

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
*Campus de Rio Claro*

André Felipe Gonçalves De Mario

Estudo de Viabilidade Hidrogeológica Através de Métodos Geofísicos  
no Condomínio Villa Verde, Araçariguama-SP.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto  
de Geociências e Ciências  
Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade  
Estadual Paulista Júlio de  
Mesquita Filho, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Mestre em Geologia  
Regional

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Dourado

Rio Claro - SP

2010

André Felipe Gonçalves De Mario

Estudo de Viabilidade Hidrogeológica Através de Métodos Geofísicos  
no Condomínio Villa Verde, Araçariguama-SP.

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Instituto de Geociências e Ciências  
Exatas do Campus de Rio Claro, da  
Universidade Estadual Paulista Júlio de  
Mesquita Filho, como parte dos requisitos  
para obtenção do título de Mestre em  
Geologia Regional

Comissão Examinadora

---

---

---

Rio Claro, SP \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

A minha família e amigos que estiveram próximos.

“Pensamos em demasia e sentimos bem pouco, mais  
do que de máquinas, precisamos de humanidade”

Charlie Chaplin

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer primeiramente aos Docentes do curso de Geologia que me deram apoio e possibilitaram a oportunidade de cumprir os créditos das matérias exigidas pelo programa de Pós Graduação. Com Agradecimentos especiais aos Professores: Luiz Simões, Noberto Morales, Ricardo Sturaro, Antenor Zanardo e Landim.

Agradeço ao Prof. Dr. Dourado pela ajuda, idéias e orientação prestada sempre com muito dispor, agradeço também pela compreensão e ajuda para a viabilização do cumprimento do programa, que foi corrido.

A turma de campo segue meus sinceros agradecimentos pelo empenho nos trabalhos de campo, então muito obrigado pela ajuda Paco, Pocay e Carlos (Zorba). Lembro aqui também do Iata que me deu grande ajuda na entrega do relatório parcial e o Zorba que esta me ajudando hoje na entrega da versão final.

Em um fechamento de trabalho corrido com atividades sobrepostas gostaria de agradecer em especial ao meu Pai (Vinicius), ao meu amigo Guilherme (dimi) e minha irmã (Camila) pela ajuda nas correções, formatações de texto de figuras, que me deram um tempo valioso para realizar o fechamento deste trabalho.

Aproveito para agradecer aqui aos meus colegas de trabalho da Coffey e meus gerentes Geraldo Santos e Bernardo Viana pela compreensão e ajuda no ajuste do cronograma de trabalho, possibilitando desta forma a realização desta dissertação.

Para finalizar agradeço aos meus amigos da geologia de Rio Claro, da geologia da Coffey e de Cosmópolis pelos momentos de descontração nos botecos e as valiosas conversas que nos ajudam a fugir do stress quando estamos sob pressão. E um pouco antes de finalizar agradeço a minha mãe pela compreensão e apoio nesta vida corrida que tive nos últimos dois anos.

## Sumário

Sumário.....	vi
Lista de Figuras .....	xi
Lista de Tabelas .....	xv
Lista de Símbolos e Abreviações .....	xvi
Abstract.....	xviii
Resumo .....	xix
<b>1</b> <b>Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1    Localização e Vias de Acesso.....	2
1.2    Aspectos Fisiográficos .....	3
<b>2</b> <b>Objetivos</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b> <b>Metodologia de Trabalho</b> .....	<b>6</b>
3.1    Pesquisa Bibliográfica .....	6
3.2    Pesquisa, Levantamento e Integração de Dados em GIS.....	6
3.3    Mapeamento Geológico .....	7
3.4    Ground Penetration Radar (GPR).....	7
3.5    Sondagem Elétrica Vertical .....	8
3.6    Caminhamento Elétrico .....	9
3.7    Integração dos Dados.....	9
<b>4</b> <b>Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>11</b>
4.1    Geofísica .....	11
4.2    Radar de Penetração no Solo – GPR “Ground Penetrating Radar” .....	12
4.2.1    Introdução.....	12
4.2.2    Histórico .....	13
4.2.3    Ondas eletromagnéticas.....	14
4.2.4    Propagação das Ondas Eletromagnéticas .....	16
4.2.5    Coeficientes de Reflexão.....	19

4.2.6	Velocidade de propagação da onda eletromagnética (EM).....	20
4.2.7	Sondagem de Velocidade WARR .....	23
4.2.8	Perfil GPR (Radargrama) .....	24
4.2.9	Limitações da Técnica GPR .....	25
4.3	Métodos Elétricos .....	27
4.3.1	Resistividade.....	28
4.3.2	Resistividade de rochas e minerais .....	29
4.3.3	Medição da Resistividade no Solo .....	30
4.3.4	Sondagem Elétrica Vertical (SEV).....	33
4.3.5	Caminhamento Elétrico (CE) .....	34
4.3.5.1	Arranjo Schlumberger .....	35
4.3.5.2	Arranjo Dipolo-Dipolo .....	35
4.3.6	Limitações do Método de Resistividade.....	37
4.4	Aquíferos Fraturados .....	38
4.4.1	Formas de Ocorrência.....	39
4.4.2	Fluxo da água no manto de intemperismo.....	39
4.4.3	Fluxo da água subterrânea em meio fraturado.....	41
4.4.4	Descontinuidades .....	43
4.4.5	Zonas de Cisalhamento.....	45
5	Aspectos Geológicos .....	46
5.1	Geologia Regional .....	46
5.1.1	Província Mantiqueira .....	46
5.1.2	Terrenos Apiaí, São Roque e Embu .....	47
5.1.3	Grupo São Roque .....	47
5.1.3.1	Filitos.....	48
5.1.3.2	Xistos.....	48
5.1.3.3	Quartzitos .....	49

5.1.3.4	Metaconglomerados .....	49
5.1.3.5	Metassedimentos Psamíticos.....	49
5.1.3.6	Mármore .....	49
5.1.3.7	Rochas Cálcio-Silicáticas.....	50
5.1.3.8	Metabasitos e Anfibolitos.....	50
5.1.3.9	Rochas Metavulcânicas Ácidas.....	50
5.1.4	Granitóides .....	50
5.1.5	Grupo Serra do Itaberaba.....	51
5.1.5.1	Formação Pirucaia.....	51
5.1.5.2	Formação Nhanguçu .....	51
5.1.5.3	Formação Morro da Pedra Preta.....	52
5.2	Geologia Local.....	53
5.2.1	Coberturas.....	54
5.2.1.1	Solo Arenoso .....	55
5.2.1.2	Solo Siltoso .....	56
5.2.1.3	Solo Vermelho.....	56
5.2.2	Granitóide São Roque.....	57
5.2.3	Grupo São Roque .....	59
5.2.3.1	Metapelitos e Metassiltitos.....	59
5.2.3.2	Mica Quartzo Xisto .....	59
5.2.4	Grupo Serra do Itaberaba.....	60
5.2.4.1	Metatufo .....	60
5.2.4.2	Metacalcário .....	61
5.2.4.3	Quartzo Mica Xisto .....	62
5.2.4.4	Xisto Grafítico .....	64
5.3	Geologia Estrutural .....	64
5.3.1	Zonas de Cisalhamento.....	65



5.3.2	Estruturas Macroscópicas .....	67
5.3.3	Estruturas Mesoscópicas .....	69
5.3.3.1	Foliação S1 .....	69
5.3.3.2	Faturas.....	70
6	Integração dos Dados.....	71
6.1	Estruturas Favoráveis.....	73
6.2	Classificação dos Poços .....	73
6.3	Cruzamento dos Dados .....	74
6.4	Mapa de Potencial.....	76
6.5	Programação de Geofísica .....	78
7	Ensaio Geofísicos.....	79
7.1	GPR.....	80
7.1.1	GPR-01 .....	81
7.1.2	GPR-02 .....	83
7.1.3	GPR-03 .....	85
7.2	Sondagem Elétrica Vertical (SEV).....	86
7.2.1	Seção 01_04.....	87
7.2.2	SEV 02 e 03.....	90
7.2.3	SEV 05.....	92
7.3	Caminhamento Elétrico .....	94
7.3.1	Caminhamento CE01.....	95
7.3.2	Caminhamento CE03 e CE04.....	97
7.3.3	Caminhamento CE02.....	98
8	Considerações Finais .....	99
8.1	Aspectos Geológicos.....	99
8.2	Aspectos Estruturais .....	99
8.3	Integração dos Dados .....	100

8.4	Geofísica .....	101
9	Referências Bibliográficas.....	103
	ANEXO 1- Mapa Geológico Estrutural .....	108
	ANEXO 2- Mapa de Pontos Geológicos.....	109
	ANEXO 3 – Planilha de Pontos Geológicos .....	110
	ANEXO 4 – Estruturas Extraídas de Imagem de Satélite em Ambiente GIS .....	111
	ANEXO 5 – Gráficos do Tipo Log – SEV.....	112
	ANEXO 6 – Planilhas de Aquisição – Caminhamento Elétrico (CE).....	113
	ANEXO 7 – Planilhas de Aquisição de Sondagem Elétrica Vertical.....	114
	ANEXO 8 – Pseudosecções de Caminhamento Elétrico .....	115
	ANEXO 9 – CURVAS MODELADAS – SEV .....	116
	ANEXO 10 – Dados dos Poços - DAAE .....	117

## Lista de Figuras

Figura 1_1 – Mapa de índice de qualidade da água na bacia dos rios Sorocaba e Médio Tietê (modificado de <a href="http://www.rededasaguas.org.br/comite/comite_05.asp">http://www.rededasaguas.org.br/comite/comite_05.asp</a> ).	1
Figura 1_2 – Localização da área de estudo e do município de Araçariguama.	3
Figura 4_1 – Organograma dos Métodos Geofísicos Aplicados (Modificada de Gandolfo, 1999).	12
Figura 4_2 – Esquema de uma interface de reflexão simples de camadas paralelas e planas.	22
Figura 4_3 – Eventos idealizados a partir do tempo de chegada em função da separação das antenas numa sondagem do tipo WARR (adaptado de Annan, 1992).	24
Figura 4_4 – Perfil GPR, no eixo horizontal a distancia em metros e no eixo vertical o tempo duplo de propagação em nanosegundos.	25
Figura 4_5 – Parâmetros para definição de resistividade (Kearey, Brooks e Hill, 2002).	28
Figura 4_6 – Resistividade teórica para alguns tipos de rocha (Adaptado de Kearey, Brooks e Hill, 2002).	29
Figura 4_7 – Fluxo da corrente (Modificado de Kearey, Brooks e Hill, 2002).	31
Figura 4_8 – Medição das diferenças de potencial (Braga).	31
Figura 4_9 – Configuração Wenner (Kearey, Brooks e Hill, 2002).	33
Figura 4_10 – Configuração Schlumberger (Kearey, Brooks e Hill, 2002).	34
Figura 4_11 – Projeção do sistema de leitura em campo (Braga).	37
Figura 4_12 – Exemplo de plotagem do arranjo de campo dipolo-dipolo, com os valores de resistividade aparente conforme a profundidade teórica de cada nível (Braga).	37
Figura 4_13 – Modelo conceitual do aquífero de Malawi (Neves, 2005 apud Chilton e Smith – Carington, 1984 e Foster, 1984. Modificado por Chilton e Foster, 1995).	40
Figura 4_14 – Gráfico de condutividade hidráulica em relação a abertura da fratura (Fernandes, 2008).	42
Figura 4_15 – Gráfico de relação entre a densidade de fratura e a permeabilidade do maciço (Fernandes, 2008).	43
Figura 4_16 – Modos de propagação de fraturas de extensão (Fernandes, 2008).	44

Figura 4_17 –. Posição espacial das fraturas em relação aos tensores de deformação (Fernandes, 2008).	44
Figura 4_18 –. Variação da permeabilidade em falhas que se encontram em vários estágios de desenvolvimento, do inicial (esquerda) para o mais (direita) desenvolvido (Fernandes 2008).	45
Figura 5_1 –. Província Mantiqueira e seus orógenos (Adaptado de Almeida et all., 1981).	46
Figura 5_2 –. Mapa geológico elaborado para a área de estudo).	54
Figura 5_3 –. Afloramento de granito com solo amarelo a laranja arenoso no topo e preenchendo grandes fraturas.	55
Figura 5_4 –. Afloramento de xisto com um solo amarelo centimétrico recobrimdo a rocha.	56
Figura 5_5 –. Contato entre solo amarelo siltoso com solo vermelho no outro lado do vale (linha vermelha).	57
Figura 5_6 –. Matações de granitóide no pasto.	58
Figura 5_7 –. Matações de granitóide cinza com fenocristais de feldspato potássio.	58
Figura 5_8 –. Afloramento de metassilito foliado de coloração vermelha clara.	59
Figura 5_9 –. Afloramento de xisto laranja foliado.	60
Figura 5_10 –. Metatufo com a ocorrência de lápilis centimétricas (em vermelho).	61
Figura 5_11 –. Paredão de calcário, mina da Votorantim Cimentos.	62
Figura 5_12 –. Afloramento de quartzo mica xisto de coloração laranja.	63
Figura 5_13 –. Afloramento de quartzo xisto de coloração branca.	63
Figura 5_14 –. Xisto de coloração branca com lâminas de grafita.	64
Figura 5_15 –. (a) Direção do movimento tectônico regional durante o regime distensivo com as principais estruturas formadas, (b) elipsóides de tensão e (c) de deformação (Neves, 2005).	66
Figura 5_16 –.(a) Direção do movimento tectônico regional durante o regime transcorrente com as principais estruturas formadas, (b) elipsóides de tensões e (c) de deformação (Neves, 2005).	66
Figura 5_17 –. Imagem LANDSAT 7 com os lineamentos interpretados.	67
Figura 5_18 –. Diagrama de roseta para os lineamentos interpretados em imagem de satélite.	68
Figura 5_19 –. Diagrama polar para as medidas de foliação S1 realizadas em campo.	69

Figura 5_20 –. Diagrama de roseta para os fraturamentos medidos em campo.	70
Figura 6_1 –. Exemplo de embaciamento controlado pela associação de estruturas e promovendo o acúmulo de depósitos aluviais (Neves, 2005).	72
Figura 6_2 –. Demarcação das regiões onde se verificou o cruzamento de estruturas.	73
Figura 6_3 –. Poços existentes na área (Fonte: DAAE)	74
Figura 6_4 –. Mapa geológico com os poços e alvos estruturais.	75
Figura 6_5 –. Mapa geológico com os alvos de potencial traçados.	76
Figura 6_6 –. Mapa de potencial de exploração hidrogeológico para a área de estudo.	77
Figura 7_1 –. Localização dos ensaios geofísicos realizados em campo.	80
Figura 7_2 –. Localização das linhas de GPR na área do condômino vila verde e sua relação com a geologia de superfície.	81
Figura 7_3 –. Perfil GPR da linha 1 processado no software Reflex.	82
Figura 7_4 –. Perfil GPR da linha 1 com as hipérboles e estruturas assinaladas e identificadas	83
Figura 7_5 –. Perfil GPR da linha 2 processado no software Reflex.	83
Figura 7_6 –. Perfil GPR da linha 2 com as hipérboles e estruturas assinaladas e identificadas.	85
Figura 7_7 –. Perfil GPR da linha 3 processado no software Reflex.	85
Figura 7_8 –. Perfil GPR da linha 3 com as hipérboles e estruturas assinaladas e identificadas.	86
Figura 7_9 –. Localização das sondagens elétricas realizadas.	87
Figura 7_10 –. Seção de sondagem elétrica vertical modelada, mostrando as interfaces geoeletricas modeladas	88
Figura 7_11 –. Afloramento de Granito com um bloco restrito por fraturas subhorizontais e subverticais	89
Figura 7_12 –. Pseudo-secção da SEV 01 e 04, mostrando uma mudança verticalizada na resistividade aparente	90
Figura 7_13 –. Sondagem elétrica vertical invertida (SEV 02), mostrando as interfaces geoeletricas modeladas	91
Figura 7_14 –. Sondagem elétrica vertical invertida (SEV 03), mostrando as interfaces geoeletricas modeladas	92

Figura 7_15 –. Sondagem elétrica vertical invertida (SEV 05), mostrando as interfaces geoeletricas modeladas	93
Figura 7_16 –. Localização das linhas de caminhamento elétrico	94
Figura 7_17 –. Secção de caminhamento elétrico (CE-01) modelada e com correção de topografia.	96
Figura 7_18 –. Secção de caminhamento elétrico (CE-03) invertida e com correção de topografia.	97
Figura 7_19 –. Secção de caminhamento elétrico (CE-04) invertida e com correção de topografia.	97
Figura 7_20 –. Secção de caminhamento elétrico (CE-02) invertida e com correção de topografia.	98

## Lista de Tabelas

- Tabela 4\_1 – Constante dielétrica  $K$  e condutividade elétrica  $\sigma$ , observadas nos materiais comuns para as frequências utilizadas no GPR (Modificada de Porsani, 1999). 18
- Tabela 4\_2 – Coeficientes de reflexão para quatro tipos de situações diferentes (Modificada de Porsani, 1999). 19
- Tabela 4\_3 – Materiais geológicos comuns com sua constante dielétrica ( $K$ ), condutividade elétrica ( $\sigma$ ), velocidade ( $V$ ) e atenuação ( $\alpha$ ) observadas nas frequências utilizadas no GPR (Porsani, 1999). 21
- Tabela 4\_4 – Frequência das antenas versus profundidade máxima de penetração. 26
- Tabela 4\_5 – Resistividade teórica para algumas rochas e minerais de minério (Adaptado de Kearey, Brooks e Hill, 2002). 30
- Tabela 4\_6 – Classificação hidrogeológica das rochas de Singhal e Grupta (1999) (Neves, 2005). 39

## Lista de Símbolos e Abreviações

AGC - Controle Automático de Ganho

CMP - “Common Mid Point”

DC - “Dewowing”

GPR - “Ground Penetrating Radar”

MHz - Megahertz ( $10^6$  Hz)

WARR - “Wide Angle Reflection and Refraction”

m - metro

Km - Kilometro

V1; V2; V3... - Velocidade da camada 1; 2; 3...

$\alpha$  - Atenuação

$\sigma$  - Condutividade elétrica

C - Velocidade da Luz

ns - nanosegundo ( $10^{-9}$  segundos)

mS - milisiemens ( $10^{-3}$  Siemens, unidade de  $\sigma$ )

$\vec{J}$  - Densidade de corrente de condução

$\vec{E}$  - Campo elétrico

f - Frequência

K - Constante dielétrica

$\epsilon$  - Permissividade do meio

$\epsilon$  - Permissividade do espaço vazio

EM - Eletromagnético

$\omega$  - Frequência angular

V - Velocidade de propagação das ondas EM para o GPR

V - Volt

Vrms - Velocidade quadrática média

Vmed - Velocidade media



SEV – Sondagem Elétrica Vertical

CE – Caminhamento Elétrico

## **Abstract**

*This work discuss the use of geophysics methods in the study of groundwater in the city of Araçariçuama – SP, specifically in the area of Condomínio Residencial Villa Verde that is geologically located over the São Roque granitoid and the shales of Serra do Itaberaba Formation. Because of this geological context, the considered aquifer model is fractured, making important emphasize the descontinuity in the structural characterization of bedrock.*

*There are in the Villa Verde two boreholes, the first one was done during the construction of Villa Verde and the second one was drilled in 2002 when the first borehole could not support the demand for water in Villa Verde anymore. After a geological and geophysical study in the area to determine the best location for the borehole, it was perforated but did not produced water.*

*Considering the problems with water in this area and the exploration difficulties of fractured aquifers, this work seeks the integration of geological and structural studies with dates boreholes in the region where the area is located. The aim is support the interpretation and program of geophysical survey.*

*This study had a practical focus that aimed the definition of potential structures able to have a fractured aquifer. The use here of geophysics as a resource to investigate these structures in the ground intend to be an auxiliary to evaluate the viability of defined target, which for this study were the “Condomínio Villa Verde”.*

## Resumo

*Este trabalho discute o emprego dos métodos geofísicos no estudo de águas subterrâneas no município de Araçariguama-SP na área do Condomínio Residencial Villa Verde que está geologicamente localizado sobre o Granitóide São Roque e os metassedimentos da Formação Serra do Itaberaba (xistos argilosos). Diante deste contexto geológico o modelo de aquífero considerado na área do condomínio é o fraturado, tornando-se importante a caracterização estrutural do maciço rochoso com ênfase nas discontinuidades.*

*No condomínio Villa Verde existem dois poços artesianos, sendo que o primeiro foi feito durante a construção do condomínio e o segundo poço foi perfurado em 2002, quando o consumo de água do condomínio se tornou maior que a capacidade de produção do primeiro poço. Após a realização de um estudo geológico e geofísico para determinar a melhor localização do poço na área do condomínio, ele foi locado e perfurado, mas o poço não produziu água.*

*Visando a problemática da água na região e as dificuldades de exploração em ambiente de aquífero fraturado, este trabalho buscou integrar estudos geológicos e estruturais com dados de poços perfurados na região, com o intuito de dar suporte à programação e interpretação dos ensaios geofísicos.*

*Os estudos desenvolvidos neste trabalho tiveram um foco prático e voltado para a definição de estruturas com potencial para abrigar um aquífero do tipo fraturado, utilizando a geofísica como ferramenta para investigar essas estruturas em subsuperfície, auxiliando na avaliação de viabilidade do alvo definido que, para este estudo, foi o Condomínio Villa Verde.*

## 1 Introdução

O crescimento urbano no estado de São Paulo foi intenso nos últimos 40 anos, acontecendo de maneira rápida e sem planejamento, principalmente na gestão de recursos hídricos. Este crescimento ocasionou um aumento significativo no consumo de água (uso humano e industrial), bem como na produção de esgoto, despejado nos rios sem tratamento.

A falta de gerenciamento destes recursos ocasionou a poluição dos rios e a busca de outras fontes de água potável, aumentando assim, a demanda por recursos hídricos subterrâneos e conseqüentemente, a quantidade de poços artesianos perfurados. Esta crescente demanda está motivando diversos estudos sobre o tema e o surgimento de empresas que atuam neste mercado promissor.

A área de estudo deste trabalho está localizada no município de Araçariguama – SP que integra o Comitê de Bacias Hidrográficas dos Rios Sorocaba e Médio Tietê, abrangendo 34 municípios, sendo que Araçariguama está situada na sub-bacia do Médio Tietê, onde a qualidade da água é classificada como péssima (Figura 1\_1), segundo o *site* do comitê da bacia.

