A perfuração neste ponto visa encontrar a provável rocha fraturada em profundidade (que deve conter água), atravessando a área condutiva e alcançando a resistiva nessa região.

Existe ainda uma anomalia horizontal bastante expressiva em torno de 60 m do perfil 1, porém, a suspeita é de que essa anomalia não corresponde a uma resposta da geologia local e sim da interpolação realizada com poucos dados nesse início do perfil, provavelmente por causa da falta de eletrodo por causa do asfalto (Figura 16).

As coordenadas geográficas do local aconselhado, segundo a pesquisa geofísica e dados geológicos associados, para perfurar foram, de acordo com o Datum WGS 84: latitude $16^{\circ}49'28.68''S$ e longitude $49^{\circ}17'51.53''O$ até uma profundidade de pelo menos 60-80 m (Figura 23). O poço atingiu 64 m de profundidade obtendo 4.000 L/h ($4 \text{ m}^3/\text{h}$).

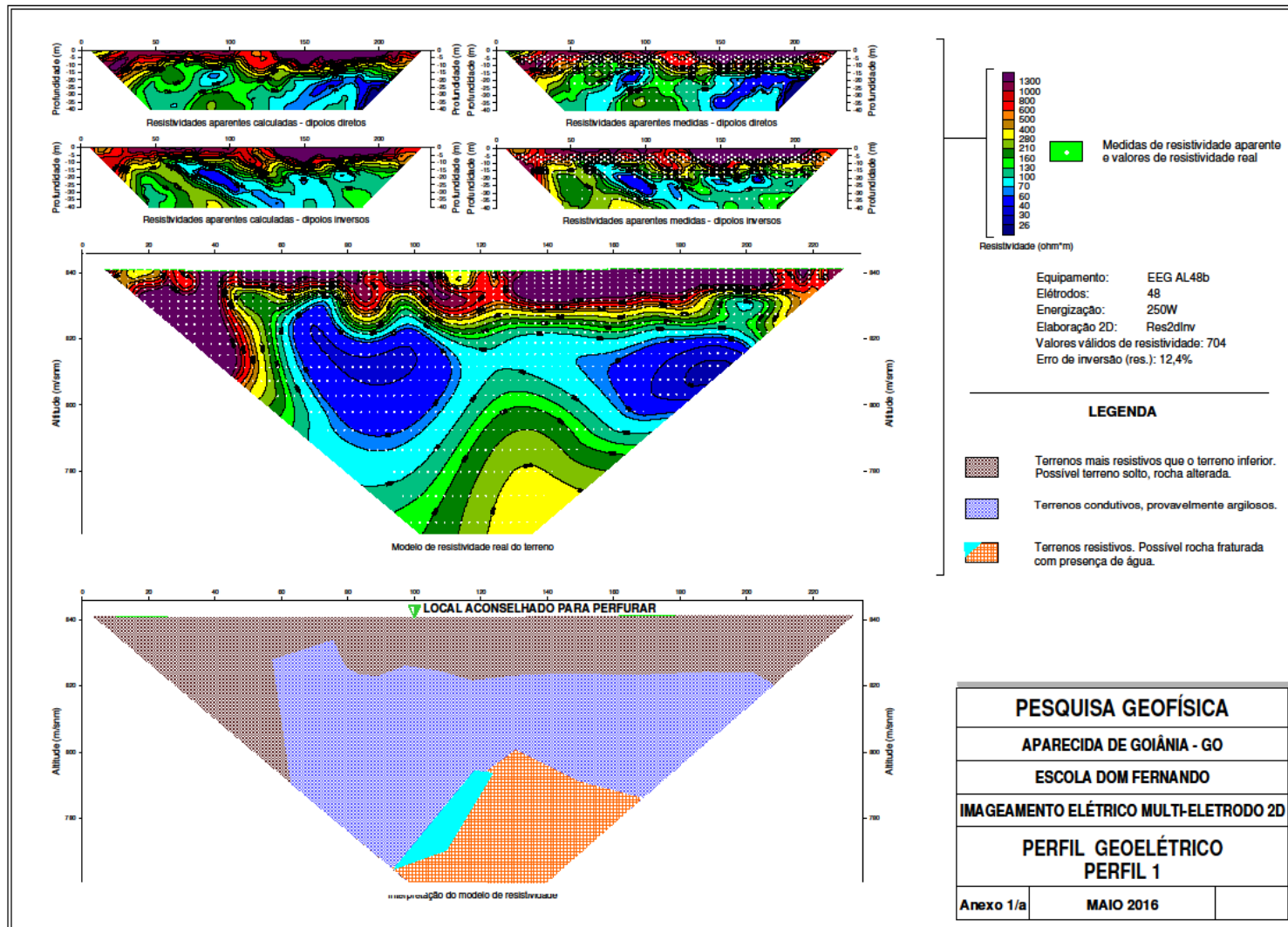


Figura 24 - (a) Modelo de resistividade real do terreno da linha 1 de pesquisa na Escola Dom Fernando em Aparecida de Goiânia (GO) e seu correspondente (b) perfil interpretado.