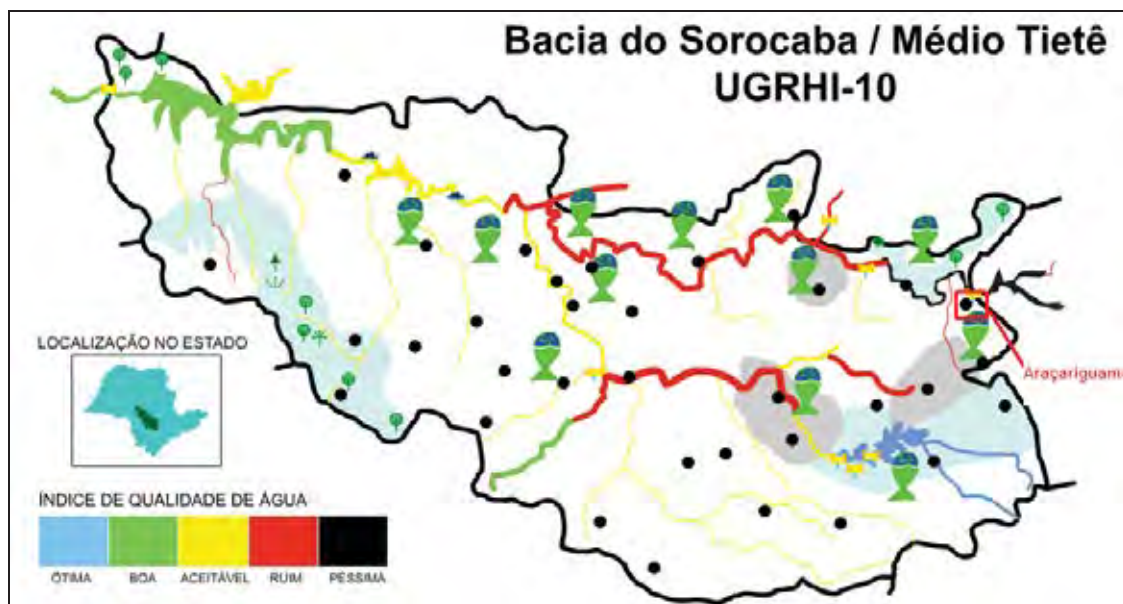


Figura 1\_1 – Mapa de índice de qualidade da água na bacia dos rios Sorocaba e Médio Tietê (modificado de [http://www.rededasaguas.org.br/comite/comite\\_05.asp](http://www.rededasaguas.org.br/comite/comite_05.asp)).

Geologicamente a área de estudo está localizada sobre o Grupo São Roque e os metassedimentos da Formação Serra do Itaberaba (quartzitos e xistos argilosos). A ocorrência de água subterrânea neste tipo de rocha ainda é pouco estudada e a sua complexidade é alta, mas o aumento do consumo de água, bem como o nível de poluição dos rios, vem motivando a exploração e o estudo deste tipo de recurso hídrico.

Esta crescente demanda por água de qualidade na região motivou diversas indústrias e condomínios residenciais a realizarem a exploração das rochas cristalinas, em busca de aquíferos do tipo fraturado. A ocorrência de água nestas rochas está condicionada a existência de fraturas que permitam a percolação e acumulação da água, sendo que a exploração destes aquíferos é muito errática, devido a sua complexidade, sendo comum em dois poços próximos uma diferença muito grande de vazão, ou entre o sucesso e insucesso na obtenção de água.

O condomínio residencial Villa Verde, localizado no município de Araçariguama (Figura 1\_2) é um exemplo deste caso, tendo realizado dois poços artesianos em suas dependências a cerca de 500 metros um do outro. O primeiro poço perfurado obteve sucesso na interceptação de água, mas com o aumento da demanda sua vazão se tornou insuficiente, motivando assim a perfuração de um segundo poço, que foi seco.

O caso do condomínio Villa Verde motivou a realização deste estudo que pretende aplicar os métodos geofísicos como uma ferramenta no estudo de águas subterrâneas, mostrando que para uma boa interpretação dos resultados é necessário o conhecimento geológico e estrutural do maciço, que aliados aos dados históricos de exploração, podem nortear em relação às características do sucesso e insucesso na exploração destes aquíferos.

### **1.1 Localização e Vias de Acesso**

A área de estudo está localizada na região leste do estado de São Paulo, a cerca de 50 Km da cidade de São Paulo. A área foco deste trabalho é o Condomínio Villa Verde, localizado a norte do município de Araçariguama, onde foram realizados os ensaios geofísicos (Figura 1\_2).

O acesso a partir de São Paulo (Capital) é feito através da rodovia Castelo Branco, sentido oeste, até o município de Araçariguama, onde se segue por uma estrada

municipal que liga Araçariguama a Pirapora do Bom Jesus, o condomínio está a cerca de 5 km de Araçariguama seguindo sentido Pirapora.

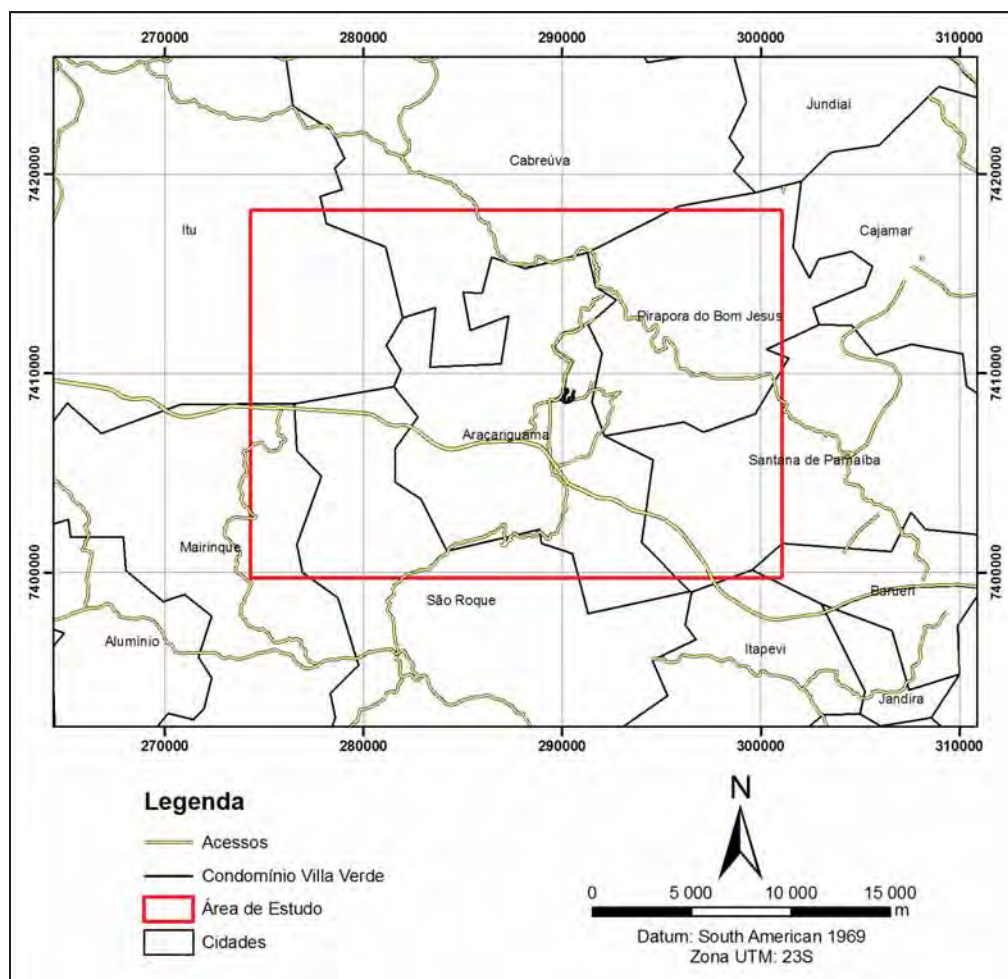


Figura 1\_2 - Localização da área de estudo e do município de Araçariguama.

## 1.2 Aspectos Fisiográficos

A região de Araçariguama possui um clima classificado como subtropical úmido, segundo a classificação climática de Köppen, com temperaturas variando de 22<sup>o</sup> a 33<sup>o</sup> C, registrando temperatura média de 30<sup>o</sup> C (Fonte: Prefeitura de São Roque, <http://www.saoroque.sp.gov.br>).

As principais drenagens existentes na região são os rios Tietê, Sorocaba e o Ribeirão Araçariguama, que corta o município no sentido leste-oeste aproximadamente.

A vegetação nativa foi desmatada em praticamente sua totalidade na área de estudo e substituída por plantações de eucalipto, pinus e pastagens. As áreas de cultivo são restritas a pequenas chácaras e sítios e a vegetação nativa só é vista no alto de algumas

serras e junto às drenagens, sendo constituída por uma mata tropical de médio porte, que por vezes, ainda preserva parte da fauna silvestre (<http://www.saoroque.sp.gov.br>).

Geomorfologicamente a área de estudo está inserida no planalto São Roque-Jundiaí que é marcado pela ocorrência de serras de topos aplainados a levemente aguçados com encostas levemente convexas, com a presença de blocos soltos. Os vales possuem largura reduzida e são controlados por falhamentos, tendo no geral a geometria em “V”, eles são pouco preenchidos, predominando a presença de cascalhos e blocos (FERNANDES, 2000).

De uma maneira geral o relevo na região de São Roque apresenta formas mais alongadas intercaladas com cristas mais elevadas, com predominância de colinas geradas pelos falhamentos locais.

## 2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é aplicar os métodos geofísicos no estudo de águas subterrâneas nas dependências do condomínio Villa Verde, realizando a interpretação dos dados geofísicos com base no conhecimento geológico e estrutural da área. Pretendeu-se também realizar a integração desses resultados aos dados históricos de exploração, com o intuito de transmitir uma visão clara sobre as possibilidades de se obter sucesso na exploração de um aquífero.

Portanto para atingir este objetivo, realizou-se:

- Caracterização geológica e estrutural da área de estudo através de trabalhos de campo e pesquisa bibliográfica;
- Levantamento da localização dos poços existentes na região de estudo e sua relação com a geologia local;
- Realização dos ensaios geofísicos e interpretação dos resultados;
- Integração e interpretação dos dados levantados e estudos realizados.



### **3 Metodologia de Trabalho**

Neste tópico serão apresentadas as etapas desenvolvidas neste trabalho, com a metodologia adotada na execução das mesmas.

#### **3.1 Pesquisa Bibliográfica**

Consistiu em adquirir conhecimentos teóricos através da pesquisa bibliográfica, leitura e análise de trabalhos das seguintes áreas de conhecimento:

- Geologia Regional;
- Geologia Estrutural do Complexo São Roque;
- Prospecção geofísica de águas subterrâneas;
- Informações sobre poços existentes (DAAE);
- Classificação de aquíferos fraturados;
- Geofísica Básica e Aplicada (GPR, SEV e CE).

#### **3.2 Pesquisa, Levantamento e Integração de Dados em GIS**

Nesta etapa de trabalho foi montada uma base de dados geológicos, prospectivos e de sensoriamento remoto, em formato GIS. Este trabalho foi realizado antes do início dos trabalhos de campo e contemplou os seguintes itens:

- CPRM – Mapa Geológico ao Milionésimo: foram integrados dados desta fonte referente às unidades geológicas e as principais estruturas;
- Base Cartográfica do IBGE ao Milionésimo: foram integrados os dados desta fonte referentes a hidrografia (rios e drenagens), logística (rodovias, ferrovias, principais cidades) e divisão política (limites estaduais e municipais);
- Vetorização dos dados: foi realizado um trabalho de vetorização para auxiliar o trabalho de campo, possibilitando a criação de mapas com *layout* mais leve, favorecendo a leitura e ressaltando o tema do mesmo. Foram vetorizados dados de curvas de nível, drenagens, acessos e toponímias, contidos nas cartas topográficas e na planta do condomínio;

- Sensoriamento Remoto: objetivando disponibilizar imagens que auxiliem nos trabalhos de campo e na interpretação preliminar dos dados, foram geradas composições coloridas da imagem LANDSAT 7, que foi utilizada para a retirada dos principais lineamentos;
- Integração dos dados de campo a base de dados GIS.

### **3.3 Mapeamento Geológico**

O mapeamento geológico foi realizado em duas campanhas de campo que totalizaram 8 dias de trabalhos de mapeamento geológico/estrutural, onde foram descritos 83 pontos geológicos em uma área de aproximadamente 100Km<sup>2</sup>.

O mapeamento geológico foi realizado em escala regional e os dados geológicos foram devidamente georreferenciados em campo através do uso de GPS de mão e posteriormente registrados no banco de dados com a observação das seguintes feições geológicas principais:

- Descrição macroscópica e tipológica sucinta das litologias (tipo, intemperismo, mineralogia, atração magnética etc);
- Coleta de dados estruturais (foliação, bandamento, fraturas etc)
- Documentação fotográfica;
- Contextualização geomorfológica.

Após os trabalhos de campo os dados foram inseridos em planilhas Excel e importados para o software ArcGis para a geração dos *shapes* de pontos e estruturas, os dados de campo foram integrados com os dados de sensoriamento e geofísica em ambiente GIS.

A partir deste levantamento de campo foi gerado o mapa geológico que serviu de base para a realização da programação dos trabalhos de geofísica.

### **3.4 Ground Penetration Radar (GPR)**

Os ensaios de GPR foram realizados com o equipamento RAMAC/MALA GeoScience do Departamento de Geologia Aplicada (DGA) da Unesp, *Campus* de Rio Claro-SP.

Foram realizadas três linhas de GPR na área do Condomínio Villa Verde com os seguintes parâmetros de aquisição:

- Antenas de 50Mhz;
- Espaçamento entre antenas de 2 metros;
- Leituras a cada 0,5 metros.

As linhas foram processadas no *software* Reflex, sendo executados os seguintes processamentos:

- Correção do tempo zero de chegada da onda;
- Filtro Dewow (10);
- Filtro AGC (50);
- Os perfis foram plotados no modo pointmode;
- Foi atribuída, com base nas hipérboles analisadas, uma velocidade de 0,12m/ns para o meio geológico. Esta velocidade foi utilizada para o ajuste de profundidade dos perfis;
- Para a interpretação das hipérboles utilizou-se um método comparativo, onde foi testada a aderência das hipérboles detectadas no radargrama a diferentes velocidades.

### **3.5 Sondagem Elétrica Vertical**

Para a realização destes ensaios foi adotada a utilização do arranjo do tipo Schlumberger e para o controle de qualidade das leituras foi adotado o procedimento de embreagem em todas as leituras a partir de  $AB/2 = 10$ .

O equipamento utilizado foi o resistivímetro Bison, que mede o valor da diferença de potencial  $\Delta V$ , em função da corrente elétrica  $I$ , enviada pelo operador.

Para a interpretação e tratamento dos dados foi utilizado o *software* da universidade de Moscou IPIWin, sendo que as sondagens foram tratadas separadas e modeladas inicialmente utilizando a inversão automática.

A inversão automática foi gerada pelo software que fez simplesmente o ajuste de um modelo inicial para qualquer curva de campo. Após o ajuste feito pelo *software* os pontos de profundidade definidos foram reajustados através da análise morfológica das curvas e as profundidades e resistividades aparentes refinadas, buscando dar um caráter geológico à interpretação.

Após o ajuste do modelo, foi realizada a projeção dos limites das interfaces definidas na curva e sua profundidade calculada pela inversão com os valores de resistividade aparente plotados através de uma escala de cores definida pelo operador.

As planilhas com os cálculos e resultados da aquisição estão no Anexo 7. A modelagem das curvas e os seus respectivos gráficos do tipo log são apresentados no Anexo 5.

### **3.6 Caminhamento Elétrico**

Para a realização destes ensaios foi adotada a utilização do arranjo do tipo dipolo-dipolo com espaçamento de 20 metros com seis níveis onde havia espaço físico suficiente.

O equipamento para a realização destes ensaios foi o resistímetro Terrameter, que mede o valor da diferença de potencial  $\Delta V$ , dividido pela corrente elétrica  $I$ , enviada por ele.

Para a interpretação e tratamento dos dados foi utilizado o software RES2DINV, sendo que os caminhamentos foram tratados separadamente e modelados utilizando-se da inversão automática do software, que realiza diversas interações buscando o menor erro possível.

As planilhas com os cálculos e resultados da aquisição, resultados da inversão e as pseudo secções são apresentados nos anexos 6 e 8 deste trabalho.

### **3.7 Integração dos Dados**

Os trabalhos desenvolvidos na área de exploração hidrogeológica devem fazer a integração sistemática de dados geológicos, estruturais e de poços existentes para a determinação do potencial de exploração de água subterrânea, sendo que as

interpretações são amparadas na maioria das vezes utilizando-se somente um ou dois critérios.

Com o intuito de realizar uma interpretação que considere todos os fatores envolvidos o autor transportou uma metodologia utilizada para a definição de alvos de pesquisa mineral (ouro, ferro, cobre etc) para este estudo de potencial hidrogeológico, onde os fatores condicionantes e relevantes envolvidos são pontuados, sendo, 1 atribuído a fatores favoráveis e 2 a fatores não favoráveis.

Para este trabalho serão considerados os seguintes fatores:

- 1- Geologia favorável (a ocorrência de litotipos que possam abrigar um aquífero fraturado);
- 2- Estruturas favoráveis (a ocorrência de estruturas regionais favoráveis para abrigar água);
- 3- Poços existentes (se eles possuem uma vazão viável ou não).

Após a realização desta classificação os dados são cruzados e analisados e os alvos traçados e classificados com os seguintes critérios:

- Potencial Alto: serão considerados de alto potencial os alvos que possuem todos os critérios favoráveis;
- Potencial Moderado: serão considerados de moderado potencial os alvos que possuem dois critérios favoráveis;
- Potencial Baixo: serão considerados de baixo potencial os alvos que possuem somente um dos critérios favoráveis.

Nessa metodologia não serão gerados alvos para as regiões que possuam todos os fatores desfavoráveis.

## **4 Revisão Bibliográfica**

Neste capítulo serão discutidos os principais conceitos teóricos que embasam as atividades técnicas desenvolvidas para a execução deste trabalho.

### **4.1 Geofísica**

A geofísica é uma ciência que estuda as propriedades físicas da Terra e através das diferenças de comportamento físico encontradas no meio geológico, que pode ser considerado heterogêneo, determinar contatos entre diferentes tipos de rochas, solos, meios líquidos entre outras descontinuidades existentes no interior do planeta.

Podemos dividir as áreas de atuação da geofísica em duas, a primeira como geofísica básica ou pura e a segunda parte pertencente à geofísica aplicada. A geofísica básica concentra seus estudos no planeta Terra como um todo, estudando seu interior, composição, grandes descontinuidades, sismos, entre outros eventos em escala global; enquanto a geofísica aplicada se restringe a áreas menores de escala regional ou local, trabalhando com profundidades relativamente pequenas e se propondo a resolver problemas de ordem econômica e acadêmica enquanto a geofísica básica se restringe mais ao meio acadêmico (GANDOLFO, 1999).

Este trabalho se enquadra na área de estudos da geofísica aplicada (Figura 4\_1) e utilizará o método elétrico de resistividade (Sondagem Elétrica Vertical – SEV e Caminhamento Elétrico – CE) e Radar de Penetração no Solo – GPR. A teoria que envolve estes métodos é provinda da geofísica básica se diferenciando nos equipamentos utilizados e na metodologia dos ensaios de campo que foram adaptadas para realizar estudos mais superficiais. O uso destas técnicas é vantajoso por serem não invasivas e atualmente estão presentes em diversos trabalhos de geologia de engenharia, pequenas prospecções, geologia ambiental, arqueologia, entre outras áreas.

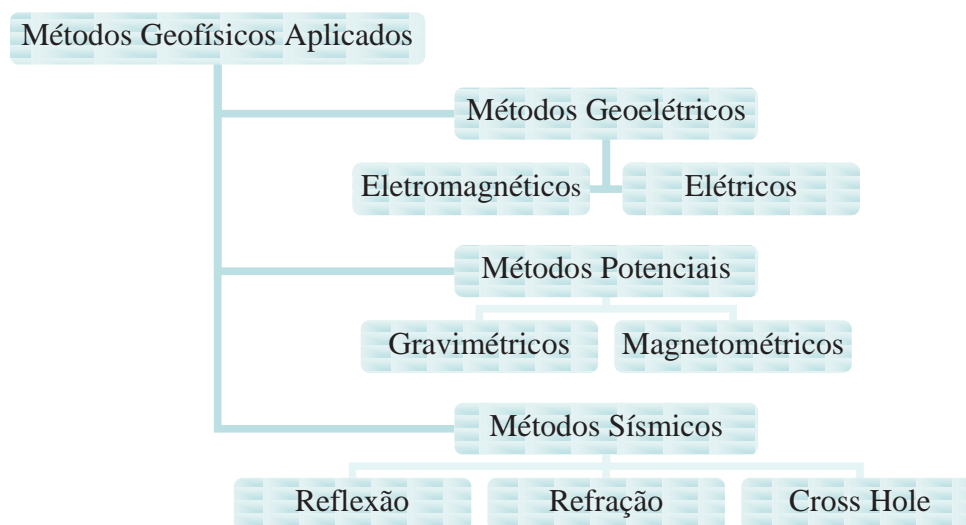


Figura 4\_1- Organograma dos Métodos Geofísicos Aplicados (Modificada de GANDOLFO, 1999).

## 4.2 Radar de Penetração no Solo – GPR “Ground Penetrating Radar”

### 4.2.1 Introdução

O GPR “Ground Penetration Radar” faz parte dos métodos eletromagnéticos e utiliza a emissão de ondas de rádio de alta frequência (intervalo entre 10 e 1000MHz) para estudar estruturas geológicas em subsuperfície e outras interferências artificiais promovidas pelo Homem, como objetos enterrados. Constituído de uma antena transmissora e outra receptora (modo bi-estático) obtém-se através do emprego desta técnica uma imagem de alta resolução de subsuperfície gerada em função do tempo (nanosegundos) chamada radargrama.

O conhecimento sobre o eletromagnetismo só foi possível após a unificação das teorias da eletricidade e do magnetismo, esta unificação foi realizada por Maxwell e ficou conhecida como as “Equações de Maxwell” que abrangem as leis de Gauss para os campos elétricos e magnéticos, a lei de Ampère e a Lei de Faraday (YOUNG & FREEDMAN, 2004). Estas equações são a base para o entendimento de como um

campo eletromagnético é emitido pelo equipamento e como é possível controlar e monitorar as variações das ondas eletromagnéticas em subsuperfície.

#### **4.2.2 Histórico**

Esta técnica foi difundida a partir da década de 90 com o avanço e a difusão da tecnologia digital e da informática, mas há referências do uso de técnicas similares com ondas de rádio na primeira metade do século passado como em 1929 na Alemanha, para determinar a espessura de uma galeria (PORSANI, 1999). Atualmente o emprego de ondas de rádio de alta frequência é conhecida como GPR – “Ground Penetrating Radar”, esta técnica é muito utilizada na investigação de alvos superficiais de diferentes origens, geológica e artificial (objetos enterrados, entre outras modificações efetuadas em subsuperfície).

Ao longo do século passado a técnica GPR foi utilizada para diversos estudos científicos como na determinação da espessura de placas de gelo no Ártico e Antártica, em levantamentos na Lua na missão Apollo 17, estudando estruturas em subsuperfície na Lua até 1,5Km de profundidade. As reflexões de radar na Lua permitiram determinar sua constante dielétrica em torno de 3 indicando um solo seco e poroso (PORSANI, 1999). Estes estudos na Lua renderam diversas publicações e a divulgação da técnica para a comunidade científica, mas na década de 70 as dificuldades ainda eram muito grandes para se aplicar esta técnica e seu custo era muito elevado.

Atualmente a técnica GPR é aplicada em diversas áreas com diferentes finalidades, sendo utilizada nas seguintes áreas de estudo e trabalho:

- Geologia básica: Estudos estratigráficos, estruturais e litológicos.
- Hidrogeologia: Determinação do nível d’água e paleocanais.
- Geotécnica: Estudo de cavidades, topo de rochas etc.
- Geologia Ambiental: Muito utilizada na localização e monitoramento de plumas de contaminação.
- Zonas Urbanas: Localização de objetos enterrados, galerias, canos etc.
- Arqueologia e Paleontologia: Localização de fósseis e artefatos.
- Militar: Localização de explosivos, túneis etc.



### 4.2.3 Ondas eletromagnéticas

Maxwell quando realizou o seu estudo em 1865, constatou que um campo elétrico variável é uma fonte que gera um campo magnético. Quando um campo elétrico ou magnético variar com o tempo, induzirá outro campo adjacente a variar também com o tempo, causando uma perturbação eletromagnética. Esta perturbação pode se propagar de uma região para outra do espaço, mesmo quando não existe nenhuma matéria na região. A perturbação no campo apresenta as características de uma onda que é chamada de onda eletromagnética que foi provada por Maxwell em 1865. São consideradas ondas eletromagnéticas as ondas de rádio, televisão, raios X, luz entre muitas outras (YOUNG & FREEDMAN, 2004).

Com a descoberta do eletromagnetismo Maxwell o descreveu através de 4 equações que veremos abaixo juntamente com a Lei de Ohm:

- Lei de Gauss (Campos Elétricos):

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} \quad (\text{Equação 1})$$

$E$  - Campo Elétrico

$A$  = Área

$Q$  = Carga

$\epsilon_0$  = Permissividade

- Lei de Gauss (Campos Magnéticos):

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (\text{Equação 2})$$

$B$  - Campo Magnético

$A$  - Área

- Lei de Ampère:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left( ic + \epsilon_0 \frac{d\Phi_e}{dt} \right) \quad (\text{Equação 3})$$

$B$  - Campo Magnético

$\epsilon$  - Permissividade

$\mu$  - Permeabilidade

$\Phi$  - Fluxo Magnético

- Lei de Faraday:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_b}{dt} \text{ (Equação 4)}$$

$\vec{E}$  - Campo elétrico

$t$  - Tempo

$\Phi$  - Fluxo Magnético

- Lei de Ohm:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

$\vec{J}$  - Densidade de corrente de condução

$\sigma$  - Condutividade elétrica

$\vec{E}$  - Campo elétrico

Estas equações são para campos elétricos e magnéticos no vácuo, no caso deste estudo tem-se a matéria presente que é o meio geológico, sendo preciso substituir os valores de permissividade dielétrica e permeabilidade magnética do meio. Combinando as equações de Maxwell obtemos a equação das ondas eletromagnéticas no meio geológico (rochas sedimentares, ígneas e metamórficas) que pode ser considerado semicondutor, esta equação agrupa as seguintes propriedades: condutividade elétrica, permissividade dielétrica, permeabilidade magnética e frequência. Devido a faixa de frequência trabalhada, de 10 KHZ a 1 GHZ (janela GPR) é possível simplificar estas expressões porque o campo se propaga sem apresentar dispersões, então obtemos a equação denominada de “Lossy dielectric médium” ( $\omega^2 m\epsilon > |i\omega m\sigma|$ ) ou meio

dielétrico de baixa perda que segundo Annan & Davis (1997), é a condição básica de funcionamento do método GPR.

A condutividade elétrica ( $\sigma$ ) é uma medida da competência do meio em conduzir corrente elétrica, ela é expressa em Siemens por metro (S/m) ou em mS/m, onde  $1\text{mS} = 10^{-3}\text{S}$ .

Permissividade dielétrica é a resistência que o campo elétrico encontra no meio para se propagar. Quanto menor for a permissividade maior será a facilidade da propagação do campo elétrico no meio, no vácuo o valor da permissividade é o menor possível e a velocidade de propagação é a maior possível.

#### ***4.2.4 Propagação das Ondas Eletromagnéticas***

A lei de Ohm no meio geológico relaciona a densidade de corrente de condução ( $\vec{J}$ ) ao campo elétrico ( $\vec{E}$ ), onde esta relação é quase linear e a constante de proporcionalidade é a condutividade elétrica ( $\sigma$ ). Os fatores mais importantes que governam a propagação das ondas eletromagnéticas em um determinado meio são a velocidade e atenuação da onda.

As ondas eletromagnéticas ao se propagarem no meio geológico dependem de suas propriedades elétricas como a condutividade elétrica, permeabilidade magnética e permissividade dielétrica, a presença de água altera as propriedades e estas mudanças causam a reflexão e difração das ondas eletromagnéticas. A condutividade elétrica pode variar no meio geológico de acordo com a composição, basicamente ela varia de acordo com a proporção sedimento (matriz), ar e água (Tabela 4\_1).

Constante dielétrica é a relação entre a permissividade do meio e a do espaço vazio:

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Segundo Davis & Annan (1989), durante a propagação das ondas eletromagnéticas a Amplitude da Energia Refletida X Tempo de Percurso é uma função que leva em consideração os seguintes fatores:

- Quantidade de energia transmitida no meio.
- Velocidade da propagação da onda eletromagnética no material.
- Contraste das constantes dielétricas nas interfaces (contatos geológicos, por exemplo).
- Atenuação do sinal.
- Profundidade dos refletores.

Através da Tabela 4\_1 é possível verificar que a presença de água afeta bruscamente a condutividade elétrica  $\sigma$  e a constante dielétrica  $K$ , a quantidade de argila também afeta a condutividade elétrica elevando-a. Keller (1987), realizou estudos que comprovaram isso, chegando à conclusão que os principais fatores que afetam a condutividade elétrica nos materiais são: quantidade de água, porosidade, salinidade e quantidade de argila na rocha.

Tabela 4\_1 - Constante dielétrica  $K$  e condutividade elétrica  $\sigma$ , observadas nos materiais comuns para as frequências utilizadas no GPR (Modificada de PORSANI, 1999).

<b>Materiais Secos</b>	$K$	$\sigma$	<b>Materiais Saturados</b>	$K$	$\sigma$
Ar	1	0	Água Destilada	81	0,01
Areia e cascalho	2 - 6	0,01	Água Fresca	81	0,5
Argila	5	2	Água do Mar	81	3000
Folhelho e Siltito	5	1	Areia	20 – 30	0,1 – 1
Calcário	4	0,5	Silte	10	1 – 10
Solo arenoso	2,6	0,14	Argila	40	1000
Solo argiloso	2,4	0,27	Solo arenoso	25	6,9
Sal	5,6	0,01	Solo argiloso	15	50
Granito	5	0,01	Arenito	6	40
Basalto	6	1	Siltito	30	100
Diabásio	7	10	Folhelho	7	100
Ferro	$\infty$	$\infty$	Calcário	8	2
Aço	$\infty$	$\infty$	Granito	7	1
PVC	8	0	Basalto	8	10
Asfalto	3 - 5	0	Diabásio	8	100
Concreto	5,5	0	Concreto	12,5	0

#### 4.2.5 Coeficientes de Reflexão

A reflexão da onda GPR ocorre quando ao se propagar ela encontra uma mudança nas propriedades elétricas do meio, esta mudança ocorre quando se encontra uma interface de reflexão que normalmente é marcada por um contato geológico. Ao passar por uma interface entre dois meios as ondas GPR são refletidas e refratadas, neste momento elas são governadas pela lei de Snell e pelas equações de Fresnel que relacionam as amplitudes dos campos elétricos e magnéticos. Estes fenômenos de reflexão e refração das ondas EM do GPR são equivalentes aos que acontecem com as ondas mecânicas nos métodos sísmicos.

Através da lei de Snell, lei de Fresnel e das equações de Maxwell podemos obter o coeficiente de reflexão para as ondas EM do GPR que depende principalmente das propriedades elétricas do meio. Este coeficiente permite ter-se uma idéia com antecedência da resposta do método GPR em determinados materiais (Tabela 4\_2).

- Coeficiente de reflexão:

$$r_{gpr} = \frac{\sqrt{K_1'} - \sqrt{K_2'}}{\sqrt{K_2'} + \sqrt{K_2'}}$$

Tabela 4\_2 - Coeficientes de reflexão para quatro tipos de situações diferentes (Modificada de PORSANI, 1999).

De:	Para:	Coeficiente de Reflexão
Solo seco: $K=5$	Água: $K = 81$	-0,80
Ar: $K = 1$	Solo seco: $K = 5$	-0,38
Solo: $\sigma = 15$ mS/m	Ferro: $\sigma = 10^9$ mS/m	-1,00
Água: $K = 81$	Rocha: $K = 8$	0,52

#### 4.2.6 *Velocidade de propagação da onda eletromagnética (EM)*

A velocidade de propagação das ondas EM é regida pela seguinte fórmula:

$$V = \sqrt{\frac{2\omega}{m\sigma}}$$

Para materiais geológicos com baixa perda o campo EM se propaga com uma velocidade dada por:

$$V = \frac{C}{\sqrt{K}}$$

Onde  $c$  é a velocidade da luz e  $K$  é a constante dielétrica dos materiais.

Em altas frequências a velocidade e a atenuação da onda de radar apresenta pouca ou nenhuma variação com a frequência (ANNAN & DAVIS, 1997). O sistema GPR opera com frequências entre 10 e 1000 MHz, onde a velocidade permanece constante para as condutividades menores que 100 mS/m e o campo EM se propaga sem apresentar dispersão. Este patamar foi referenciado como Janela GPR (ANNAN & DAVIS, 1997).

Na Tabela 4\_3 é possível observar a velocidade( $V$ ) e a velocidade de atenuação( $\alpha$ ) das ondas GPR em diferentes materiais geológicos.

Tabela 4\_3 - Materiais geológicos comuns com sua constante dielétrica ( $K$ ), condutividade elétrica ( $\sigma$ ), velocidade ( $V$ ) e atenuação ( $\alpha$ ) observadas nas frequências utilizadas no GPR (PORSANI, 1999).

<b>Materiais</b>	<b>K</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>V (m/ns)</b>	<b><math>\alpha</math> (dB/m)</b>
Ar	1	0	0,30	0
Água destilada	81	0,01	0,033	$2 \times 10^{-3}$
Água fresca	81	0,5	0,033	0,1
Água do mar	81	3000	0,01	$10^3$
Arenito seco	2 – 6	0,01	0,15	0,01
Arenito saturado	20 – 30	0,1 – 1	0,06	0,03 – 0,3
Calcário	4 – 8	0,5 – 2	0,12	0,4 – 1
Folhelho	5 – 15	1 – 100	0,09	1 – 100
Siltito	5 – 30	1 – 100	0,07	1 – 100
Argila	5 – 40	2 – 1000	0,06	1 – 300
Granito	5 – 7	0,01 – 1	0,13	0,01 – 1
Sal seco	5 – 6	0,01 – 1	0,13	0,01 – 1
Solo arenoso seco	2,6	0,14	0,18	0,14
Solo arenoso saturado	25	6,9	0,06	2,25
Solo argiloso seco	2,4	0,27	0,19	0,28
Solo argiloso saturado	15	50	0,07 – 0,09	21



É possível estimar a velocidade das ondas EM através dos tempos de reflexão, obtendo informações sobre as propriedades físicas do meio, além da profundidade de seus refletores. Para camadas empilhadas, homogêneas, isotrópicas e com interfaces refletoras horizontais e paralelas (Figura 4\_2), tem-se para cada meio uma velocidade dada por  $V_i = \frac{h_i}{t_i}$  como na sísmica, onde:

- $V_i$  = Velocidade da camada de espessura  $h_i$
- $H_i$  = Espessura da camada
- $t_i$  = Tempo de percurso do raio ao atravessar esta camada
- $X$  = Comprimento do offset
- $T$  = Antena transmissora
- $R$  = Antena Receptora
- $Z$  = Profundidade do refletor

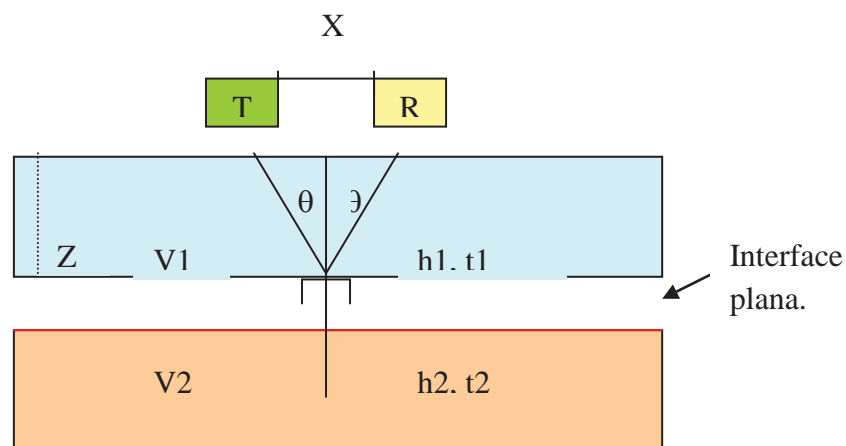


Figura 4\_2 – Esquema de uma interface de reflexão simples de camadas paralelas e planas.

A velocidade média é uma relação da distancia percorrida e do tempo correspondente para isso, ela é dada pela seguinte expressão:

$$V_{med} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}$$

A velocidade quadrática média ( $V_{rms}$ ) é utilizada para simular a velocidade de empilhamento que é maior que a velocidade média e aumenta à medida que aumenta as diferenças de velocidade entre as camadas. Em um meio homogêneo  $V_{rms} = V_{med}$ .

$$V_{rms} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}$$

Para camadas isotrópicas e horizontais a velocidade quadrática média é igual à velocidade de empilhamento que é determinada a partir de uma hipérbole de reflexão, corrigindo as reflexões do tempo  $t_x$  para  $t_o$  e alinhando a hipérbole da melhor maneira possível (GANDOLFO, 1999). Este é o princípio de um dos métodos que pode ser utilizado pelo interprete para calcular a velocidade do meio quando se tem pelo menos uma boa hipérbole de reflexão.

#### **4.2.7 Sondagem de Velocidade WARR**

A sondagem WARR “Wide Angle Reflection and Refraction” é uma técnica utilizada para realizar uma estimativa da velocidade de propagação das ondas emitidas pelo GPR no meio. Esta velocidade é medida mantendo-se uma antena fixa à medida que a outra é afastada gradativamente. O resultado deste ensaio é um gráfico da separação das antenas versus tempo de ida e volta do sinal de radar, estimando-se as velocidades de acordo com a Figura 4\_3.

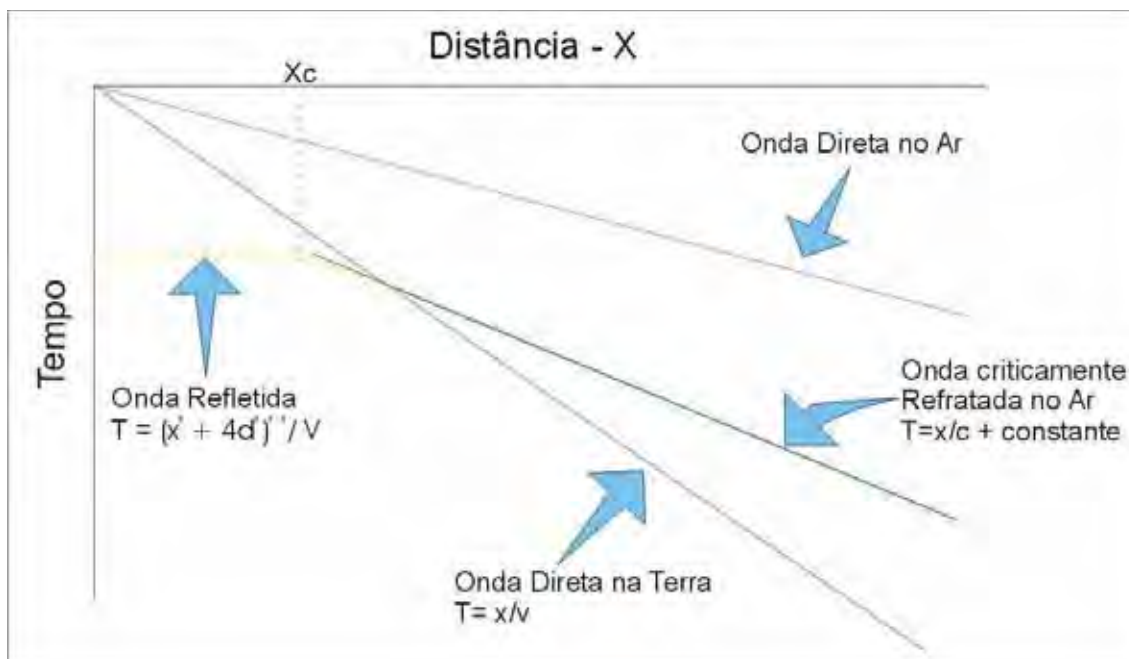


Figura 4\_3 – Eventos idealizados a partir do tempo de chegada em função da separação das antenas numa sondagem do tipo WARR (adaptado de ANNAN, 1992).

#### 4.2.8 Perfil GPR (Radargrama)

O radargrama é uma imagem das variações em subsuperfície das propriedades dielétricas em função do tempo de duplo percurso do pulso eletromagnético ao longo da linha estudada (PORSANI, 1999). O radargrama é dado em comprimento da linha na superfície (metros) em função da profundidade em tempo (nanosegundos), a conversão de tempo para profundidade no perfil GPR é feita em uma etapa posterior durante o processamento e interpretação dos dados. Na figura 4\_4 tem-se um radargrama com a profundidade em tempo antes de ser convertida para metros, permitindo a visualização de como é o perfil gerado pelo GPR.

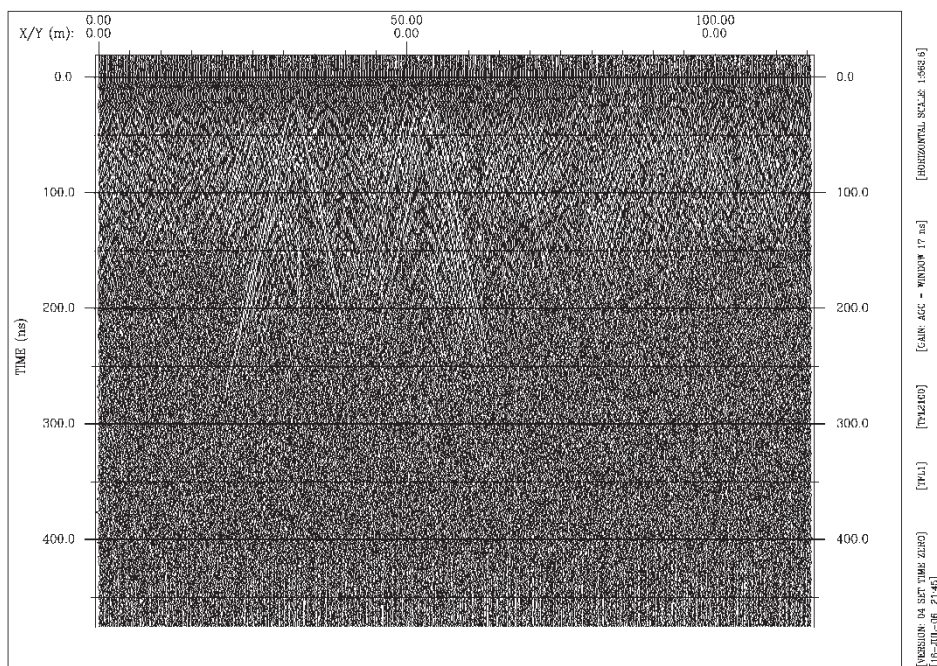


Figura 4\_4 - Perfil GPR, no eixo horizontal a distancia em metros e no eixo vertical o tempo duplo de propagação em nanosegundos.

#### 4.2.9 Limitações da Técnica GPR

Uma grande limitação do GPR é a profundidade a ser atingida que é normalmente pequena e está diretamente ligada a condutividade elétrica do terreno e da frequência da onda transmitida. Quanto maior a frequência das antenas utilizadas menor será a profundidade de penetração das ondas e maior será a resolução da imagem gerada, o radargrama (Tabela 4\_4).

Tabela 4\_4- Frequência das antenas versus profundidade máxima de penetração.

Frequência central (MHz)	Profundidade Máxima de Penetração (M)
1000	1
400	2
200	4
100	25
50	30
25	40
10	50

Segundo Duke (1990) ocorrem 4 tipos de perdas nas ondas Eletromagnéticas (EM) citadas abaixo:

- 1 - Condução elétrica: ocorre em baixas frequências quando o material é muito condutivo.
- 2 - Polarização: ocorre com ondas de alta frequência (20GHz), estas ondas aquecem as moléculas de água e se dissipam na forma de calor como em um aparelho de microondas.
- 3 - Espalhamento geométrico: é a atenuação que ocorre a medida que a frente de ondas se espalha esfericamente.
- 4 - Perdas por difusão: causadas por heterogeneidades no meio que possuam tamanho próximo ao comprimento de ondas e podem ser contatos litológicos, buracos, cupinzeiros, etc.