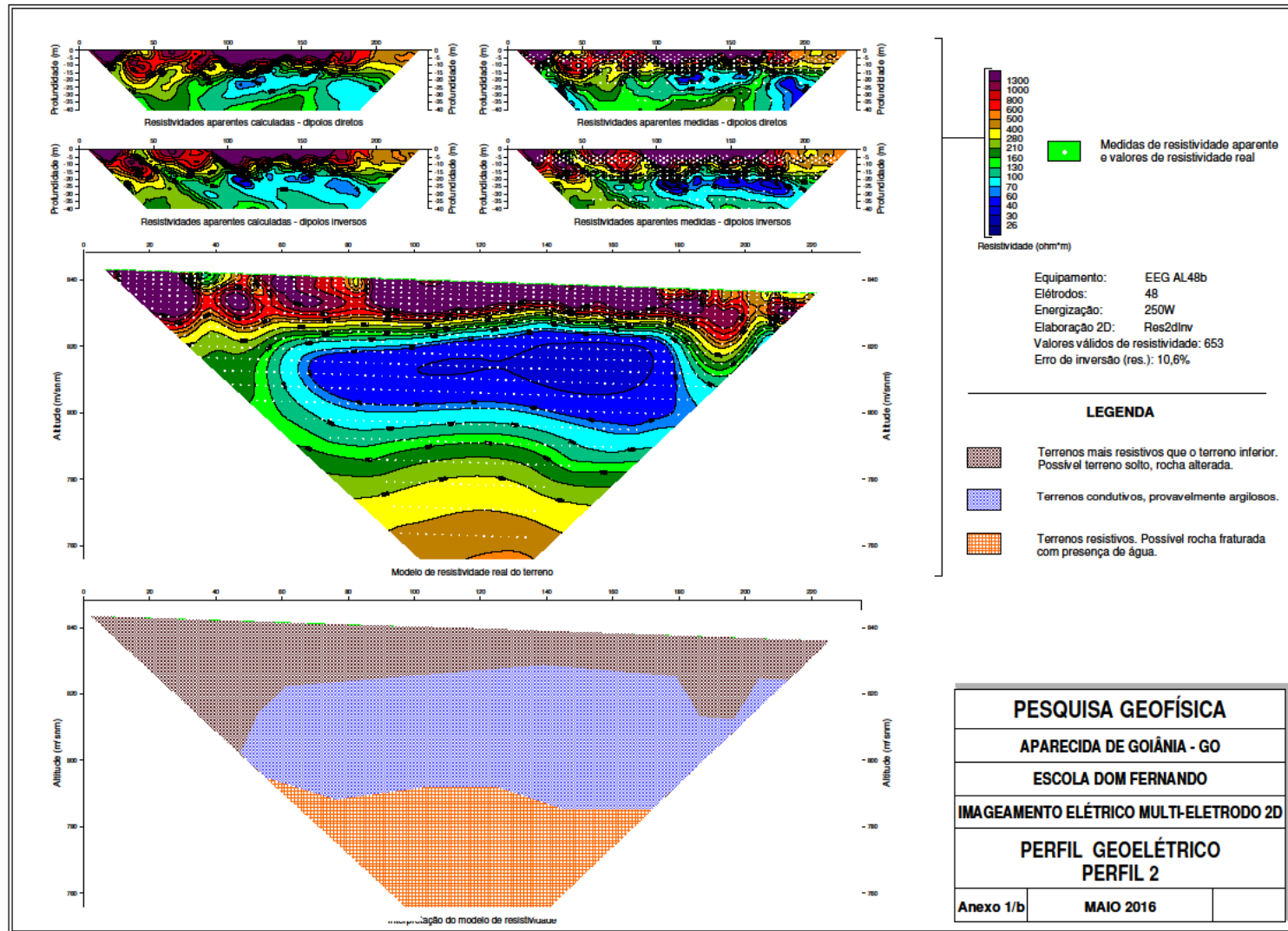


Figura 25 - (a) Modelo de resistividade real do terreno da linha 2 de pesquisa na Escola Dom Fernando em Aparecida de Goiânia (GO) e seu correspondente (b) perfil interpretado.

6.4. Caso 4 – Condomínio Mansões Morumbi em Aparecida de Goiânia, Goiás

No condomínio Mansões Morumbi em Aparecida de Goiânia, Goiás, cinco poços já haviam sido perfurados, contendo o seguinte histórico:

- Latitude 16°48'30.58"S e longitude 49° 7'24.68"O, profundidade de 150 m: seco;
- Latitude 16°48'28.99"S e longitude 49° 7'25.48"O, profundidade de 70 m: 1.700 a 5.000 m³/h;
- Latitude 16°48'23.14"S e longitude 49° 7'26.48"O, profundidade de 280 m: seco;
- Latitude 16°48'7.79"S e longitude 16°48'7.79"S, profundidade desconhecida: seco;
- Latitude 16°48'21.47"S e longitude 16°48'21.47"S, profundidade de 150 m: 5.000 m³/h.

Ainda não havia sido realizada pesquisa geofísica com essa finalidade no local, portanto através desta visou-se encontrar locais com provável maior vazão para abastecer as necessidades dos condôminos.

Através dos poços perfurados foi obtido o perfil litológico que indicou início da rocha sã em torno de 14-17 m e segundo o poço de 280 m, houve uma certa homogeneidade de rocha xistosa, conforme supõem-se que haja no Grupo Araxá, sem a presença de lentes de quartzo, até 220 m, onde então predominou argilito.

A linha de pesquisa 1 cruza o condomínio de sul a norte, enquanto as linhas 2 e 3, paralelas, são perpendiculares àquela, ambas cruzando-a. A variação da resistividade elétrica é bastante ampla nesse contexto geológico, desde 150 ohm.m a até 70.000 ohm.m, muito diferente da situação no Caso 3, que corresponde regionalmente ao mesmo contexto geológico do Grupo Araxá. Os erros de inversão são de 29,5 %, 33,2% e 20,2% para os perfis 1, 2 e 3, respectivamente. Essa região de estudo não apresenta fatores que podem causar ruídos expressivos, portanto esses valores relativamente altos devem corresponder à grande extensão de área estudada e à sua heterogeneidade. Como pode-se observar nos 3 perfis há uma brusca variação horizontal das resistividades elétricas. Como o arranjo polo-dipolo obtém resultados assimétricos a depender do sentido que o levantamento está sendo realizado, obviamente há de ocorrer uma expressiva diferença entre os dipolos diretos e inversos. Além disso, como a linha geoeletrica é bastante extensa foram realizados vários perfis geoeletricos que então foram concatenados para formar um só perfil, isso também gera uma dificuldade de perfeita correspondência entre uma medida e outra. No entanto, os perfis são confiáveis e tecnicamente úteis, além do que, há um grande número de dados válidos, ou seja, com baixo ou até nenhum erro entre os valores de potencial lidos no sentido direto e inverso, sendo de 1.760 para o perfil 1, 1.459 para o 2 e 1.141 para o 3 (Figura 28 até a Figura 30).