### 4.3 Métodos Elétricos

O uso de correntes elétricas, geradas artificialmente ou por meios naturais, tem sido amplamente aplicado na prospecção geofísica, permitindo explorar o subsolo de forma não invasiva e econômica.

Existem diversos métodos de aplicação das correntes elétricas, como da medição da resistividade, da polarização induzida e do potencial natural (tensão elétrica produzida por processos eletro-químicos, como os que ocorrem numa pilha galvânica). Correntes elétricas também podem ser geradas a partir de indução magnética e neste caso o método é denominado de eletromagnético.

O método de medição da resistividade do solo é utilizado para analisar mudanças das propriedades elétricas do subsolo, descontinuidades estas provocadas pela heterogeneidade dos materiais presentes no subsolo, aplicando-se uma corrente elétrica contínua ou alternada de baixa frequência, por meio de eletrodos.

O método da polarização induzida vale-se da ação capacitiva do subsolo para se localizar regiões onde minerais que conduzem eletricidade estão disseminados em rochas hospedeiras.

O método do potencial natural se utiliza de correntes elétricas geradas naturalmente no subsolo por processos eletroquímicos, permitindo localizar corpos superficiais que apresentam condutividade elétrica.

Todos estes métodos se valem de algumas propriedades que os materiais têm em relação à eletricidade, como a resistividade.

Alguns materiais conduzem a corrente elétrica por permitirem a passagem de elétrons, como os metais. Outros materiais são isolantes, como os que formam as rochas, mas podem permitir a passagem da corrente elétrica por processos eletrolíticos, devido a serem porosos e conterem água e sais dissolvidos, como o cloreto de sódio. Minerais argilosos são ionicamente ativos, conduzindo bem a eletricidade, mesmo que pouco úmidos.

### 4.3.1 Resistividade

Trata-se de uma propriedade apresentada por um corpo de formato regular (Figura 4\_5), condutor de eletricidade que possui certa resistência elétrica  $R$  (dada em ohms), um comprimento  $L$  e uma área seccional  $A$ , ambos dados em metros:

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

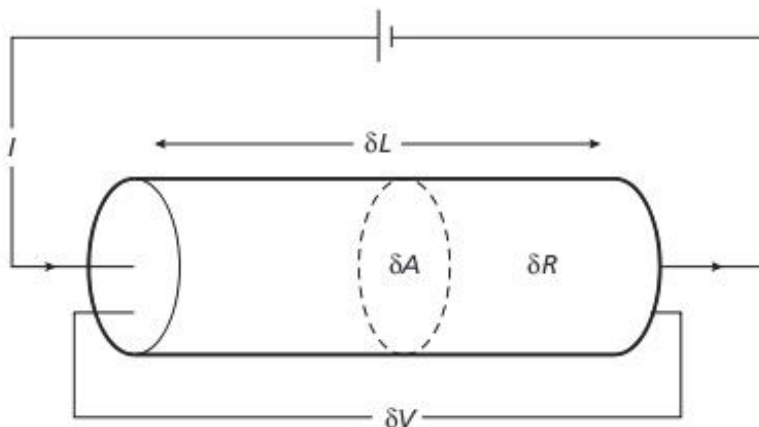


Figura 4\_5 - Parâmetros para definição de resistividade (Kearey, Brooks e Hill, 2002).

A unidade da resistividade é o ohm-metro ( $\Omega\text{m}$ ) e sua recíproca é o siemens por metro ( $\text{Sm}^{-1}$ ), denominada de condutividade;  $1\text{Sm}^{-1} = 1\text{ohm}^{-1}\text{m}^{-1}$ .

Se fizermos passar uma corrente elétrica  $I$  (dada em amperes) por um corpo com uma determinada resistência  $R$  teremos uma queda de potencial elétrico  $V$ , dado em volts, conforme a lei de Ohm:

$$V = IR$$

A resistência  $R$ , por sua vez, deduz-se da fórmula da resistividade:

$$R = \frac{L\rho}{A}$$

A resistência de um bloco retangular, medida entre duas de suas faces opostas é então diretamente proporcional à sua resistividade e ao seu comprimento e inversamente proporcional à área de sua secção transversal.

A queda de tensão  $V$ , por sua vez, será proporcional à resistividade, ao comprimento  $L$  e à intensidade de corrente  $I$ . Mantendo-se a corrente  $I$  e a resistividade  $\rho$  constantes, teremos que a tensão  $V$  será diretamente proporcional ao comprimento  $L$  do material condutor.

#### 4.3.2 Resistividade de rochas e minerais

Os metais e a grafita conduzem eletricidade pela passagem de elétrons, mas a maioria dos minerais que formam as rochas são isolantes elétricos, mas pode-se ter corrente elétrica pela passagem de íons na água armazenada nos poros da rocha, portanto por um processo eletrolítico e não eletrônico.

A porosidade é então um fator maior no controle da resistividade de uma rocha, mas mesmo cristais com pouca porosidade podem conduzir ao longo de fissuras.

Valores de resistividade de diversos tipos de rocha são encontrados na faixa de 1 a  $10^8 \Omega \cdot m$  e muitos valores de diversos tipos de minérios se sobrepõe, tornando impossível a determinação do tipo de rocha tendo-se apenas os dados de resistividade (Tabela 4\_5) (KEAREY, BROOKS E HILL, 2002). Na figura 4\_6 tem-se o range de resistividade teórica para alguns materiais, sendo possível perceber que não existem limites de transição bem definidos.

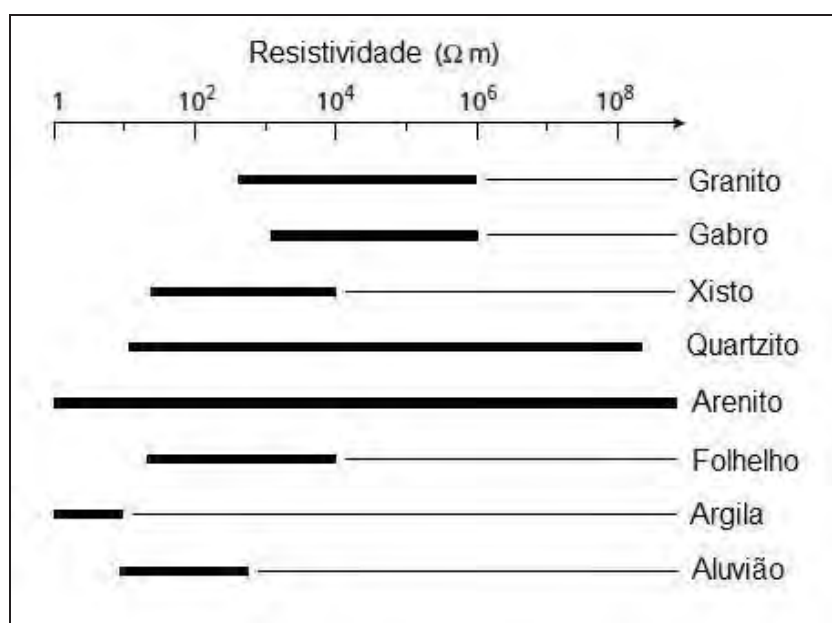


Figura 4\_6 – Resistividade teórica para alguns tipos de rocha (Adaptado de KEAREY, BROOKS E HILL, 2002).



Tabela 4\_5 – Resistividade teórica para algumas rochas e minerais de minério  
(Adaptado de KEAREY, BROOKS E HILL, 2002).

Rochas	Ohm.m	
	de	até
Solo	50	100
Areia Fofa	500	5000
Cascalho	100	600
Argila	1	100
Rocha Intemperizada	100	1000
Arenito	200	8000
Calcário	500	10000
Rochas Máficas	500	200000
Gabro	100	500000
Granito	200	100000
Basalto	200	100000
Grafita-Xisto	10	500
Ardósia	500	500000
Quartzito	500	800000
Minerais		
Pirita	0.01	100
Pirrotita	0.001	0.01
Calcopirita	0.005	0.1
Galena	0.001	100
Esfalerita	1000	1000000
Magnetita	0.01	1000
Cassiterita	0.001	10000
Hematita	0.01	1000000

#### 4.3.3 Medição da Resistividade no Solo

De posse de uma bateria, se envia uma corrente elétrica  $I$  no solo, através de dois eletrodos posicionados distantes um do outro. Supondo-se que o meio possui resistividade uniforme, teremos fluxos radiais de corrente a partir dos eletrodos de tal forma que a distribuição de corrente será uniforme sobre hemisférios centrados na fonte de corrente (eletrodo, figura 4\_7).

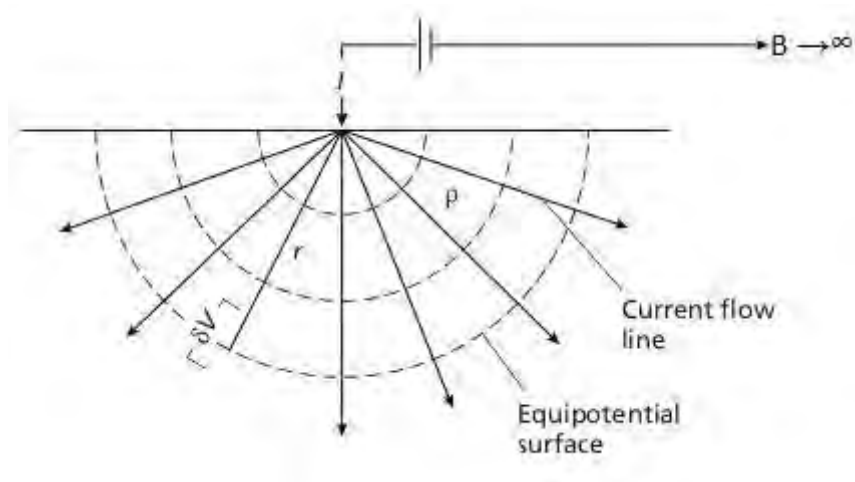


Figura 4\_7 - Fluxo da corrente (Modificado de KEAREY, BROOKS E HILL, 2002).

Se conectarmos um voltímetro com um dos terminais ligado ao solo a uma grande distância e o outro terminal movendo-se no meio, veremos que existem linhas circulares de equipotencial a partir do eletrodo. Em qualquer ponto à volta do eletrodo que mantenha o mesmo raio  $r$  mediremos a mesma diferença de potencial  $V$ . Se nos afastarmos do eletrodo, aumentando assim o raio  $r$ , a diferença de potencial irá diminuir, pois estamos nos aproximando do outro eletrodo:

Agora, em outro experimento, medimos com o voltímetro a diferença de potencial entre dois pontos, sendo um deles ( $V_1$ ) próximo ao eletrodo de corrente e o outro ( $V_2$ ) a distâncias diferentes do eletrodo:

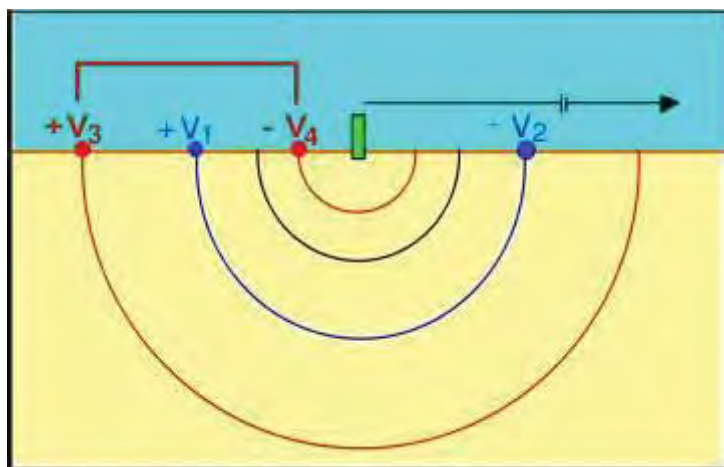


Figura 4\_8 - Medição das diferenças de potencial (BRAGA).

A diferença de potencial ( $\Delta V$ ) medida na superfície do terreno, resultante da resistividade do meio, a partir de um eletrodo de corrente, para várias posições, é dado por:  $\Delta V = V1 - V2$ .

Se estes dois pontos ( $V1$  e  $V2$ ), estão na mesma linha do hemisfério centralizado no eletrodo de corrente, não será registrada nenhuma diferença de potencial:

$\Delta V = V1 - V2 = 0$  (os dois pontos estão ao longo de uma mesma superfície equipotencial).

Entretanto, à medida que afastamos os pontos investigados do eletrodo de corrente as diferenças de potencial aumentam.

A partir da Lei de Ohm, temos que a voltagem de um condutor pode ser definida como:

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

Entretanto, considerando um semi-espaco:

$$R = \frac{\rho r}{2\pi r^2} = \frac{\rho}{2\pi r}$$

Sendo, portanto, a variação de voltagem, desde um único eletrodo de corrente, para alguns pontos deste meio, representando o subsolo, dada pela expressão:

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

A partir disto, temos que a resistividade é dada por:

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

Onde:  $V$  é o potencial,  $I$  é a corrente,  $\rho$  é a resistividade, e  $r$  é a distância entre o eletrodo de corrente e o ponto no qual o potencial é medido. Esta expressão, não é considerada mais a Lei de Ohm (BRAGA).

Portanto, considerando o subsolo com uma resistividade constante (o que não ocorre na prática), podemos determinar sua resistividade:

- Conectando um cabo condutor da bateria ao eletrodo de corrente, podemos medir o valor da intensidade de corrente – I;
- Conectando um voltímetro a dois eletrodos, um localizado próximo ao de corrente e outro mais afastado (distância r), podemos medir a diferença de potencial ( $\Delta V$ ), entre estes dois locais,
- Utilizando a equação acima, calculamos a resistividade do meio.

Na prática este experimento não é usual, devido a grande distância entre os dois eletrodos de corrente. Portanto, devemos reduzir as distâncias entre os quatro eletrodos.

#### 4.3.4 Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

A sondagem elétrica vertical (SEV) é uma técnica que realiza a medida da variação vertical da resistividade do meio em um determinado ponto. Desta maneira está técnica é muito eficaz na detecção de variações verticais no meio geológico como o contato solo/rocha, NA (nível d'água), contato sedimento embasamento etc.

Muitas configurações de eletrodos já foram desenvolvidas, mas somente duas delas são mais utilizadas. A configuração Wenner (Figura 4\_9) é mais simples, onde os eletrodos de corrente e de potencial (voltímetro) são mantidos em um mesmo espaçamento a. Nesta condição, a resistividade é dada por:

$$\rho = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$$

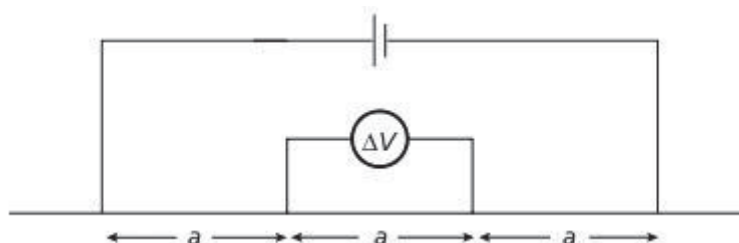


Figura 4\_9 – Configuração Wenner (KEAREY, BROOKS E HILL, 2002).

Durante a SEV, o espaçamento  $a$  é gradualmente aumentado em torno de um ponto central fixo. A eficiência no trabalho de sondagem elétrica vertical pode ser muito aumentada utilizando-se de cabo múltiplo ao qual uma determinada quantidade de eletrodos é fixada permanentemente com espaçamento padrão.

Num levantamento com a configuração Wenner todos os quatro eletrodos necessitam ser movimentados entre leituras sucessivas. Este trabalho pode ser minimizado utilizando-se a configuração Schlumberger (Figura 4\_10) na qual os eletrodos de potencial tem um espaçamento  $2l$  o qual tem uma proporção diminuta em relação ao espaçamento externo  $2L$  dos eletrodos de corrente. Durante um levantamento SEV os eletrodos de potencial permanecem fixos e os eletrodos de corrente são espaçados simetricamente em torno do centro da configuração.

No Brasil a configuração Schlumberger é mais difundida e usada e tem como vantagem além da sua velocidade a qualidade dos dados, pois esse tipo de arranjo é menos susceptível a interferências externas e a erros interpretativos em terrenos não homogêneos (BRAGA).

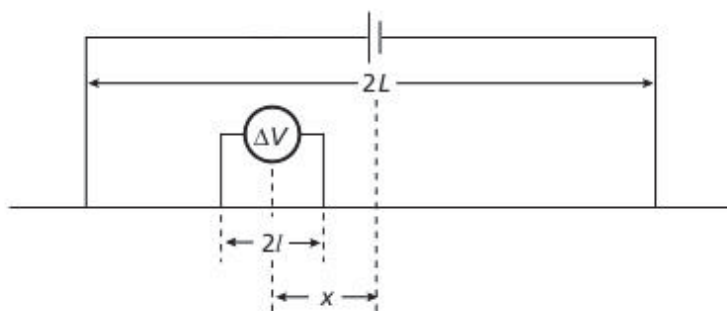


Figura 4\_10 - Configuração Schlumberger (KEAREY, BROOKS E HILL, 2002).

#### 4.3.5 Caminhamento Elétrico (CE)

A técnica do caminhamento elétrico é utilizada para se medir a variação lateral da resistividade no meio geológico, conforme se caminha com o arranjo. Desta forma o ideal é que o arranjo seja disposto perpendicularmente à variação que se pretende estudar, como um dique, uma zona de falha subvertical, etc.

#### 4.3.5.1 Arranjo Schlumberger

No caso de Caminhamento Elétrico (CE) com a configuração Schlumberger os eletrodos de potencial caminham ao longo da configuração, a um espaçamento  $x$  do seu centro, permanecendo os eletrodos de corrente fixos.

Com valores muito grandes do comprimento  $L$  deverá ser necessário aumentar a corrente  $I$ , para manter um valor mínimo de potencial  $V$ , permitindo sua medição.

A resistividade  $\rho$  para a configuração Schlumberger, quando os eletrodos de potencial caminham de forma não simétrica é calculada conforme:

$$\rho = \frac{\pi (L^2 - x^2)^2 \Delta V}{2l (L^2 + x^2) I}$$

Onde  $x$  é a separação entre os pontos médios dos eletrodos de corrente e potencial. Quando utilizada a configuração simétrica  $x = 0$ , então:

$$\rho = \frac{\pi L^2 \Delta V}{2l I}$$

No entanto a configuração mais difundida e utilizada neste trabalho é o arranjo do tipo dipolo-dipolo.

#### 4.3.5.2 Arranjo Dipolo-Dipolo

O arranjo do tipo dipolo-dipolo é um dos mais utilizados para a realização do caminhamento elétrico, devido a sua maior praticidade e velocidade na execução do levantamento. Neste arranjo os dipolos de corrente (denominados AB) e potencial (denominados MN) são igualmente espaçados e seus centros se deslocam ao longo da linha a ser investigada, podendo-se utilizar vários dipolos MN dispostos ao longo da linha de investigação, representando cada par de dipolos MN um nível de investigação.

O espaçamento entre os dipolos AB e MN pode variar, sendo mais comum a utilização de Dipolo de 5, 10, 15 e 20 metros.

Quanto maior a quantidade de dipolos MN, maior será o nível de investigação, mas esta quantidade possui um limite prático, pois quanto mais afastado estiver um dipolo MN do dipolo AB tanto menor será o nível de potencial lido, dificultando assim

a leitura. Na prática é recomendável limitar-se o arranjo em cinco ou seis níveis, podendo-se chegar a oito níveis, dependendo das características do equipamento gerador de corrente.

Segundo Braga (inédito) este arranjo obedece à seguinte equação:

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

onde,

$$K = 2\pi \cdot Gx$$

sendo:

$$G = \frac{1}{\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}}$$

Onde, K = fator geométrico que depende da disposição dos eletrodos AB/MN na superfície do terreno; x = espaçamento dos dipolos AB e MN adotado; e n = nível de investigação correspondente.

A profundidade teórica de investigação é governada pela distância R entre os centros dos dipolos AB e MN e pode ser tomada como sendo R/2 (BRAGA).

O ponto de atribuição da leitura é tomado como sendo o ponto médio entre os dipolos AB e MN, locado em função de uma projeção de 45° a partir dos centros destes dipolos, conforme figura:

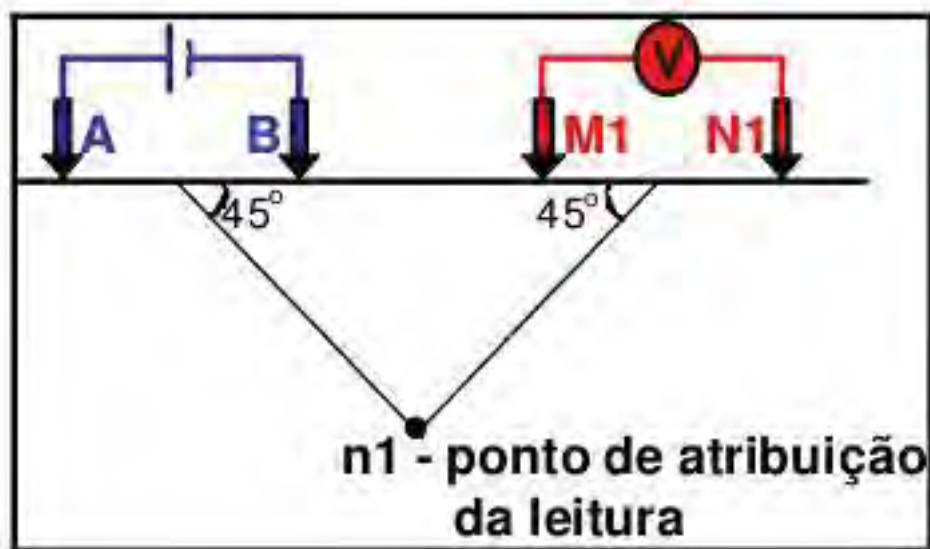


Figura 4\_11 – Projeção do sistema de leitura em campo (BRAGA).

Após a plotagem de todos os parâmetros físicos obtidos em um perfil levantado, tem-se uma seção geoeletrica aparente (resistividade e/ou cargabilidade), conforme ilustrado na Figura 4\_12.

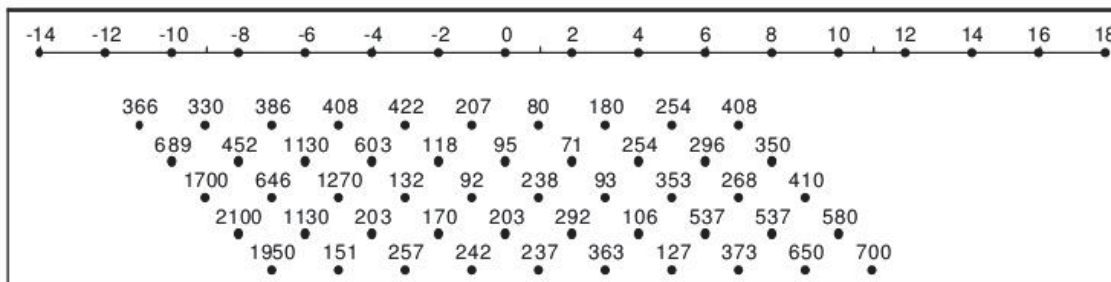


Figura 4\_12 – Exemplo de plotagem do arranjo de campo dipolo-dipolo, com os valores de resistividade aparente conforme a profundidade teórica de cada nível (BRAGA).

#### 4.3.6 Limitações do Método de Resistividade

O método de resistividade é muito eficiente para delinear discontinuidades em subsuperfície, na identificação de sequências de camadas e discontinuidades verticalizadas que apresentam um contraste de resistividade. Contudo existem alguns pontos que são importantes ressaltar e que são tidos como limitações do método por Kearey, Brooks e Hill (2002).

1. As interpretações são ambíguas, sendo necessário utilizar-se de parâmetros geológicos e geofísicos para validar as alternativas de interpretação.



2. A interpretação é limitada a uma situação estrutural simples, grandes complexidades estruturais podem tornar a interpretação impossível.
3. Topografia muito acidentada e interferências de superfície podem mascarar os efeitos das variações mais profundas.
4. A profundidade de penetração do método é limitada a corrente máxima que pode ser introduzida no chão com segurança e as dificuldades físicas de operação (comprimento dos cabos).

Desta maneira é importante ressaltar que a experiência e conhecimento sobre o ambiente geológico de estudo por parte do interprete é de fundamental importância para se obter uma boa interpretação dos dados.

#### **4.4 Aquíferos Fraturados**

Os aquíferos ocorrem em no meio geológico onde suas propriedades permitam o acúmulo de água em seus poros e sua movimentação em seu interior, portanto para se caracterizar um aquífero a rocha hospedeira necessita ter porosidade ou vazios com dimensões suficientes para tal acúmulo e movimentação em seu interior.

Neste item serão discutidas as propriedades e o modelo de circulação de um aquífero fraturado que são aquíferos formados normalmente em função da ação tectônica que gera dobramentos, falhas e fraturas nas rochas.

Segundo Singhal e Gupta (1999) as rochas podem ser classificadas hidrogeologicamente em 4 grupos (cristalinas, vulcânicas, carbonáticas e clásticas), sendo que os aquíferos fraturados englobam os três primeiros grupos de rochas citados (Tabela 4\_6). Esta classificação foi adotada para este trabalho, sendo que o aquífero foco deste estudo é um aquífero fraturado em rocha cristalina.

Tabela 4\_6 – Classificação hidrogeológica das rochas de Singhal e Gupta (1999) (NEVES, 2005).

<b>Grupo de Rochas</b>	<b>Tipos de Rocha e Exemplos</b>	<b>Principais Meios de Ocorrência da Água Subterrânea</b>
Cristalinas	Rochas Ígneas não vulcânicas (granitos, dioritos, gabros etc) e rochas metamórficas (gnaisses, xistos, filitos etc).	Manto de intemperismo e descontinuidades (juntas, falhas, planos de foliação etc).
Vulcânicas	Rochas Vulcânicas (basaltos, andesitos, riolitos etc)	Manto de intemperismo, descontinuidades (juntas, falhas, vesículas) e descontinuidades entre camadas.
Carbonáticas	Rochas Carbonáticas (calcários e dolomitos).	Descontinuidades (juntas e falhas) e cavidades de dissolução.
Clásticas	Rochas sedimentares consolidadas (siltitos, arenitos, conglomerados etc) e sedimentos inconsolidados (cascalho, areia, argila etc).	Espaços intergranulares e descontinuidades.

Atualmente grande parte das investigações baseia-se somente na confrontação de critérios como vazão ou capacidade específica dos poços versus critérios geomorfológicos e estruturais como lineamentos, topografia, litologia e compartimentação, sem relacionar os campos de esforços atuantes na região com a orientação das zonas de fraturas mais transmissivas, ou seja, com os caminhos preferenciais do fluxo (FERNANDES, 2008).

#### **4.4.1 Formas de Ocorrência**

Nos aquíferos fraturados, existem duas importantes subzonas de ocorrência da água, que é a rocha fraturada e o manto de intemperismo. O manto de intemperismo atua no sistema como um aquífero de porosidade granular, influenciando nas condições de circulação, armazenamento e infiltração da água subterrânea antes de ela atingir a rocha fraturada na alterada (NEVES, 2005).

Desta forma, essas zonas serão tratadas de maneira separada, definindo-se para cada uma delas as suas características e propriedades.

#### **4.4.2 Fluxo da água no manto de intemperismo**

O manto de alteração ou manto de intemperismo é um nível formado pelo regolito da rocha que inclui o solo residual e o saprólito rochoso. Basicamente, o saprólito é

desenvolvido através de processos de intemperismo que ocorrem devido a dissolução e lixiviação da rocha *in situ*.

Segundo Lachassagne et al (2001), a espessura do manto de intemperismo é um fator importante de recarga dos aquíferos fraturados, porque mantém a disponibilidade de água subterrânea por longos períodos em terrenos cristalinos. Em seu modelo conceitual o perfil de alteração é formado do topo para base em:

- Rocha sã: essa rocha seria afetada somente pelo fraturamento tectônico;
- Zona intermediária: esta zona seria constituída por rocha alterada e fissurada, caracterizada pela presença de juntas horizontais de descompressão ou relacionadas ao processo de intemperismo;
- Camada Superficial: está camada seria constituída pelo solo produzido pela ação do intemperismo, e estaria recobrendo a zona intermediária e preenchendo as juntas abertas existentes.

Um modelo conceitual da variação das características neste sistema de aquífero é apresentado por Chilton e Foster (1995). O perfil de alteração estudado por esses autores está localizado nas rochas cristalinas do Malawi e se assemelha ao perfil encontrado na área de estudo (Figura 4\_13).

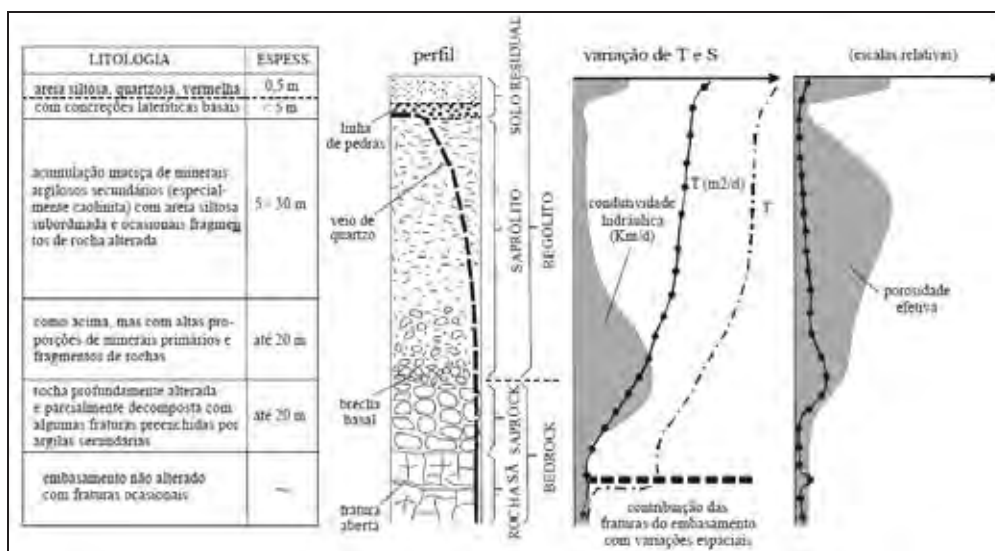


Figura 4\_13 – Modelo conceitual do aquífero de Malawi (NEVES, 2005 apud Chilton e Smith – Carington, 1984 e Foster, 1984. Modificado por Chilton e Foster, 1995).

A porosidade efetiva é maior próximo ao topo do saprólito neste tipo de perfil, porém a condutividade hidráulica é consideravelmente maior na interface entre o saprólito e o topo da rocha sã. Normalmente este fato está associado à ocorrência de juntas horizontais no contato com o embasamento cristalino.

Na zona da rocha sã a condutividade hidráulica é totalmente dependente da presença de fraturas abertas. Esta questão será discutida a seguir.

#### **4.4.3 Fluxo da água subterrânea em meio fraturado**

A existência e quantidade do fluxo de água em uma rocha de baixa porosidade estão relacionadas com a densidade, conectividade e abertura das fraturas existentes, sendo que a análise de seu fluxo pode ser abordada de duas maneiras, meio contínuo e meio descontínuo (DOMENICO & SCHWARTZ, 1990). Em aquíferos fraturados pode haver uma grande variedade de tamanho e continuidade das fraturas, que podem restringir o meio em diversas partes. Desta maneira é mais adequada a abordagem do meio descontínuo, onde é analisada a hidráulica do fluxo de fraturas individuais e determinados os grupos que fornecem os caminhos preferenciais para a circulação e transporte de fluidos, além de constituírem as entradas de água que contribuem para produções mais elevadas em alguns poços (BERTACHINI, 1987 e BANKS et al. 1994).

A condutividade hidráulica pode ser calculada para um grupo de fraturas planares e lisas pela equação desenvolvida por Snow (1968 apud FREEZE & CHERRY 1979) e denominada de lei cúbica:

$$K = \frac{\rho \cdot g}{12 \mu} \cdot Nb^3$$

Onde:

- $\rho$  e  $\mu$ : são a densidade e viscosidade da água;
- $g$ : aceleração da gravidade;
- $N$ : o número de fraturas por unidade de distância;
- $b$ : a sua abertura.

A lei cúbica mostra que a abertura da fratura ( $b$ ) é mais importante que a densidade de ocorrência ( $N$ ), na determinação da condutividade hidráulica, pois a primeira é proporcional ao cubo da abertura e a segunda apenas diretamente proporcional à densidade das fraturas (FERNANDES, 2008) (Figura 4\_14).

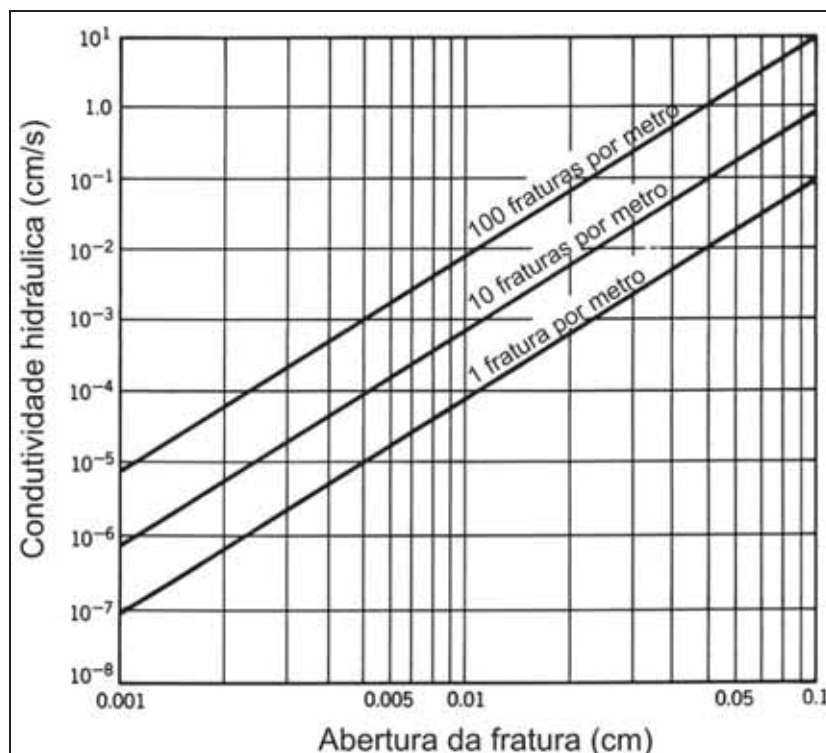


Figura 4\_14 – Gráfico de condutividade hidráulica em relação a abertura da fratura (FERNANDES, 2008).

Dados de poços indicam que a produção é relativamente independente do número de fraturas atravessadas (GALE & ROULEAU 1983, BRIZ - KISHORE 1993) (Figura 4\_15).

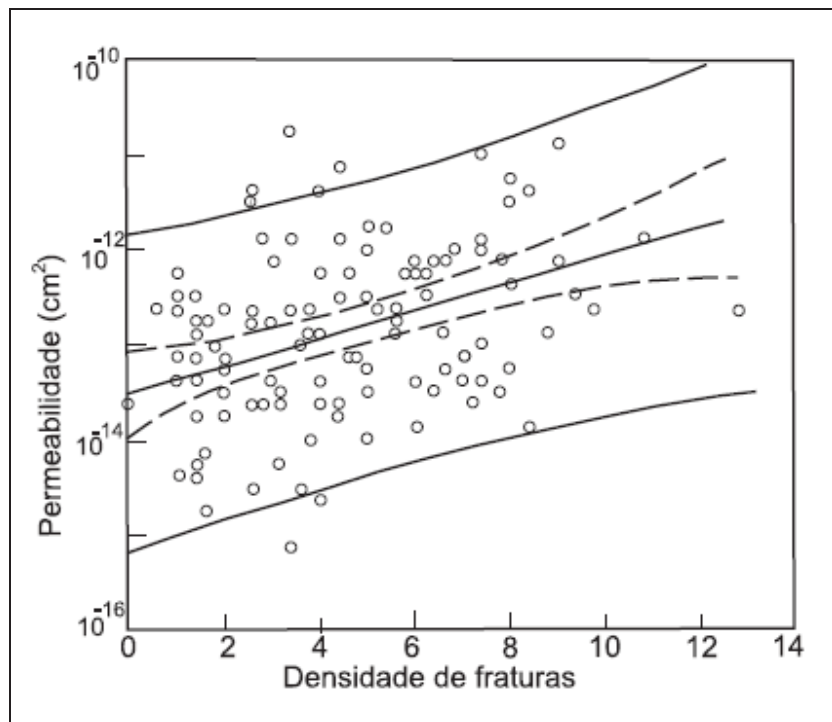


Figura 4\_15 – Gráfico de relação entre a densidade de fratura e a permeabilidade do maciço (FERNANDES, 2008).

#### 4.4.4 Descontinuidades

As descontinuidades estão ligadas diretamente ao comportamento heterogêneo e anisotrópico dos aquíferos fraturados (NEVES, 2005). Embora as rochas cristalinas ocupem grandes extensões em área e profundidade, o controle estrutural não permite que o fluxo percorra extensas distâncias (SINGHAL E GUPTA, 1999).

Porém, é de conhecimento que algumas zonas fraturadas podem se estender por dezenas de quilômetros, formando condutores hidráulicos (BERTACHINI, 1987) e que as mesmas estão relacionadas com o regime tectônico que determina a direção dos esforços regionais em uma determinada rocha.

Quando o regime vigente é do tipo extensional, tem-se a tendência de gerar zonas de cisalhamento rúptil e a abertura das descontinuidades (fraturas) é determinada pelo mecanismo de sua propagação (LAWN & WILSHAW, 1975), que pode ser de 3 tipos (Figura 4\_16):

I - Por abertura ou separação normal dos planos de ruptura sob a ação de esforço de tração.

II - Por deslizamento paralelo à superfície das fraturas e à frente de propagação da ruptura.

III - Por deslizamento paralelo à superfície das fraturas e perpendicular à frente de propagação da ruptura.

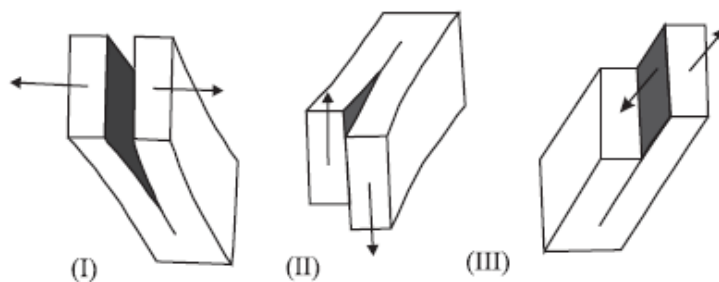


Figura 4\_16 – Modos de propagação de fraturas de extensão (FERNANDES, 2008).

As posições espaciais das fraturas de tração (maior abertura) e das de cisalhamento são determinadas pelo regime tectônico que atuou ou atua em determinada região (Figura 4\_17). Desta maneira para os regimes estruturais do tipo extensional e transcorrente (i e iii), as fraturas de tração serão verticais e para o regime compressivo elas serão horizontais (ii).

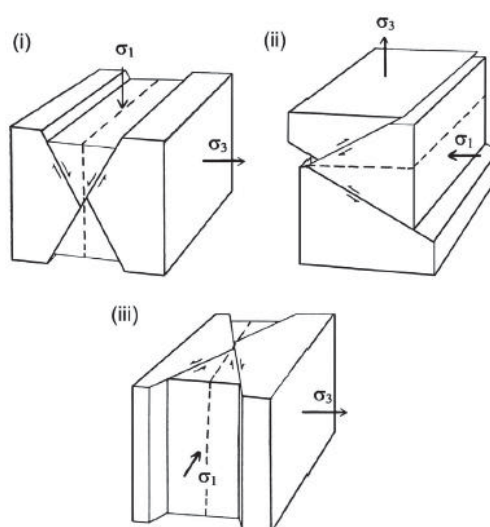


Figura 4\_17 – Posição espacial das fraturas em relação aos tensores de deformação (FERNANDES, 2008).

#### 4.4.5 Zonas de Cisalhamento

As falhas e fraturas geradas em zonas de cisalhamento segundo Gudmundsson et al. (2003), constituem condutos para o fluxo da água devido a deformação progressiva que pode gerar a evolução de fraturas simples ou um grupo de fraturas pré existentes a grandes zonas fraturadas com a presença de cisalhamento múltiplo, constituindo complexas e densas zonas estruturais (Figura 4\_18).

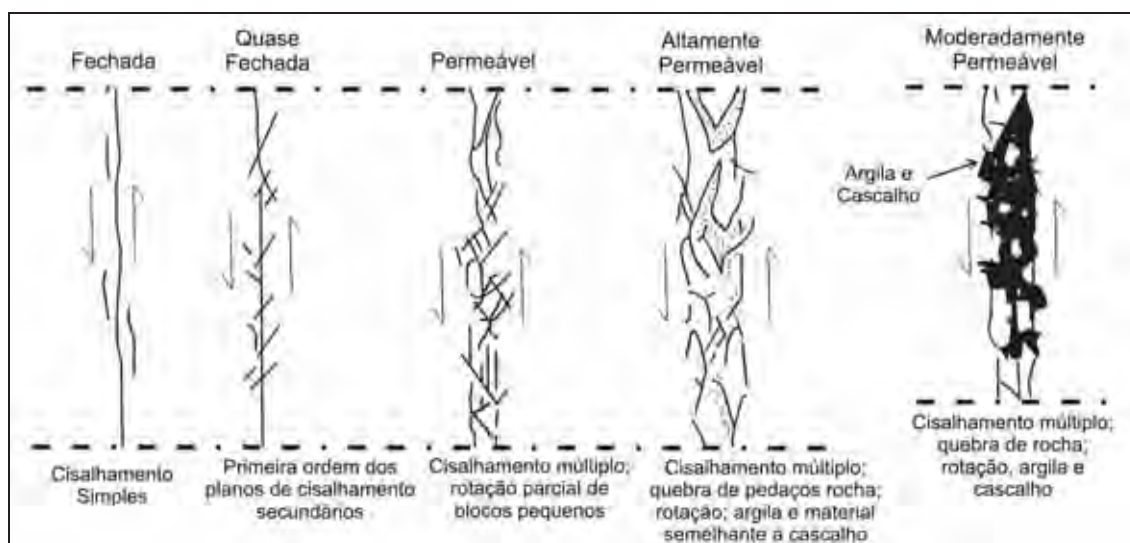


Figura 4\_18 - Variação da permeabilidade em falhas que se encontram em vários estágios de desenvolvimento, do inicial (esquerda) para o mais (direita) desenvolvido (FERNANDES 2008).

As zonas passaram por uma longa e complexa história tectônica, marcada por diferentes fases de deformação, desenvolveram fraturas mais complexas, aumentando suas chances de serem boas condutoras de água.



## 5 Aspectos Geológicos

### 5.1 Geologia Regional

A área de estudo está localizada na região Centro-Sul do estado de São Paulo e geologicamente integra o terreno São Roque que pertence a província Mantiqueira, definida por Almeida *et al* (1977) paralela à costa atlântica sul e sudeste do Brasil, delineando uma faixa de direção NE-SW com mais de 3 mil quilômetros de comprimento.

#### 5.1.1 Província Mantiqueira

A Província Mantiqueira representa um sistema orogênico Neoproterozóico que se justapõe diacronicamente (figura 5\_1). Segundo Almeida (1981) sua estratigrafia pode ser dividida de maneira simplificada em:

- 1- Embasamento arqueano e/ou paleoproterozóico;
- 2- Segmento central que engloba orógeno Ribeira, a zona de interferência entre os orógenos Brasília e Ribeira e os terrenos Apiaí, São Roque e Embu (em verde no mapa);
- 3- Segmento meridional que engloba os orógenos Dom Feliciano e São Gabriel.