Analisando os perfis observa-se a predominância de regiões com alta resistividade elétrica, de 3.000 a até 70.000 ohm.m, intercalados por faixas verticais mais condutivas de 50-70 m de espessura, ao longo de toda a profundidade investigada (comprimento de 500-570 m da Figura 28a) ou terminando antes (como na região de 380-450 m também da Figura 28a). Conforme os perfis litológicos indicaram trata-se de cobertura superficial de solo e rocha alterada nos primeiros 15 m aproximadamente, variando sucintamente a depender do local, e rocha sã a partir de então. A resolução vertical do estudo utilizando o passo 10 m não é tão alta, por esse motivo não é dada ênfase nos perfis para essa região de terrenos soltos superficiais, fazendo com que esta camada passe despercebida, exceto em algumas regiões onde ela foi cogitada por haver uma breve queda da resistividade contrastando com as altas resistividades inferiores, como nos terrenos ilustrados em verde nas figuras abaixo.

Esses condutores de grandes dimensões em uma região de rocha cristalina só podem corresponder a rocha fraturada com água, não podem ser argila porque as resistividades são

maiores do que 200 ohm.m. Esse contexto é muito sugestivo para rocha com água. Por haver muitas dessas regiões condutivas pensou-se em mapear na superfície onde elas ocorrem, para verificar onde elas mais ocorrem, assim foi feito conforme a Figura 26. Quanto mais ampla a região fraturada maior a possibilidade de se obter maior vazão de água, tendo melhor proveito do poço perfurado. Mas nem todas as regiões condutivas foram marcadas, apenas aquelas verticalizadas, porque estas têm maior probabilidade de conter mais água e de serem interconectadas em profundidade, já as que não avançam em profundidade podem ser possíveis bolsões de água na rocha fraturada.

As projeções foram feitas ao longo das linhas de pesquisa, nos seguintes comprimentos (Figura 26):

- Linha geolétrica 1 (Figura 28):
 - 145 a 200 m;
 - 500 a 560 m e;
 - 700 a 760 m.
- Linha geolétrica 2 (Figura 29):
 - 290 a 310 m;
 - 500 a 560 m e;
 - 630 a 670 m.
- Linha geolétrica 3 (Figura 30):
 - 70 a 120 m.

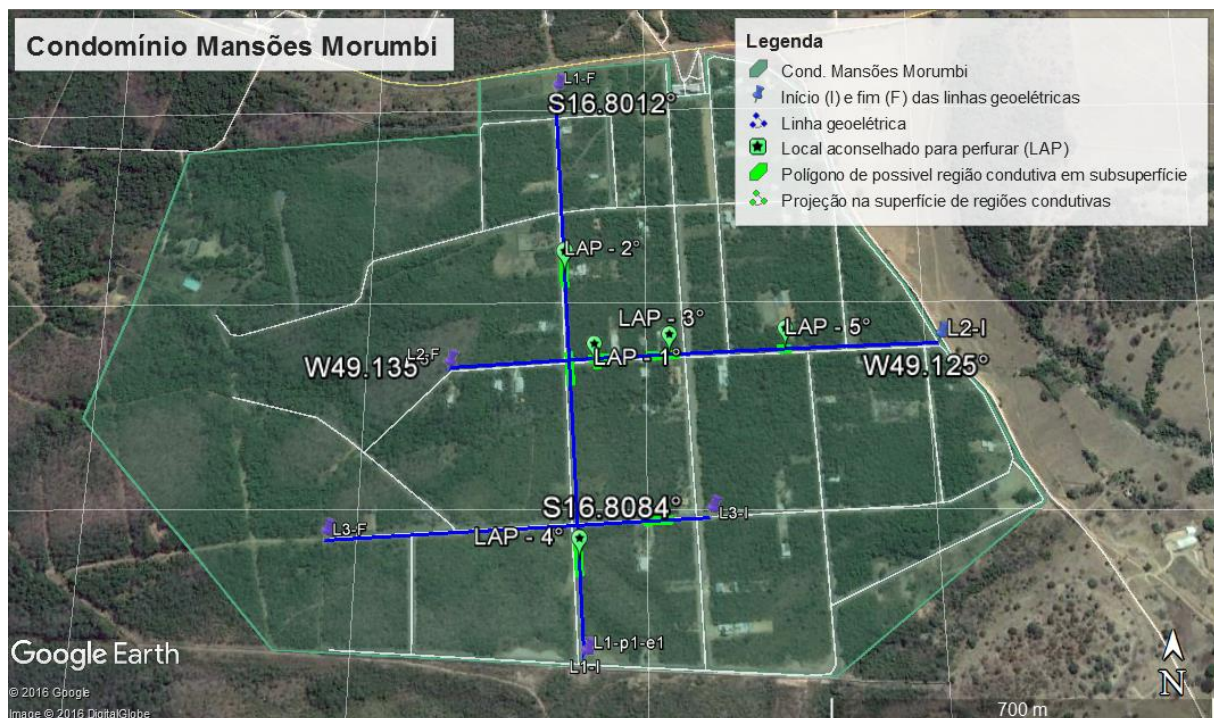


Figura 26 - Projeção na superfície (faixas verdes), ao longo das linhas geolétricas, das zonas de alta condutividade elétrica em subsuperfície e seus respectivos locais aconselhados para perfurar (balões verdes).