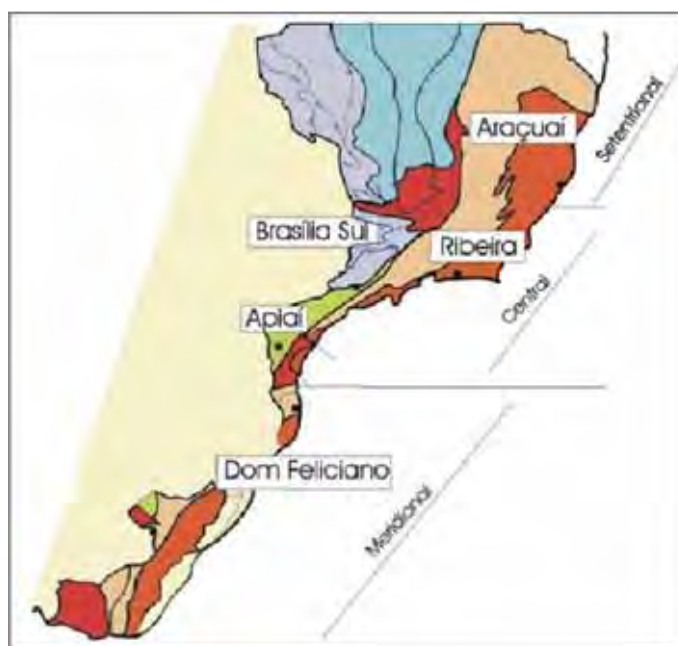


Figura 5\_1 – Província Mantiqueira e seus orógenos (Adaptado de Almeida et al., 1981).

### **5.1.2 Terrenos Apiaí, São Roque e Embu**

Integram o segmento central da Província Mantiqueira e suas relações com as extremidades dos orógenos Ribeira e Brasília ainda é objeto de muita especulação. A exposição do embasamento nestes terrenos é pouca e quando ocorre é marcada por corpos alongados de ortognaisses porfiroclásticos.

O embasamento paleoproterozóico é coberto por unidades metassedimentares mesoproterozóicas (Grupo Açungui) de direção NE controladas por zonas de cisalhamento. Descontinuamente, mas na extensão nordeste desta faixa (Terreno São Roque), ocorre à seqüência metavulcano-sedimentar do Grupo Serra do Itaberaba, que é coberta discordantemente pelo Grupo São Roque de idade mesoproterozóica, onde predominam no geral rochas de metamorfismo de fácies xisto verde baixa.

Os metassedimentos do Grupo São Roque foram cortados por vários corpos granitóides sin a tardi-orogênicos.

### **5.1.3 Grupo São Roque**

O Grupo São Roque constitui uma faixa definida por Hasui e Oliveira (1984) que está limitada em sua porção norte pelas zonas de cisalhamento de Itu e Jundiuvira e ao sul pela zona de cisalhamento Taxaquara. A porção oeste está encoberta pelos sedimentos da Bacia do Paraná a medida que a porção leste se estende até a zona de cisalhamento de sertãozinho.

Formado por uma seqüência de rochas metavulcanossedimentares, muitas vezes intercaladas com as rochas do Grupo Serra do Itaberaba, ele é constituído basicamente por uma seqüência de filitos; xistos; quartzitos; metaconglomerados; metassedimentos; mármore (calcários e dolomitos); rochas cálcio-silicáticas; metabasitos e anfibolitos; rochas metavulcânicas ácidas e corpos graníticos intrudidos na seqüência.

A estratigrafia do Grupo São Roque é de difícil definição devido a restrição lateral das ocorrências e seu alto grau de deformação que dificulta a expansão deste empilhamento regionalmente. Para este trabalho adotou-se a estratigrafia elaborada por Bergmann (1988) que redefiniu a proposta realizada por Hasui (1976), definindo duas novas unidades basais.

Desta maneira a estratigrafia do grupo São Roque na região de Pirapora do Bom Jesus foi dividida por Bergmann (1988) em 4 formações que são (do topo para a base):

- Formação Piragibu: composta por uma sequência rítmica de filitos com alternância de quartzitos;

- Formação Botoruna: composta por uma sequência vulcânica com níveis arcossianos;

- Formação Estrada dos Romeiros: composta por um membro arenoso na base e um membro pelítico no topo (metapelitos);

- Formação Pirapora: corresponde a unidade basal que é composta por rochas vulcânicas básicas, piroclásticas e um membro carbonático composto por cálcio-filitos e mármores dolomíticos com presença de estromatólitos.

O empilhamento estratigráfico do Grupo São Roque e a comprovação da existência de uma falha que coloca as formações Estrada dos Romeiros e Botoruna acima da Formação Pirapora já foram tema de diversas discussões e publicações (HACKSPACHER et al., 1992 e JULIANI E BELJAVSKIS, 1995). Contudo esses autores em trabalhos já submetidos a publicação, como Hackspacher et al., 1992 para a folha Cabreúva aceitam a proposta de Bergmann (1988).

A seguir serão descritos de maneira sucinta os litotipos identificados nas 4 formações definidas por Bergmann para o Grupo São Roque.

#### *5.1.3.1 Filitos*

Constituído principalmente por quartzo e mica, sua coloração pode variar de branca a vermelha, normalmente ele ocorre laminado e pode ter como mineral acessório grafita, apatita, zircão e turmalina (CARNEIRO, 1983). Quando próximo aos corpos intrusivos pode apresentar clorita, biotita e muscovita (HASUI, 1975).

#### *5.1.3.2 Xistos*

Os xistos encontrados no Grupo São Roque variam de mica xistos finos (contendo quartzo e muscovita como minerais principais) a xistos porfiroblásticos (contendo palhetas desorientadas de muscovita e alguma turmalinização (CARNEIRO, 1983). Muscovita xistos de dimensões centimétricas a métricas comumente se intercalam com

metarenitos, sendo que estes xistos são finos e apresentam porfiroblastos de estauroлита e granada (FERNANDES, 2000).

#### *5.1.3.3 Quartzitos*

Os quartzitos possuem coloração variando amarelo claro a vermelho quando intemperizado, possui estrutura maciça, mas por vezes se apresenta foliado (Carneiro, 1983). Sua granulação varia de fina a grossa e é composto essencialmente de quartzo, mas porém, pode ter subordinadamente a presença de sericita, microclínio, apatita, turmalina, zircão, óxidos de ferro e albita (BERGMANN, 1988).

#### *5.1.3.4 Metaconglomerados*

São formados normalmente por seixos de granito, filitos e quartzitos. Suas dimensões variam de 2 a 30 cm, com formato ovalado no caso dos seixos de granito e alongados para os seixos de quartzito (HASUI et al., 1969).

Existem microconglomerados com pequenas dimensões intercalados com rochas metapsamíticas e são constituídos por seixos de quartzitos cinza claro, alongados, com dimensões de 0,2 a 2cm e de matriz metarenítica arcoseana (CARNEIRO, 1983).

#### *5.1.3.5 Metassedimentos Psamíticos*

Estão incluídos nesse grupo os metarcósios, metarenitos finos, metarenitos arcoseanos, metarenitos e metagrauvas, sendo que os metarcósios e os metarenitos no geral possuem coloração cinza médio a escuro, podendo atingir tons amarelos a vermelhos quando intemperizados. (FERNANDES, 2000).

As metagrauvas apresentam basicamente micas, quartzo e feldspato. Bergmann (1988) encontrou algumas ocorrências isoladas de andalusita associada.

Na Formação Estrada dos Romeiros foram descritos por Bergmann (1988) metarenitos laminados com hematita e metarenitos com intercalações de filito laminado.

#### *5.1.3.6 Mármore*

As ocorrências mais frequentes deste tipo de rocha são de carbonatos bandados (com bandas variando de 5 a 10 centímetros) de coloração cinza claro a cinza escuro e granulação fina (CARNEIRO, 1983). A presença de níveis carbonosos e filíticos pode

ocorrer ocasionalmente, bem como veios de calcita preenchendo as fraturas (HASUI, 1969).

#### *5.1.3.7 Rochas Cálcio-Silicáticas*

Estas rochas podem ocorrer maciças ou bandadas, com coloração variando de verde a cinza e granulação muito fina a fina. Sua mineralogia básica é composta por actinolita, tremolita, diopsídio, plagioclásio e epidoto, tendo como minerais acessórios flogopita, granada, carbonato, titanita, alanita, apatita e minerais opacos (Fernandes, 2000).

#### *5.1.3.8 Metabasitos e Anfibolitos*

Bergmann (1988) descreve essas rochas como compostas por diopsídio, microclínio e quartzo, tendo como acessório apatita, zircão, carbonatos, epidoto e titanita. Essas rochas são encontradas normalmente bastante alteradas, com níveis de coloração marrom escuro, denominados por Carneiro (1983) como filito pó de café.

Foram descritos por Bergmann cromititos encaixados em talco xistos em Pirapora do Bom Jesus, com abrangência restrita, em contato com camadas de hematita compacta. Sua composição básica é cromita, talco, serpentina e clorita (BERGMANN, 1988).

#### *5.1.3.9 Rochas Metavulcânicas Ácidas*

São rochas de coloração cinza claro a médio, composta por fenocristais alongados de plagioclásio e feldspato potássico, sua matriz varia de granulação muito fina a afanítica. Sua mineralogia básica é quartzo, feldspato, biotita e minerais opacos como acessório (CARNEIRO, 1983).

### **5.1.4 Granitóides**

São comumente encontrados intrudindo as rochas do Grupo São Roque corpos granitóides cálcio alcalinos com alto teor de potássio. Estas rochas possuem caráter peraluminoso e são relacionados a orogênese Brasileira (GODOY et al. 1996).

Um exemplo destes granitóides é o granitóide São Roque que ocorre na região central da área de estudo.

O Complexo Granitóide São Roque é constituído por uma seqüência de rochas de composição diorítica à monzogranítica. Segundo Andrade as características petrográficas e as relações de campo indicam uma divisão em quatro conjuntos litológicos principais que possuem variações de termos máficos a felsicos.

A disposição das fácies é em parte controlada por zonas de cisalhamento internas, ligadas aos sistemas principais de transcorrência que delimitam o maciço. Os dados litoquímicos permitem classificar estas rochas como cálcio-alcalinas potássicas, com caráter metaluminoso tendendo a peraluminoso nas frações tardias.

#### **5.1.5 Grupo Serra do Itaberaba**

O Grupo Serra do Itaberaba foi definido por Juliani e Beljavskis (1986) como rochas supracrustais que constituem o embasamento do Grupo São Roque. Estes dois Grupos estão inseridos na faixa definida como Bloco São Roque por Hasui et al. (1969).

O Grupo Serra do Itaberaba é constituído por 3 formações que são (do topo para a base):

- Formação Pirucaia;
- Formação Nhanguçu;
- Formação Morro da Pedra.

##### *5.1.5.1 Formação Pirucaia*

Corresponde ao topo do Grupo e é constituída por uma unidade de xistos quartzosos a micáceos. Martin (2000) descreveu esses xistos como quartzo xisto e quartzo biotita xisto com ocorrências localizadas de xistos conglomeráticos, quartzitos foliados e xistos pelíticos porfiroblásticos.

##### *5.1.5.2 Formação Nhanguçu*

Corresponde à unidade intermediária do Grupo Serra do Itaberaba sendo que foram reconhecidas nesta Formação por Martin (2000) duas unidades que são:

- Metassedimentos Manganésíferos: é constituída por uma seqüência de metassedimentos com manganês disseminado intercalados com metapelitos

calcíferos e rochas carbonáticas. Subordinadamente ocorrem metassedimentos grafitosos e tufos.

- Rochas Carbonáticas: é constituída por rochas carbonáticas dolomíticas no geral, termos calcíticos também são encontrados, mas em menor quantidade. Frequentemente ocorre intercalações de carbonatos com metassedimentos manganíferos e metapelitos calcíferos.

#### 5.1.5.3 Formação Morro da Pedra Preta

Esta formação foi descrita como a unidade basal do Grupo Serra do Itaberaba, sendo que foram descritos por Martin (2000) nessa formação seis unidades que se seguem:

- Unidade Metabásica: é constituída por rochas metabásicas de origem ígnea e anfibolitos, é comum a ocorrência de níveis tufíticos e brechados (metavulcanoclásticas). Subordinadamente tem-se a ocorrência de rochas calciossilicáticas, xistos pelíticos, grafitosos e granatíferos.
- Unidade Metavulcanoclástica: esta unidade tem a predominância de metassedimentos tufíticos intercalados com pequenos níveis de xistos pelíticos, metapelitos grafitosos, metapelitos ferro-magnésíferos e calcíferos, metacherts, metabasitos e rochas calciossilicáticas.
- Unidade Calcio-silicática: constituída basicamente por rochas do tipo calciossilicáticas intercaladas com metassedimentos tufíticos, xistos com profiroblastos de biotita, metapelitos (manganésíferos, calcíferos e grafitosos), mármore e metacherts.
- Unidade Xistos Pelíticos: esta unidade é constituída por uma variedade de xistos com predominância de mica xisto. Subordinadamente a este xisto são encontrados quartzo xistos, metassedimentos tufíticos, rochas metabásicas, metavulcanoclásticas básicas, xistos turmaliníticos, xistos grafitosos e metapelitos calcíferos.

- Formação Ferrífera: formações ferríferas foram descritas associadas a leitos de metacherts, elas estão intercaladas com metassedimento tufítico rico em turmalina, xistos grafitosos e xistos com estaurolita e granada.
- Metapelito Grafitoso: esta unidade é composta por metapelitos grafitosos a xistos grafitosos intercalados com formações ferrífera, turmalina xistos e estaurolita xistos. Esses metapelitos grafitosos estão em contato abrupto com os metabasitos e anfibolitos.

## 5.2 Geologia Local

Para os trabalhos de mapeamento foi traçada uma poligonal de aproximadamente 150 Km<sup>2</sup>, abrangendo as duas litologias ocorrentes na área do condomínio Villa Verde, que é o foco de estudo deste trabalho (Figura 5\_2). Desta maneira, os trabalhos de campo se concentraram na caracterização geológica e estrutural principalmente do Granitóide São Roque, definido como o litotipo mais promissor para abrigar um aquífero do tipo fraturado.

Na área do condomínio Villa Verde foram descritos os metassedimentos do Grupo Serra do Itaberaba em contato por falha com o Granitóide São Roque. As foliações observadas em campo para os xistos pertencentes ao Grupo Serra do Itaberaba estão verticalizadas.

Os trabalhos de mapeamento foram realizados em duas etapas que totalizaram 8 dias de campo. Nesse período foram visitados e descritos 83 afloramentos e realizadas 146 medidas estruturais.

A seguir serão descritos os litotipos identificados em campo e ressaltado os fatores relevantes vistos em relação ao potencial hidrogeológico.



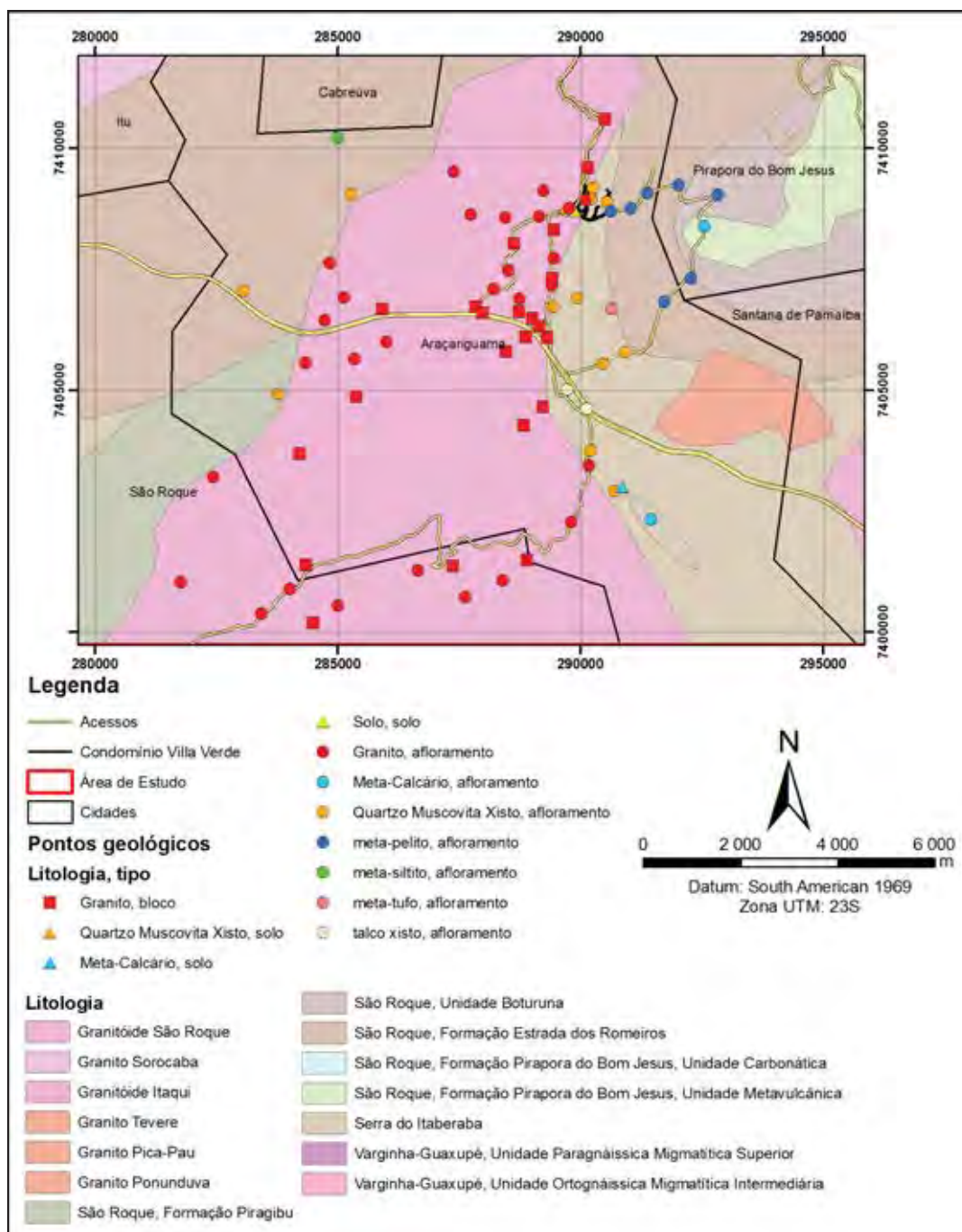


Figura 5\_2- Mapa geológico elaborado para a área de estudo.

### 5.2.1 Coberturas

Estas coberturas são formadas pelo solo desenvolvido pelo processo de intemperismo das rochas existentes no local, possuindo uma espessura que varia de 1 a

3 metros nos granitóides e inferior a 1 metro nos xistos. Basicamente foram descritos 3 tipos de solo durante os trabalhos de mapeamento que serão detalhados a seguir.

#### 5.2.1.1 Solo Arenoso

Solo de coloração amarela a laranja, arenoso, com granulação variando de média a grosseira com espessuras que variam normalmente de 1 a 3 metros. Este solo se desenvolve também entre as fraturas do nível saprolítico, estando presentes em afloramentos onde os matacões estão em nível avançado de intemperismo (Figura 5\_3).



Figura 5\_3 – Afloramento de granito com solo amarelo a laranja arenoso no topo e preenchendo grandes fraturas.

A formação de níveis de solo espessos somados a uma zona saprolítica com fraturas abertas e preenchidas por este solo arenoso, segundo Lachassagne et al. (2001) constituem um importante elemento de recarga para aquíferos do tipo fraturado.

### 5.2.1.2 Solo Siltoso

Este solo é produto do intemperismo dos xistos mapeados no Grupo Serra do Itaberaba e São Roque. Ele possui coloração laranja, granulação fina, sedoso, constituído de argila misturada com areia fina.



Figura 5\_4 – Afloramento de xisto com um solo amarelo centimétrico recobrimo a rocha.

Este solo costuma ser pouco espesso e é visto normalmente em cortes de estrada.

### 5.2.1.3 Solo Vermelho

Foi visto em campo um solo de coloração vermelha, granulação fina, argiloso que marca a presença de rochas calcárias (figura 5\_5). Este solo foi visto nos arredores de uma mina de calcário calcítico da Votorantim Cimentos.



Figura 5\_5 – Contato entre solo amarelo siltoso com solo vermelho no outro lado do vale (linha vermelha).

### 5.2.2 *Granitóide São Roque*

Os granitóides São Roque foram mapeados na região central da área de trabalho e fazem contato com o Grupo Serra do Itaberaba. A maior parte de sua ocorrência é sob a forma de matacões (Figura 5\_6), onde o intemperismo por acebolamento é comum, afloramentos são vistos normalmente em cortes de estrada.

Esses granitóides possuem coloração variando de cinza a amarelo, quando intemperizados, são constituídos basicamente por quartzo, feldspato potássico, plagioclásio e biotita. É comum a presença de fenocristais de feldspato potássico desorientados em sua matriz (Figura 5\_7).

A presença de fraturas subverticais é a mais persistente, mas em afloramentos de grande porte é possível ver os blocos sendo restringidos por fraturas horizontais.





Figura 5\_6 – Matacões de granitóide no pasto.



Figura 5\_7 – Matacões de granitóide cinza com fenocristais de feldspato potássio.

### 5.2.3 Grupo São Roque

#### 5.2.3.1 Metapelitos e Metassiltitos

Estas rochas possuem coloração variando de cinza a vermelho (Figura 5\_8), com uma foliação fina e por vezes apresentam uma alternância de cores paralelas à foliação principal  $S_1$  que marcam o seu plano de deposição  $S_0$ . A alternância de cores pode representar a variação da composição devido aos pulsos de deposição.