Todos esses condutivos verticalizados possivelmente seriam locais aconselhados para perfurar (LAP), por esse motivo as coordenadas de perfuração, segundo o Datum WGS 84, foram determinadas:

1. LAP 1°: Em torno do comprimento de 538 m do perfil 1 com uma projeção de 45 m a leste, a partir de aproximadamente 100 m de profundidade | Coordenada: latitude $16^{\circ}48'21.50''S$, longitude $49^{\circ}7'51.30''O$;
2. LAP 2°: Em torno do comprimento de 719 m do perfil 1, a partir de aproximadamente 50 m de profundidade | Coordenada: latitude $16^{\circ}48'15.74''S$, longitude $49^{\circ}7'53.23''O$;
3. LAP 3°: Em torno do comprimento de 517 m do perfil 2, a partir de aproximadamente 100 m de profundidade | Coordenada: latitude $16^{\circ}48'20.91''S$, longitude $49^{\circ}7'46.52''O$;
4. LAP 4°: Em torno do comprimento de 173 m do perfil 1, a partir de aproximadamente 50 m de profundidade | Coordenada: latitude $16^{\circ}48'33.24''S$, longitude $49^{\circ}7'52.16''O$ e;
5. LAP 5°: Em torno do comprimento de 297 m do perfil 2, a partir de aproximadamente 50 m de profundidade | Coordenada: latitude $16^{\circ}48'20.51''S$, longitude $49^{\circ}7'39.09''O$.

O cruzamento da linha 1 com a linha 2 contém duas regiões condutivas, podendo indicar rocha fraturada, próximas. Como o imageamento elétrico percebe os condutivos adjacentes à linha de pesquisa também, já que obtém a diferença de potencial da região e não de um ponto específico, pode-se considerar o cruzamento das anomalias condutivas que está a sudeste do cruzamento das linhas 1 e 2, representado pelo polígono frisado na Figura 27.

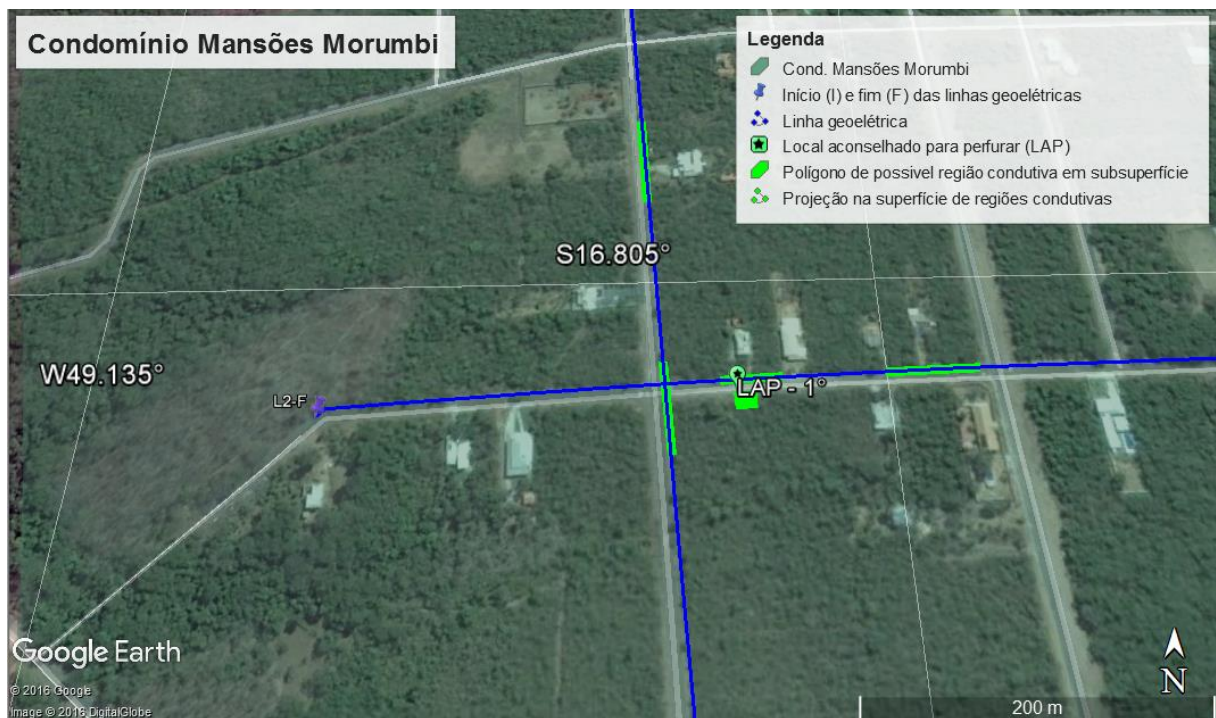


Figura 27 - Local aconselhado para perfurar dentro do polígono em superfície correspondente à zonas condutivas em subsuperfície.

A perfuração em todos os pontos visa encontrar as zonas condutivas que, se tratando de um ambiente de rocha cristalina, devem corresponder a rocha fraturada com presença de água. Das 5 indicações, 4 foram feitas sobre os perfis geofísicos, apenas 1, a primeira, sugere que o furo seja realizado de acordo com uma projeção das zonas condutivas partindo do perfil 1 e 2. Essa proposta foi feita como primeira opção (LAP – 1°) pelo fato dos dois perfis terem identificado nessa região essa provável zona de rocha fraturada, portanto pode-se tratar de uma ampla zona podendo ter maior potencial de água que as outras regiões.

A segunda opção (LAP – 2°) foi escolhida pela sua conexão com a zona condutiva 1, conforme pode-se observar na interpretação feita ilustrada na Figura 28b e pela sua extensão lateral ser maior tanto em profundidade quanto mais perto da superfície. Os mesmos critérios para a terceira opção (LAP – 3°), sendo esta em espessura lateral menor que a zona condutiva da segunda opção. Por fim, a LAP – 4° estão em uma zona condutiva maior que a LAP – 5°.