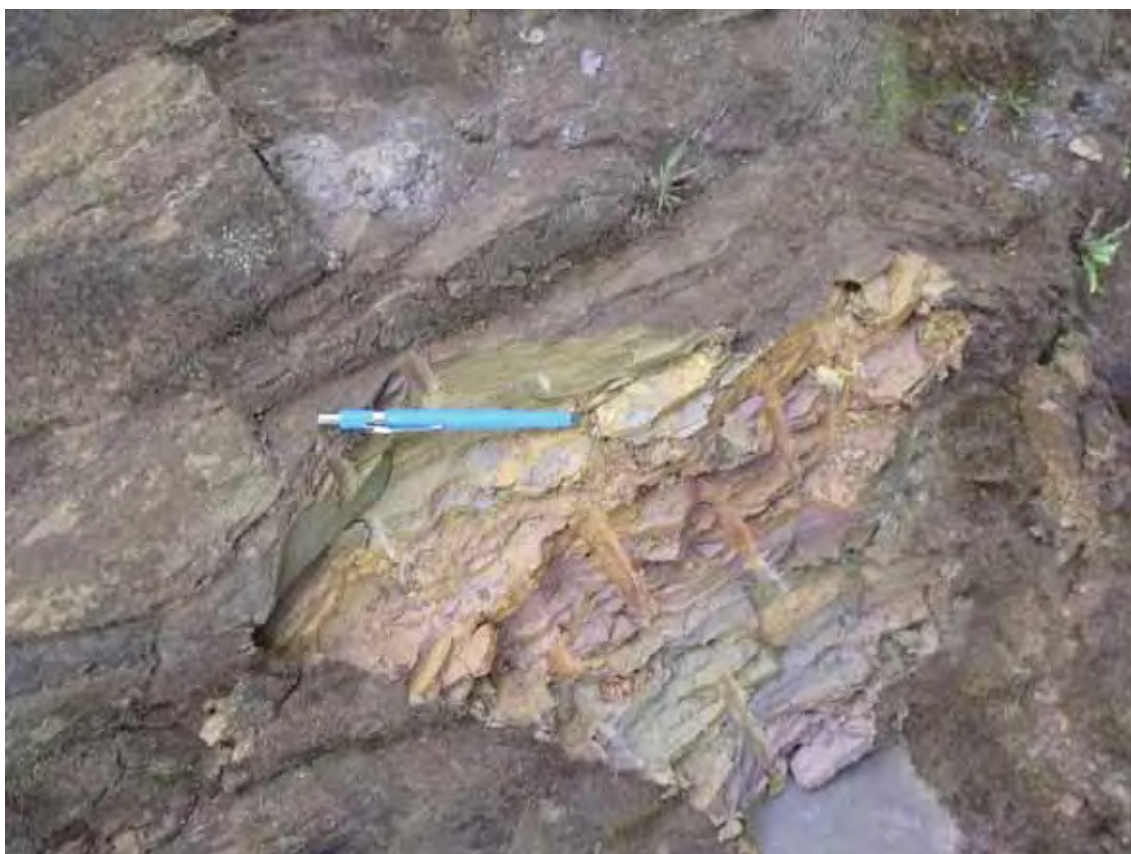


Figura 5\_8 – Afloramento de metassiltito foliado de coloração vermelha clara.

#### 5.2.3.2 Mica Quartzo Xisto

Rocha de coloração amarela a laranja, foliada, contém muscovita/sericita e quartzo basicamente (Figura 5\_9). Ocorre normalmente em afloramentos rasteiros e de pequeno porte, é vista a leste do condomínio Villa Verde.





Figura 5\_9 – Afloramento de xisto laranja foliado.

#### **5.2.4 Grupo Serra do Itaberaba**

##### **5.2.4.1 Metatufo**

Rocha de coloração amarela a vermelha, siltosa, foliada, granulometria fina com a presença de pequenos cristais de quartzo. Em alguns pontos, quando partida, essa rocha apresenta clastos de coloração amarelada e estirados, conferindo à rocha uma textura de lápili (Figura 5\_10).



Figura 5\_10 – Metatufo com a ocorrência de lápilis centimétricas (em vermelho).

#### 5.2.4.2 Metacalcário

Esta unidade é marcada pela ocorrência de uma rocha de coloração cinza médio a escuro, matriz fina, bandada, de composição calcítica (reage com HCl). Em campo ela foi vista em uma mineração da Votorantim Cimentos (Figura 5\_11), constituindo uma lente com aproximadamente 500 metros de espessura.

O solo gerado por estas ocorrências é de coloração vermelha e argiloso, podendo atingir até 20 metros de profundidade, como é visto na bancada da cava da mina (Figura 5\_11).





Figura 5\_11 – Paredão de calcário, mina da Votorantim Cimentos.

#### 5.2.4.3 *Quartzo Mica Xisto*

Rocha de coloração laranja a branca, granulação fina, foliada, contém basicamente quartzo, muscovita e ou sericita (Figura 5\_12). Esta rocha aparece intercalada com os xistos grafitosos, possuindo localmente pequenos níveis de quartzo xisto (Figura 5\_13).



Figura 5\_12 – Afloramento de quartzo mica xisto de coloração laranja.



Figura 5\_13 – Afloramento de quartzo xisto de coloração branca.



#### 5.2.4.4 Xisto Grafitoso

Rocha de coloração cinza clara a branca, foliada, sedosa, é constituída basicamente por quartzo, talco e sericita com lâminas de grafita em sua foliação de coloração preta e levemente intemperizada (Figura 5\_14). Estes xistos ocorrem em campo intercalados com quartzo mica xisto e estão próximos do contato com as rochas carbonáticas.



Figura 5\_14 – Xisto de coloração branca com lâminas de grafita.

### 5.3 Geologia Estrutural

Para a interpretação dos dados estruturais da área de estudo optou-se por analisar as estruturas partindo de uma escala macroscópica (interpretação de imagem de satélite e estudo de trabalhos regionais), caminhando para uma escala mesoscópica (afloramento). Posteriormente, foram cruzados os dados de imagem com os de mapeamento para a identificação das principais estruturas e elaboração do modelo geológico/estrutural que serviu de base para a programação da geofísica realizada.

### 5.3.1 Zonas de Cisalhamento

O Grupo São Roque constitui uma faixa definida por Hasui e Oliveira (1984) que está limitada estruturalmente em sua porção norte pelas zonas de cisalhamento de Itu e Jundiuvira e ao sul pela zona de cisalhamento Taxaquara. Essas zonas colocam o Grupo São Roque em contato com as rochas do complexo Embu, Itapira e como os Granitóides do maciço São Roque, Ibiúna e Açungui (HASUI et al., 1969).

Outras zonas de cisalhamento de menor expressão são reconhecidas, como as zonas de Mairinque, Moreiras, Araçariguama, Pirapora, Vila Baronesa, dos Romeiros e Morro Grande (BERGMANN, 1988). Essas zonas de cisalhamento controlam diversos contatos entre os granitóides e metassedimentos na região (HACKSPACHER, 1992b).

As descontinuidades regionais mais antigas que se destacam nas imagens de satélite são as de direção NE-SW e NW-SE, que correspondem ao alinhamento das escarpas e dos canais de drenagem de maior porte. Estas direções são coincidentes com as principais famílias de juntas presentes nas rochas pré-cambrianas (NEVES, 2005).

O sentido de movimentação destas zonas de cisalhamento pré-cambriana do Sudeste do Brasil são amplamente discutidas em diversos trabalhos e as divergências de opiniões ainda são bastante grandes, mas não são focos deste estudo. Entretanto, é de interesse deste trabalho conhecer as estruturas que vieram a acomodar uma deformação rúptil posteriormente.

Segundo Neves (2005), as estruturas de direção NE-SW são resultados de um evento distensivo que gerou a fragmentação do Gondwana e a separação continental, com tensores regionais apontados na figura 5\_15. Nesta configuração as falhas normais e juntas abertas se formam predominantemente nas estruturas de direção NE-SW.

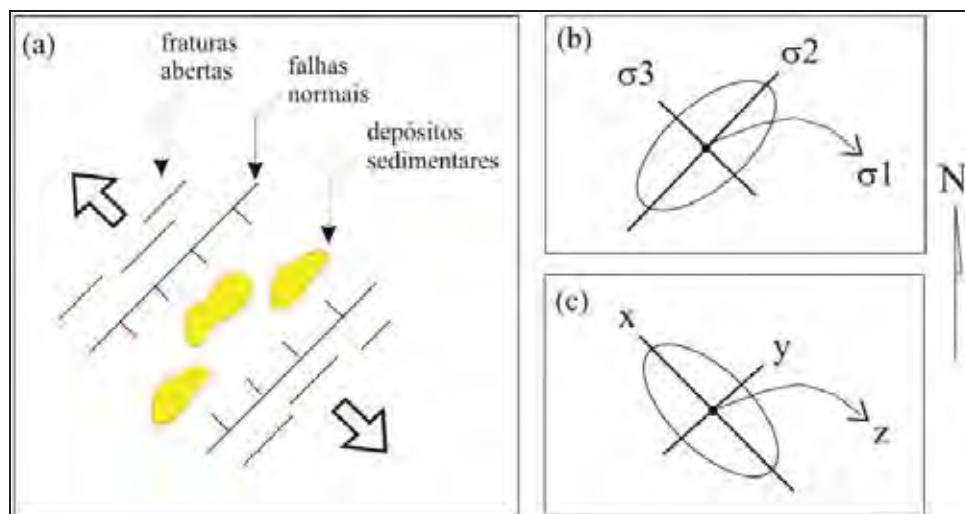


Figura 5\_15 – (a) Direção do movimento tectônico regional durante o regime distensivo com as principais estruturas formadas, (b) elipsóides de tensão e (c) de deformação (NEVES, 2005).

Após a separação continental, o regime distensivo progressivamente passou para um regime transcorrente imposto pela rotação da Placa Sul-Americana para oeste, evento que tem sido atribuído como neotectônico (NEVES, 2005). Esse regime gerou uma fase de deformação transcorrente dextral (Figura 5\_16), que tende a formar discontinuidades abertas de direção NW-SE e falhas transcorrentes de direção E-W (NEVES, 2005).

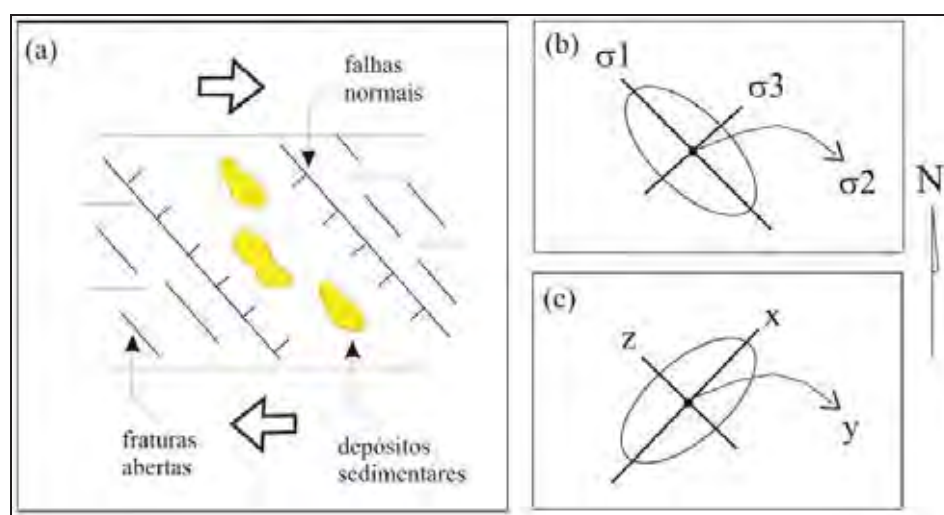


Figura 5\_16- (a) Direção do movimento tectônico regional durante o regime transcorrente com as principais estruturas formadas, (b) elipsóides de tensões e (c) de deformação (NEVES, 2005).



### 5.3.2 Estruturas Macroscópicas

As estruturas macroscópicas observadas dentro da área de estudo foram interpretadas por meio de imagem de satélite (LANDSAT), onde foram traçados os principais lineamentos regionais e calculadas as respectivas direções, para a realização da análise de direção destas estruturas.

Na figura 5\_17 tem-se os lineamentos traçados na imagem, sendo que para esta análise foi delimitado um polígono com um raio de aproximadamente 30 Km, tendo como ponto central o condomínio Villa Verde.

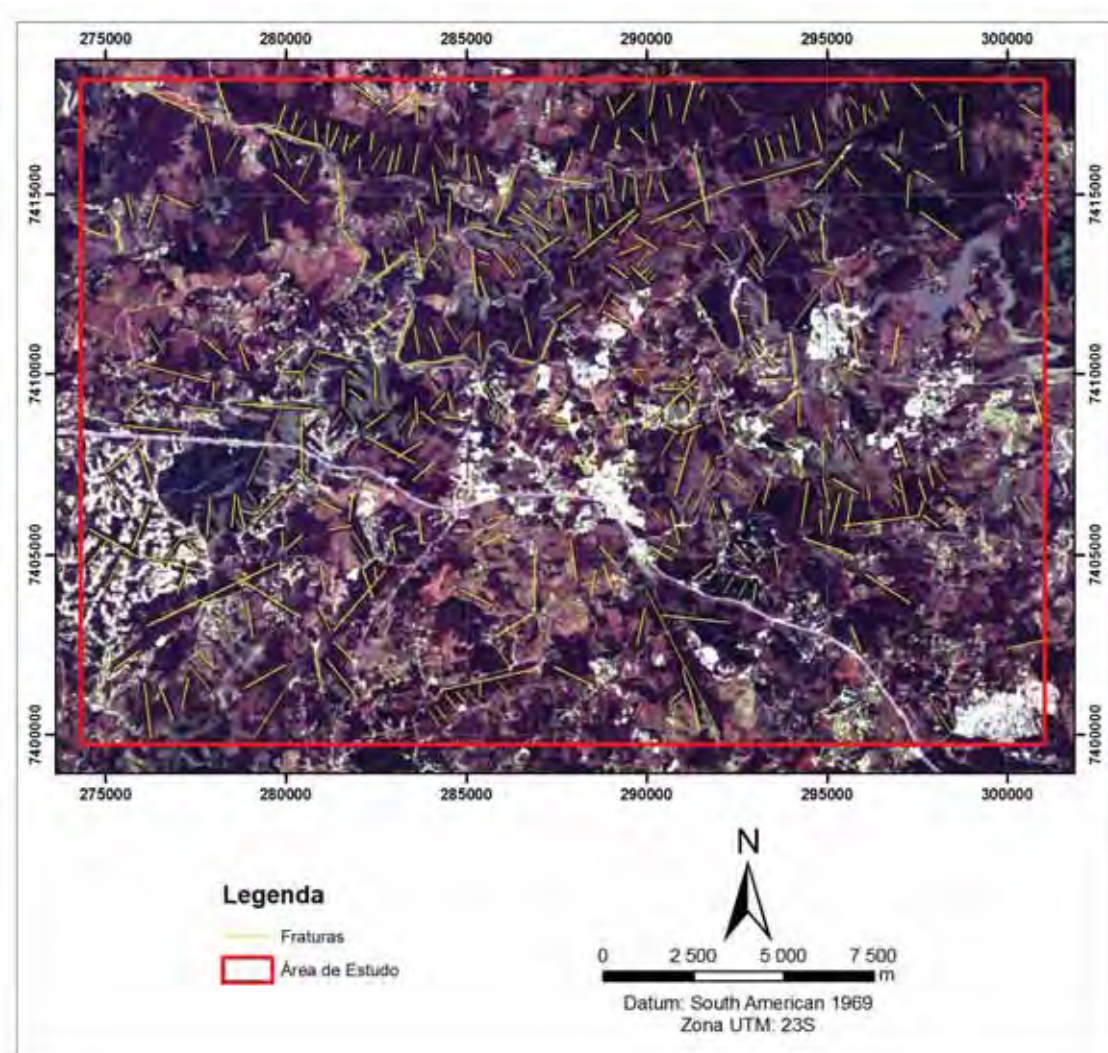


Figura 5\_17 – Imagem LANDSAT 7 com os lineamentos interpretados.

Foram traçados 380 lineamentos na imagem em ambiente GIS, onde as direções foram calculadas e os dados exportados e tratados no software GEORIENT. A planilha com as direções medidas pode ser vista no anexo 4 deste trabalho.

Para melhor visualização dos dados optou-se pela realização de um diagrama de rosetas (Figura 5\_18) que mostra duas direções principais de lineamentos para a área estudada.

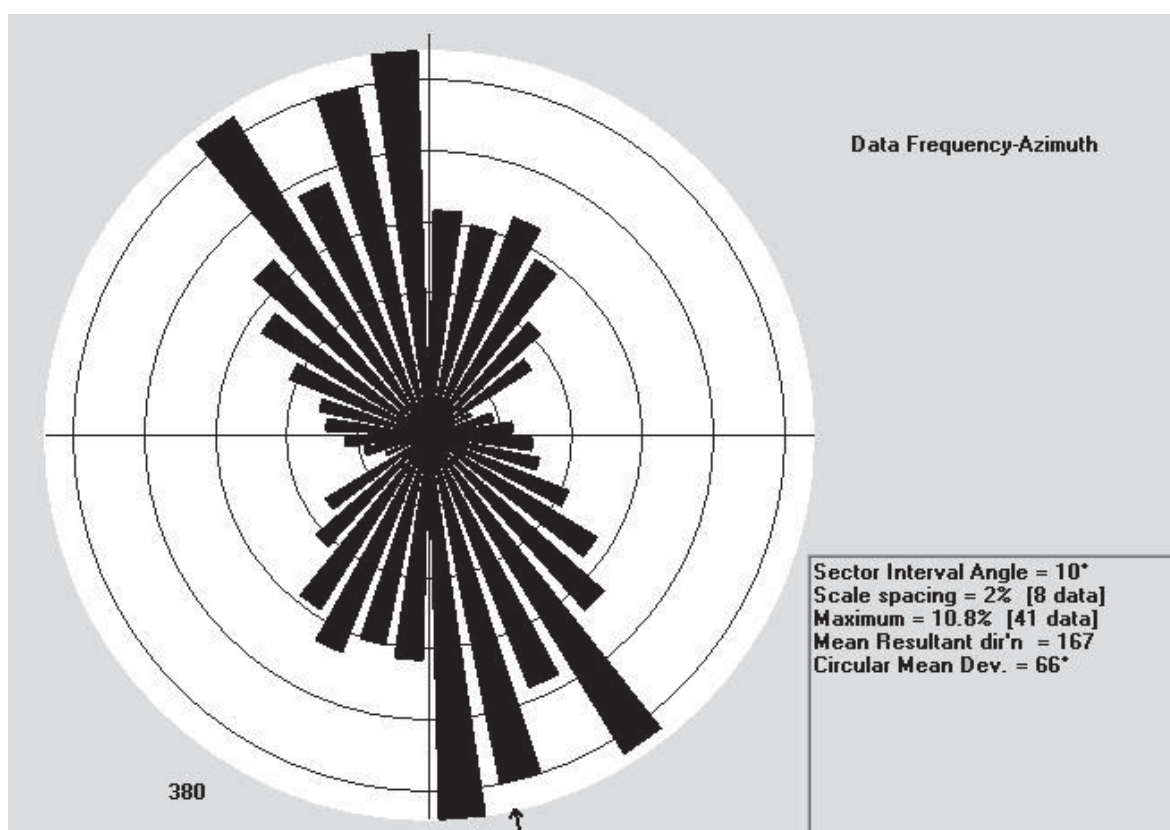


Figura 5\_18 – Diagrama de roseta para os lineamentos interpretados em imagem de satélite.

O diagrama mostra duas direções principais que são marcadas pelos lineamentos de direção NW e NE, sendo que é possível se observar uma maior frequência para os lineamentos de direção NW, seguidos posteriormente pelos lineamentos de direção NE.

Os lineamentos com maior frequência de ocorrência são os de direção NW e posteriormente NE e coincidem com as direções definidas por Fernandes (2000) e Neves (2005), como sendo as direções de maior estiramento do elipsóide de deformação

regional. Desta forma estes grupos de fraturas se tornam importantes, principalmente quando associados.

### 5.3.3 Estruturas Mesoscópicas

Durante os trabalhos de campo a principal estrutura encontrada nos xistos foi a foliação regional S1 e nos granitóides os trabalhos se resumiram basicamente na identificação e medida das famílias de fraturas existentes.

#### 5.3.3.1 Foliação S1

É a principal estrutura encontrada nos xistos presentes na área de estudo e é observada sub-paralela a foliação S<sub>0</sub> e corresponde a fase deformacional definida como D<sub>n+1</sub> por Hackspacher et al. (1992). Esta foliação possui direção aproximada N20E com mergulhos de alto ângulo para NW e às vezes SE (Figura 5\_19).

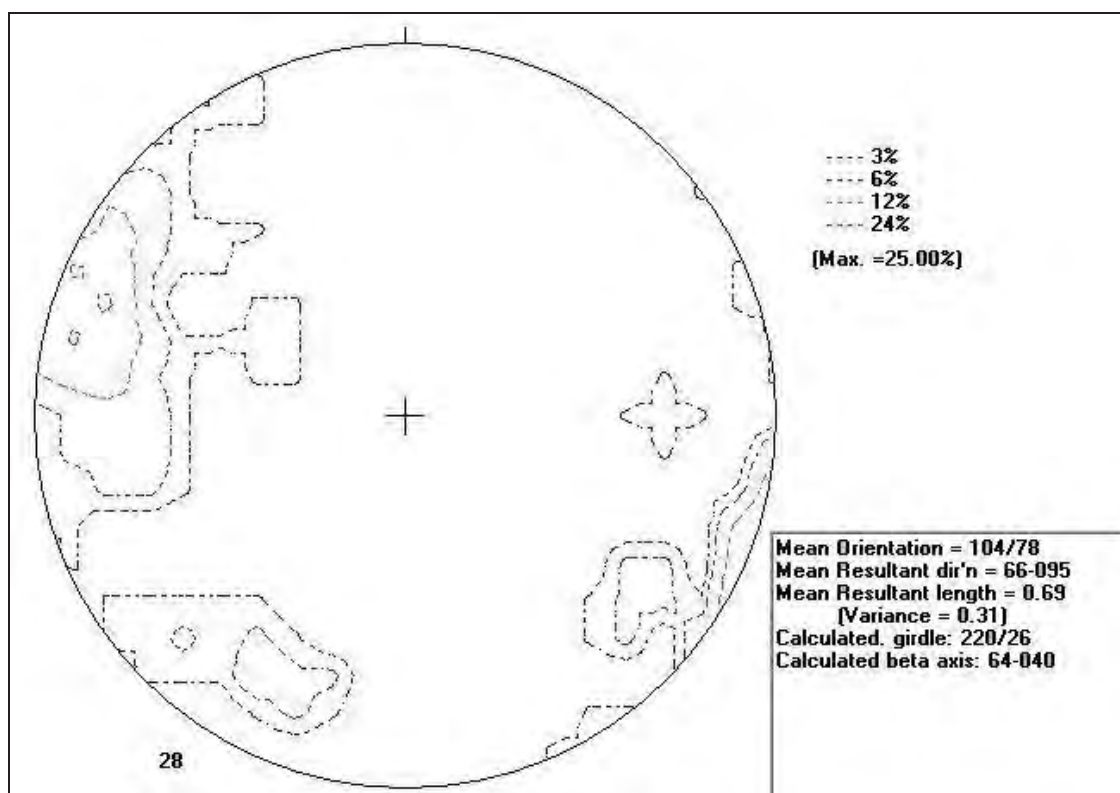


Figura 5\_19 – Diagrama polar para as medidas de foliação S1 realizadas em campo.