No geral o contexto sugeriu altas chances de sucesso nas perfurações indicadas, considerando os dados de boa qualidade coletados, a resposta geofísica contendo queda de resistividade, não muito acentuada (diminuindo as chances de ser argila), indicando rocha fraturada com água, dentro de zonas fortemente condutivas (rocha).

Conforme indicado pela geofísica a perfuração foi feita no ponto LAP – 1°. Nos primeiros 50 m iniciou uma vazão por volta de 1.500 L/h que se manteve até os 100 m perfurados. Após poucos metros de terrenos soltos iniciou a rocha sã, conforme sugerido pelos outros poços e pelos perfis geofísicos.

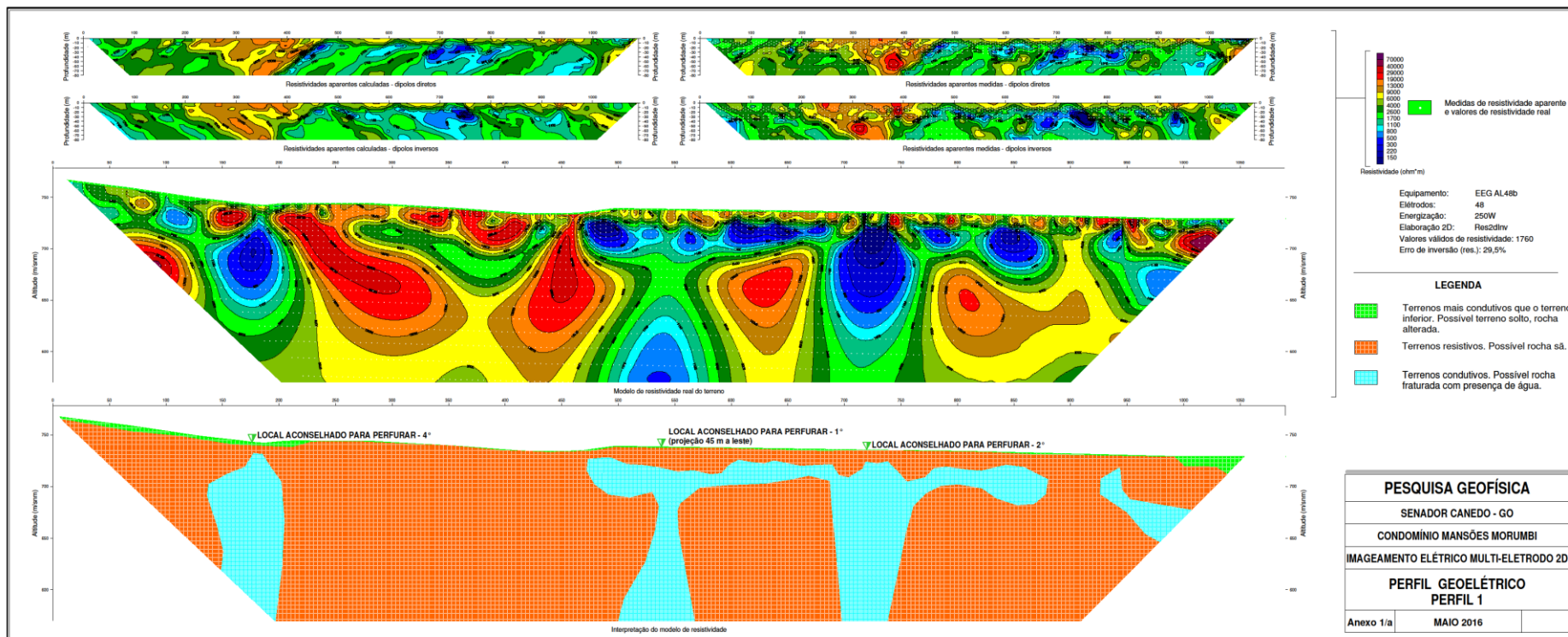


Figura 28 - (a) Modelo de resistividade real do terreno da linha 1 de pesquisa no Condomínio Mansões Morumbi em Aparecida de Goiânia (GO) e sua correspondente (b) perfil interpretado.

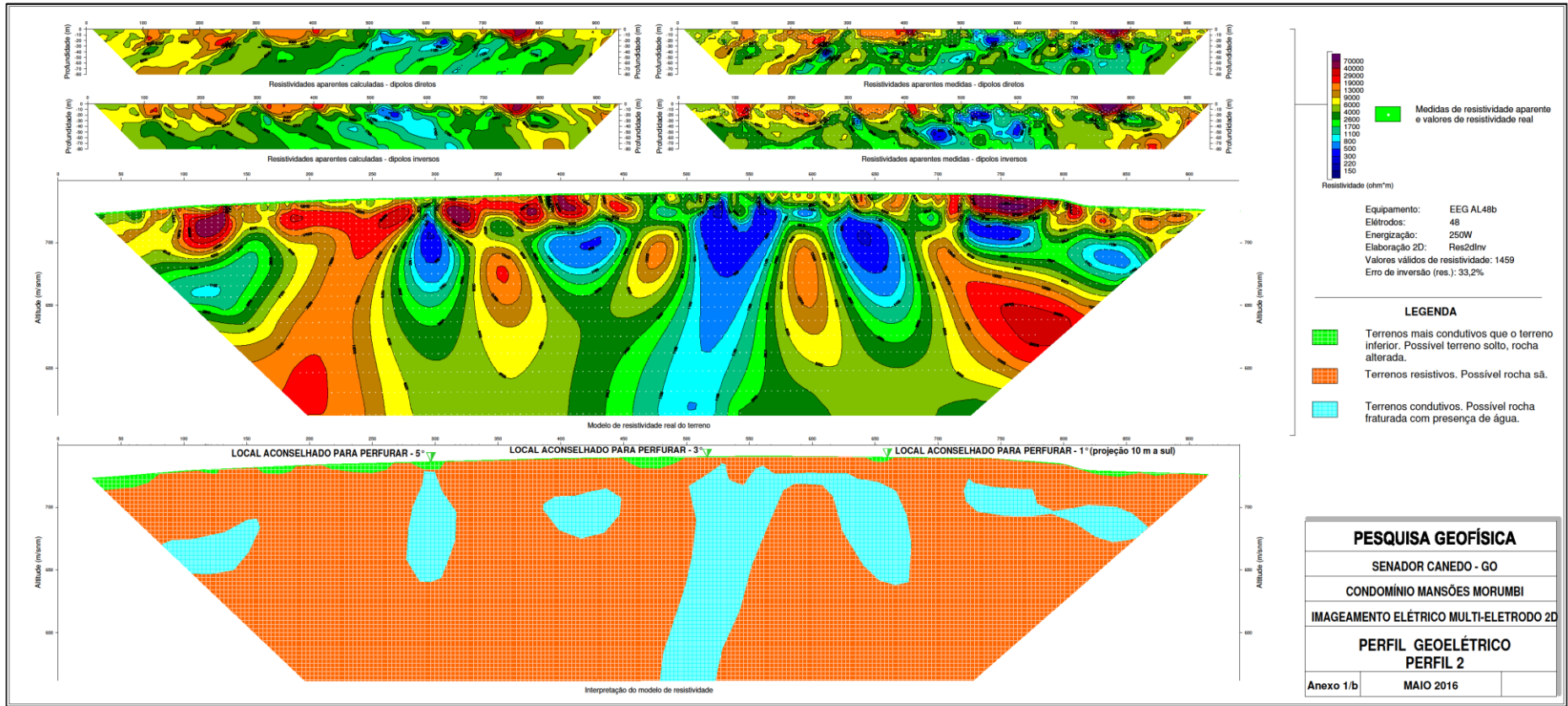


Figura 29 - (a) Modelo de resistividade real do terreno da linha 2 de pesquisa no Condomínio Mansões Morumbi em Aparecida de Goiânia (GO) e sua correspondente (b) perfil interpretado.

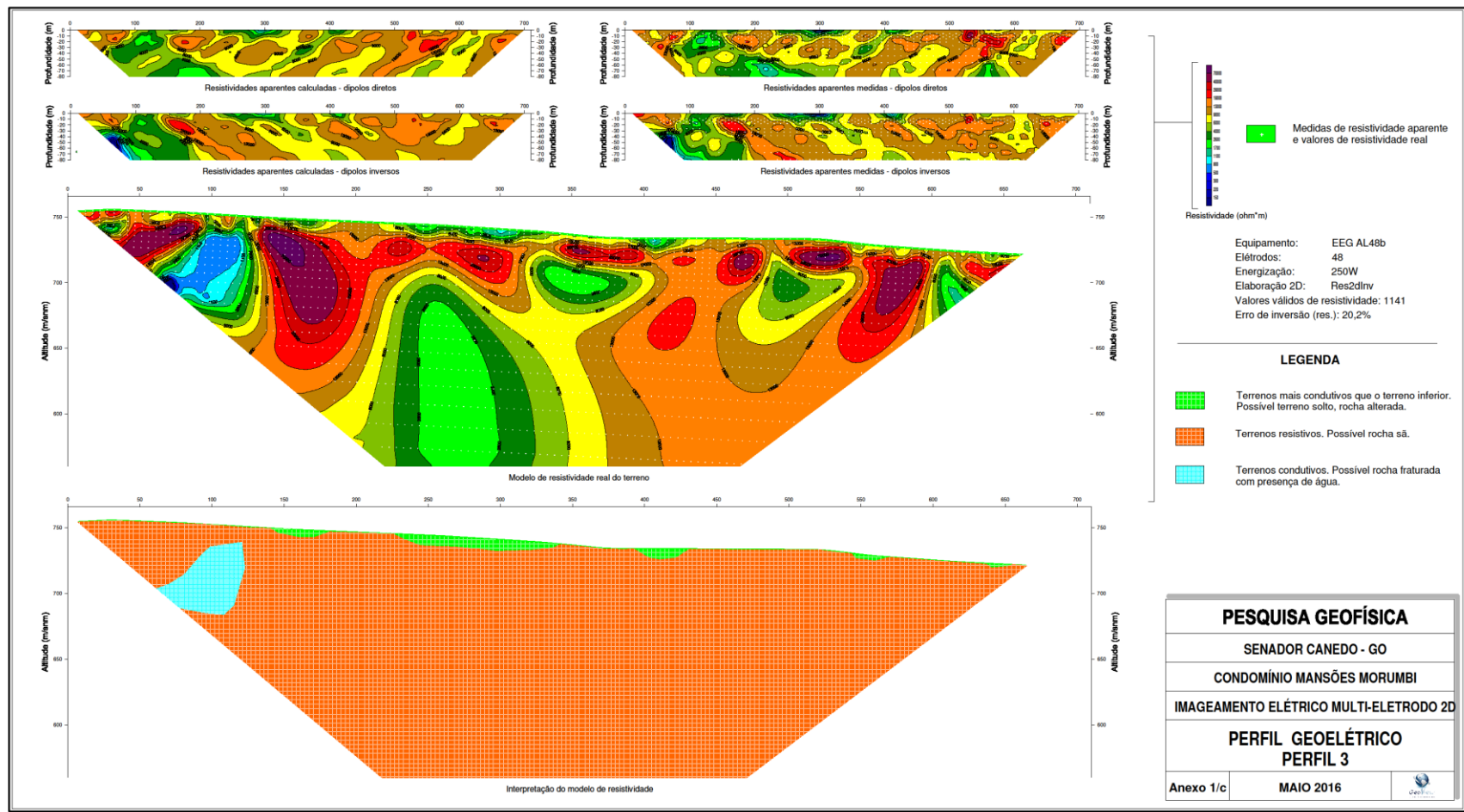


Figura 30 - (a) Modelo de resistividade real do terreno da linha 3 de pesquisa no Condomínio Mansões Morumbi em Aparecida de Goiânia (GO) e sua correspondente (b) perfil interpretado.

7. Discussão e Conclusões

Nas quatro regiões de estudo o perfil geoeletrico definiu bem as anomalias identificadas 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 Corumbaba (GO), realizados a passo 5 m entre cada eletrodo, e 2 m para o perfil em Moita Bonita (SE), Aparecida de Goiânia e Senador Canedo, Goiás, 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 de rochas sãs. Além disso, o método elétrico 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. Isso também foi observado nas seções elétricas em Senador Canedo, cujas imagens de resistividade elétrica permitiram identificar, na parte superior dos perfis, as espessuras do solo (14-17 m), como anteriormente relatado para a área.

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 geoeletrica 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 Corumbaba 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. Na escola Dom Fernando foi relatado pela empresa de perfuração que na região há vazões de cerca de 1 a 1,2 m³/h, com raros casos de 20 m³/h, e através da geofísica foi atingido o valor de 4 m³/h.

Há outras interessantes técnicas que podem ser usadas em conjunto com o imageamento elétrico para aumentar a efetividade da ferramenta geofísica em localizar poços tubulares úteis, como por exemplo por emanção de Rn em zona de falha, como INCEOZ et al., 2006 na Turquia, e, HIODO et al., 2003, em Itu (SP), que indicou que a emanção de radônio aumentou expressivamente próximo à zona de fratura.

Diante do exposto, conclui-se que o uso da técnica geoeletrica de imageamento elétrico multi-eletrodos a geometria variável, associada a informações baseadas em critérios geológicos, mostrou-se eficiente na detecção de zonas de interesse para captação de águas subterrâneas.

8. Referências

- ABAS – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, Educação. Disponível em: <<http://www.abas.org/educacao.php>>. Acesso em 20 de junho de 2016.
- Agência Nacional de Águas – ANA. Conjuntura dos Recursos Hídricos do Brasil. Brasília, DF, 2013.
- AMINU, M. B.; AKANDE, T. M.; ISHOLA, O. A. *2D Geoelectric Imaging of the Uneme-Nekhwa Fracture Zone. International Journal of Geophysics*, vol. 2014, ID 842812, 8 páginas, 2014.
- Applied Geophysics for Groundwater Studies. Disponível em <<http://www.st-andrews.ac.uk/~crb/web/GWATER1.pdf>>. Acesso em 13 de julho de 2016.
- Associação Brasileira de Águas Subterrâneas – ABAS. Furo na Lei. Revista Águas Subterrâneas, ano 1, ed. 1, outubro de 2007.
- BRAGA, A. C. de O. Geofísica Aplicada: Métodos Geométricos em Hidrogeologia. Oficina de Textos, São Paulo, 2016.
- DOBRIN, M. B. *Introduction to geophysical prospecting. McGraw-Hill Book Company*, 3^o edição, 1976.
- FERREIRA, F. J. F. & STEVANATO, R. Abastecimento dos Campi da UFPR por Água Subterrânea com Base em Imageamento Elétrico 2-D e Fotointerpretação. *8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society*, Rio de Janeiro, Brasil, 14-18 de setembro de 2003.
- FREITAS, M. A.; ROISENBERG, A.; ANDRIOTTI, J. L. S. Análise Exploratória de Dados da Condutividade Elétrica nas Águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2016.
- GALLAS, J. D. F. & GIARDIN, A. Eletroresistividade na Prospecção de Aquíferos Fraturados. *Águas Subterrâneas*, vol. 30, n^o 1, pág. 119-138, 2016.
- GALLAS, J. D. F. & VERMA, O. P. Resistividade e Polarização Induzida (IP) – Modelagem Analógica. *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 24, n^o 1, pág. 25-35, 2006.
- GALLAS, J. D. F. Prospecção de Água Subterrânea em Aquíferos Cristalinos com o Emprego de Métodos Indiretos. *Revista do Instituto Geológico*, vol. 24, n^o 1/2, pág. 43-51, São Paulo, 2003.
- GALVÃO, T. D. L.; PORSANI, M. J. Aplicação do Método de Sondagens Elétricas Verticais na Avaliação da Resistividade da Subsuperfície em Área de Cultivo de Eucalipto (*Eucalyptus Grandis*). II^o Congresso Internacional do Meio Ambiente Subterrâneo.
- GANDOLFO, O. C. B. & GALLAS, J. D. F. O Arranjo Polo-Dipolo como Alternativa ao Dipolo-Dipolo em Levantamentos 2D de Eletroresistividade. *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 25, n^o 3, pág. 227-235, 2007.
- Grant, F. S. & West, G. F. *Interpretation Theory in Applied Geophysics. McGraw-Hill Book Company*, abril de 1965.
- KEAREY, P.; BROOKS M.; HILL I. Geofísica de Exploração. Tradução por Maria Cristina Moreira Coelho. Oficina de Textos, São Paulo, 2002.

- KIRSCH, R. Groundwater Geophysics – A Tool for Hydrogeology. 2nd edição. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2006, 2009.
- LOKE, M. H. Constrained Time-Lapse Resistivity Imaging Inversion. Universiti Sains Malaysia, Penang, Malaysia.
- LOKE, M. H. Electrical Resistivity Surveys And Data Interpretation. Geotomo Software Sdn. Bhd., Gelugor, Penang, Malaysia.
- LOKE, M. H.; ACWORTH, I.; DAHLIN, T. A Comparison of Smooth and Blocky Inversion Methods in 2D Electrical Imaging Surveys. *Exploration Geophysics*, vol. 34, pág. 182–187, 2003.
- LOPES, R. O.; SILVA, A. B. H.; CARNEIRO, P. J. R. Estudo de Caso: o Uso do Método Geofísico para Locação de Poços Tubulares em Rorainópolis – RR. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004.
- MADRUCCI, V.; TAIOLI, F.; ARAÚJO, C. C. Análise Integrada de Dados de Sensoriamento Remoto, Geologia e Geofísica no Estudo de Aquífero Fraturado, Lindóia – SP. *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 23, n° 4, pág. 437-451, 2005.
- MARINHO, J. M. L.; CORDEIRO, W.; VASCONCELOS, S. M. S.; SOUZA, M. L. Estudos Hidro-Estratigráficos da Bacia do Araripe, Ceará, Utilizando Eletroresistividade. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.
- MATOS, D. M. & MENDES R. L. R. Mapeamento da Vulnerabilidade Natural de Aquífero a Partir do Método Eletroresistividade no Campus da Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA.
- MOREIRA, C. A.; CAVALHEIRO, M. L. D.; PEREIRA, A. M.; SARDINHA, D. S. Análise das Relações entre Parâmetros Geométricos e Vazões para o Aquífero Livre de Caçapava do Sul (RS). Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2013.
- NAVARRO, G. R. B.; ZANARDO, A.; CONCEIÇÃO, F. T. O Grupo Araxá na Região Sul-Sudoeste do Estado de Goiás. *Geologia USP, série científica*, v. 13, n° 2, pág. 5-28, junho de 2013.
- NGUYEN, F.; GARAMBOIS, S.; JONGMANS, D.; PIRARD, E.; LOKE, M.H. Image processing of 2D resistivity data for imaging faults. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 57, pág. 260–277, 2005.
- NIGM, A. A. *Geoelectric Study for Water Well Location in the Campus of Taif University, Taif, Saudi Arabia. International Journal of Water Resources and Arid Environments*, vol. 2, n° 4, pág. 195-204, 2013.
- O Nó da Água. *Revista Planeta*, ano 42, edição 497, abril de 2014.
- OGILVY, R. D.; MELDRUM, P. I.; KURAS, O.; WILKINSON, P. B.; CHAMBERS, J. E.; SEM, M.; PULIDO-BOSCH, A.; GISBERT, J.; JORRETO, S.; FRANCES, I.; TSOURLOS, P. Automated Monitoring of Coastal Aquifers with Electrical Resistivity Tomography.
- OLIVEIRA, A. F. Licenças para perfurar poços em SP aumentam 82% em 2015. Disponível em: <<http://ultimosegundo.ig.com.br/brasil/seca/2015-03-25/licencas-para-perfurar-pocos-em-sp-aumentam-82-em-2015.html>>. Acesso em 3 de junho de 2016.

OLIVEIRA, J. F. & CASTELO BRANCO, R. M. G. Contribuições da Eletroresistividade na Caracterização Geométrica dos Aquíferos na Região Metropolitana de Fortaleza. 1st Joint World Congress on Groundwater.

PARASNIS, D.S. *Principles of Applied Geophysics*. Springer Netherlands, 1996.

PEREIRA, C. M. A. Mapeamento de Aquíferos Fraturados Empregando Métodos Geométricos e Emissão Natural de Radônio. 2009. Dissertação (Mestrado), Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG, Universidade de São Paulo (USP).

QUEIROZ, C. L.; MENESES, P. R.; JOST, H. Lineamentos em Imagens de Sensores Remotos e seu Significado Estrutural nos Terrenos Granito-Greenstone Belt De Orixás (GO). Revista Brasileira de Geociências, vol. 30, nº 4, pág. 655-662, 2000.

Revista Mundo Estranho, Como Funcionam as Forquilhas para Achar Água? Disponível em <http://mundoestranho.abril.com.br/materia/como-funcionam-as-forquilhas-para-achar-agua>. Acesso em julho de 2015.

RIBEIRO, J. A.; FEITOSA, F. A. C.; OLIVEIRA, J. F.; FILHO, O. A. S.; FEITOSA, E. C. Zonas (Eixos) Condutivas em Rochas Cristalinas na Região de Irauçuba, Norte do Estado do Ceará, Brasil. Revista Águas Subterrâneas, nº 17, maio de 2003.

RODRIGUES, A. P.; ALMEIDA, L.; RESENDE, L.; MAGALHÃES, L. F.; SÁ, M. A. M.; CAMPOS, J. E. G. Caracterização do Meio Físico, dos Recursos Minerais e Hídricos - Município de Aparecida de Goiânia – GO. Governo do Estado de Goiás, Secretaria de Indústria e Comércio, Superintendência de Geologia e Mineração, Gerência de Geologia, Goiânia, 2005.

Sabesp, Poços artesianos. Disponível em <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=104>. Acesso em 03 de junho de 2016.

SAMOUELIAN, A.; COUSIN, I.; TABBAGH, A.; BRUAND, A.; RICHARD, G. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil & Tillage Research*, vol. 83, pág. 173–193, setembro de 2005.

SHIRAIWA, S.; MACHADO, C. A. M.; CUTRIM, A. O.; SALOMÃO, F. X. T. Geofísica Aplicada no Mapeamento do Topo do Aquífero Freático de uma Vertente em Campo Verde, MT. XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços.

SILVA, K. M. O Perigo do Uso Indiscriminado dos Poços Artesianos - Uma Abordagem Hídrica. Disponível em <http://portal.rebia.org.br/agua/4950-o-perigo-do-uso-indiscriminado-dos-pocos-artesianos-uma-abordagem-hidrica>. Acesso em 03 de junho de 2016.

TELFORD, W. M. *Applied geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1976.

UHLEIN, A.; CAXITO, F. A.; SANGLARD, J. C. D.; UHLEIN, G. J.; SUCKAU, G. L. Estratigrafia e tectônica das faixas neoproterozóicas da porção norte do Craton do São Francisco. *Geonomos*, vol. 19, nº 2, Edição Especial - 30 Anos do CPMTCC, pág. 8-31, 2011.

XAVIER, F. F. Aplicação da Sondagem Geométrica – Método Eletroresistividade - na Localização de Poços Tubulares Profundos. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004.