Quando próximo à zona de falha que marca o contato com o granitóide São Roque a foliação atinge ângulos de mergulho superiores a 80 graus que tendem a cair para valores em torno de 60/70 graus em regiões centrais da unidade.



### 5.3.3.2 Fraturas

As fraturas foram identificadas em campo principalmente nos afloramentos do Granitóide São Roque, onde é comum identificar pelo menos 3 famílias de fraturas. Para melhor visualização dos dados optou-se pela realização de um diagrama de rosetas (Figura 5\_20) que mostra as direções principais das fraturas medidas.

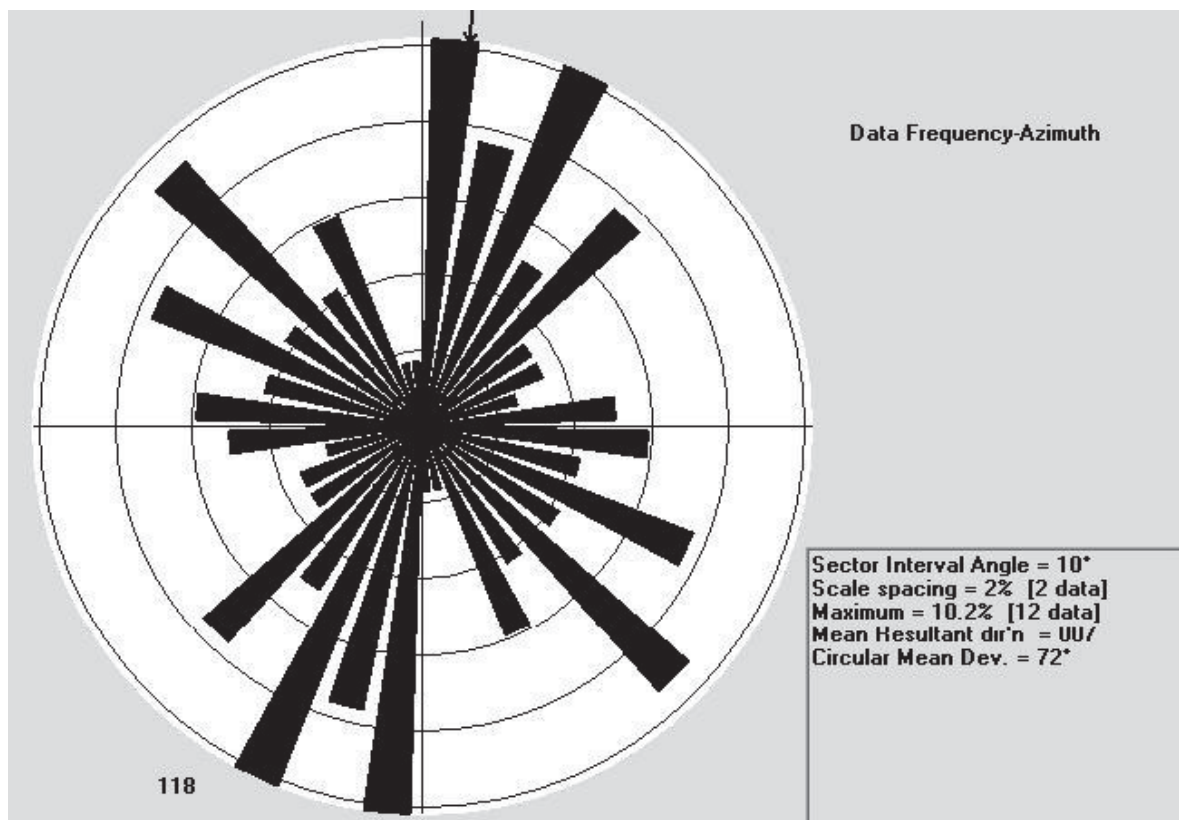


Figura 5\_20- Diagrama de roseta para os fraturamentos medidos em campo.

As fraturas vistas em campo no geral são subverticais e estão relacionadas com os movimentos transcorrentes de direção dextral relacionados com a rotação da Placa Sul Americana (NEVES, 2005). Fraturas subhorizontais foram identificadas somente em afloramentos de grande porte.

No diagrama é possível observar que as fraturas de direção NE são mais frequentes, seguidas pelas fraturas de direção NW. Os fraturamentos de direção NE-SW estão associados às zonas de cisalhamento regional (Extrema, Valinhos e Campinas) que são datadas do pré-cambriano e estão relacionadas com o evento de fragmentação do Gondwana (NEVES, 2005).

## 6 Integração dos Dados

Para a definição das estruturas a serem estudadas pela geofísica, fez-se necessário a realização da integração dos dados de bibliografia, geológicos, estruturais e a respeito dos poços existentes na região. Desta maneira, com o intuito de realizar uma interpretação que considere todos os fatores envolvidos, transportou-se uma metodologia utilizada para a definição de alvos de pesquisa mineral (ouro, ferro, cobre etc) para este estudo de potencial hidrogeológico, onde os fatores condicionantes e relevantes envolvidos são pontuados, sendo 1 atribuído a fatores favoráveis e 2 a fatores não favoráveis.

Para esta análise foram considerados os seguintes fatores:

- 1- Geologia Favorável: foi considerada como geologia favorável para este trabalho a ocorrência de rochas do tipo granítica que possuem um comportamento mais rúptil que os xistos vistos durante o mapeamento e em alguns pontos desenvolvem fraturas abertas que formam um manto de intemperismo de até 15 metros de espessura;
- 2- Estruturas Favoráveis: a estruturação favorável foi definida de acordo com os eventos deformacionais e os elipsóides regionais de estiramento definidos por Fernandes (2000) e Neves (2005), que definiram dois eventos deformacionais que geraram fraturas abertas de direções NE-SW e NW-SE, respectivamente.

Em seu trabalho Neves (2005) constatou que a associação de fraturas de direção NW-SE com fraturas de direção E-W formam pequenos “embaciamentos”, controlados pelo cruzamento de fraturas (Figura 6\_1). Outro fato constatado por Neves (2005) é que vários poços de produção elevada estavam associados a estas regiões.

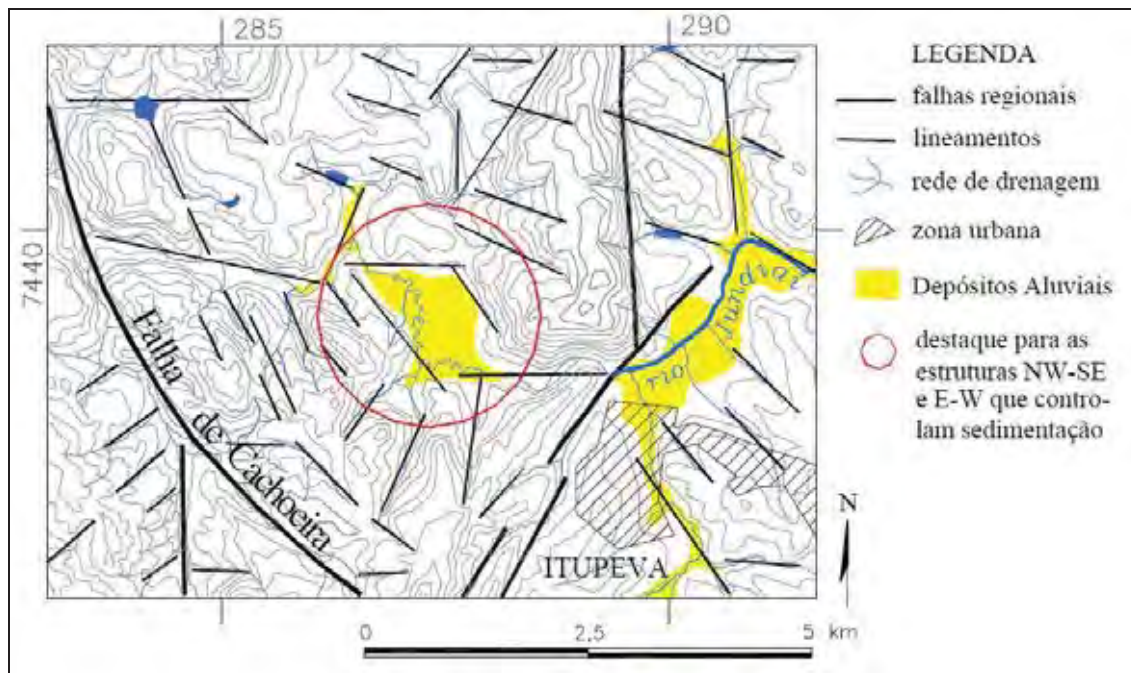


Figura 6\_1 – Exemplo de “embaciamento” controlado pela associação de estruturas e promovendo o acúmulo de depósitos aluviais (NEVES, 2005).

Desta forma foram consideradas como favoráveis, as regiões onde foram verificados cruzamentos de estruturas na imagem.

3- Poços existentes: os poços foram classificados de acordo com sua vazão e divididos em 3 patamares, que foram:

- De 0,0 (poço seco) a 2 m<sup>3</sup>/h (poços capazes de atender a pequenas demandas);
- De 2 m<sup>3</sup>/h a 4 m<sup>3</sup>/h (poços capazes de atender uma demanda de 1000 a 1500 m<sup>3</sup>/mês);
- Acima de 4 m<sup>3</sup>/h (poços que poderiam atender demandas acima de 2000 m<sup>3</sup>/mês).

Considerou-se como positivos para esta análise poços com a vazão variando de 2 m<sup>3</sup>/h a 4 m<sup>3</sup>/h, que seriam capazes de atender pelo menos 50% da demanda do condomínio Villa Verde que consome normalmente de 1500 à 2000 m<sup>3</sup>/mês (informação fornecida pelo condômino Luiz Carlos Trinca).

A partir destas definições os dados foram preparados para a análise.

## 6.1 Estruturas Favoráveis

Primeiramente foram analisados os lineamentos estruturais extraídos da imagem LANDSAT 7, realizando a demarcação dos locais onde ocorre o cruzamento de estruturas, gerando pequenas regiões com potencial estrutural favorável, segundo os critérios definidos anteriormente (Figura 6\_2).

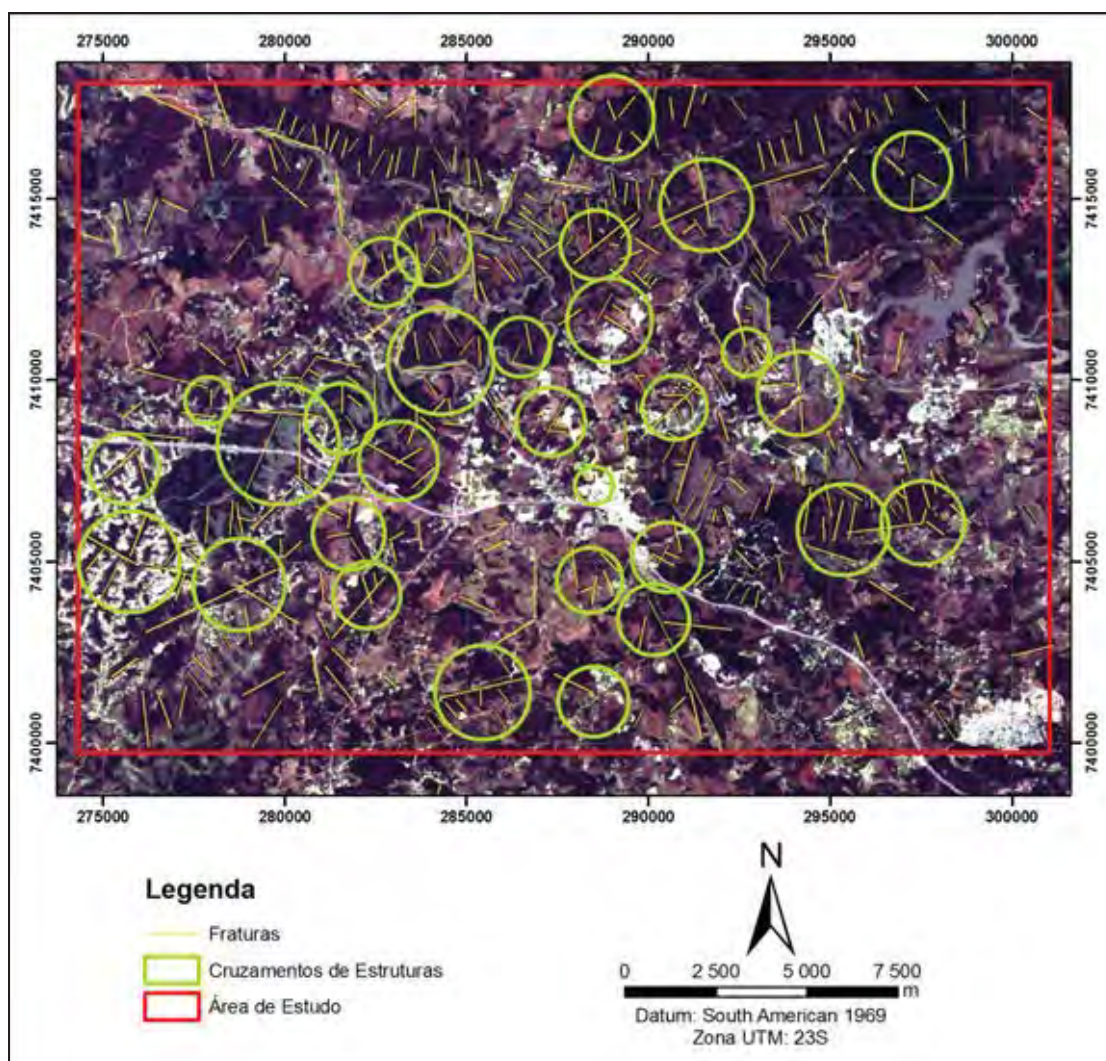


Figura 6\_2 – Demarcação das regiões onde se verificou o cruzamento de estruturas.

## 6.2 Classificação dos Poços

Os poços ocorrentes na área da imagem analisada foram classificados de acordo com a sua vazão, nos patamares definidos anteriormente e plotados na imagem (Figura 6\_3).



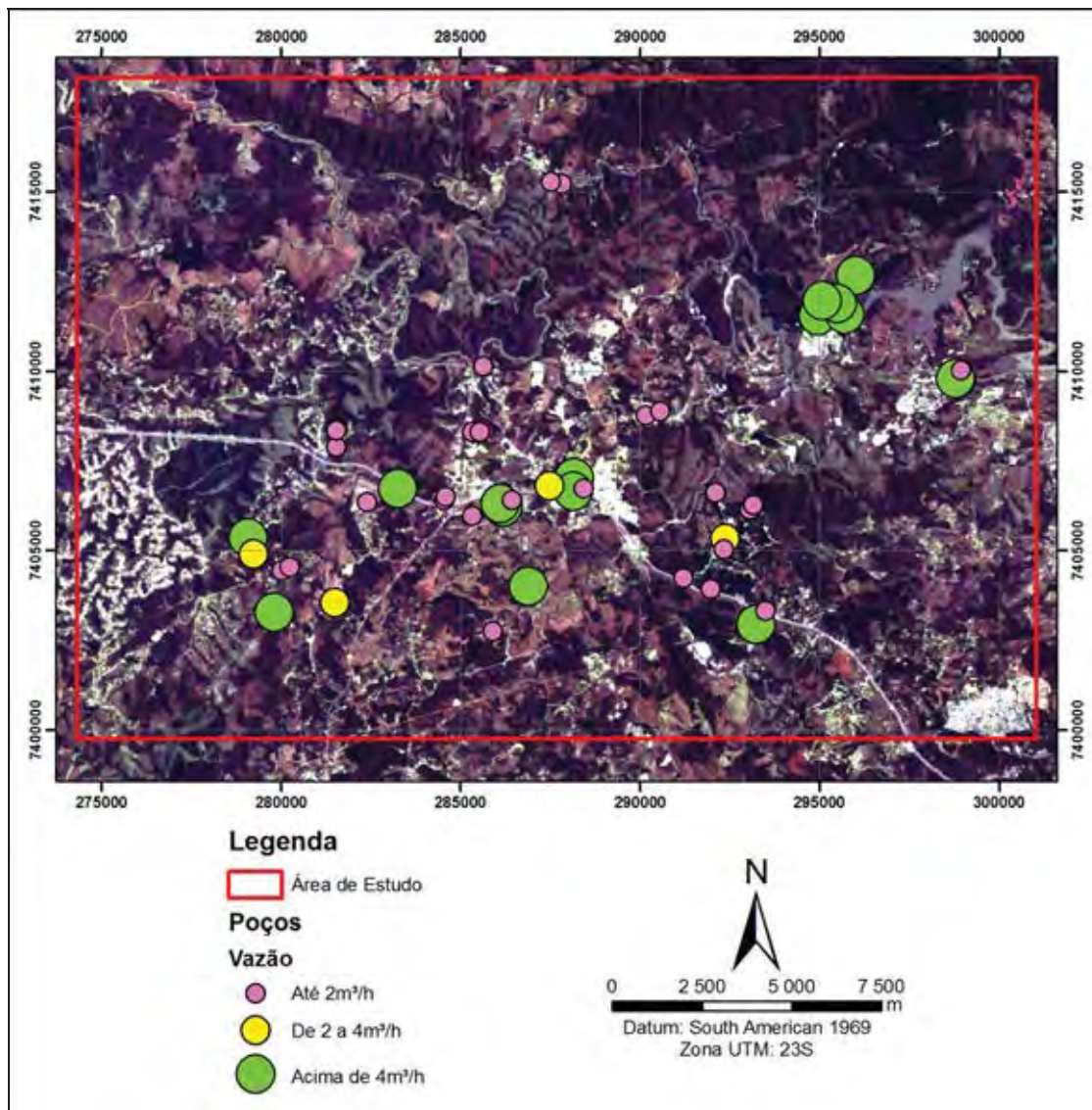


Figura 6\_3 – Poços existentes na área (Fonte: DAAE).

### 6.3 Cruzamento dos Dados

Após a realização desta classificação os dados foram cruzados com a geologia e analisados (Figura 6\_4), sendo traçados alvos de potencial segundo os seguintes critérios:

- Potencial Alto: serão considerados de alto potencial os alvos que atenderam aos três critérios;
- Potencial Moderado: serão considerados de moderado potencial os alvos que atendam dois dos critérios;

- Potencial Baixo: serão considerados de baixo potencial os alvos que atendam somente um dos critérios.

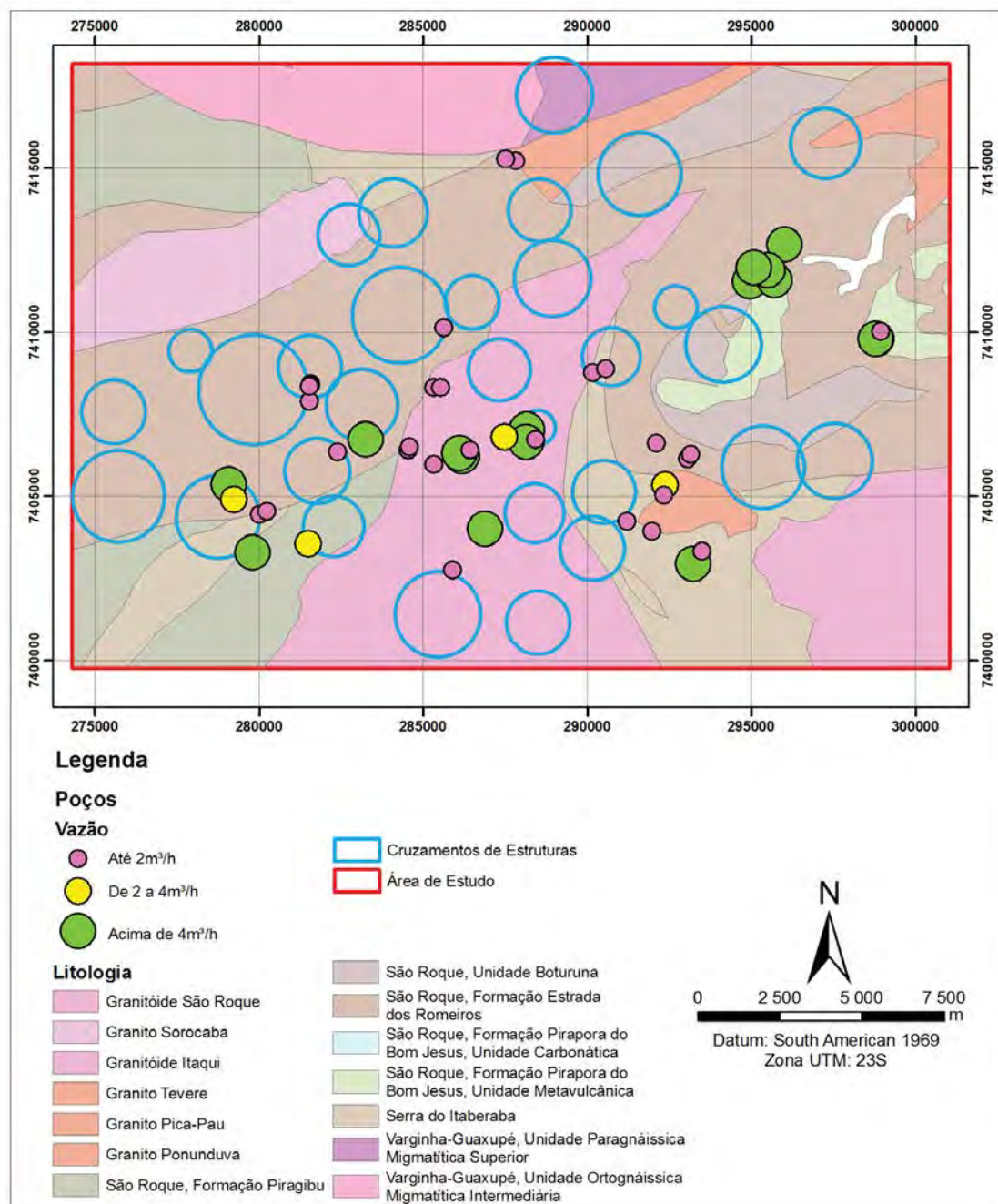


Figura 6\_4 – Mapa geológico com os poços e alvos estruturais.

Com base nos critérios definidos para a classificação de potencial, foram gerados os alvos (Figura 6\_5).



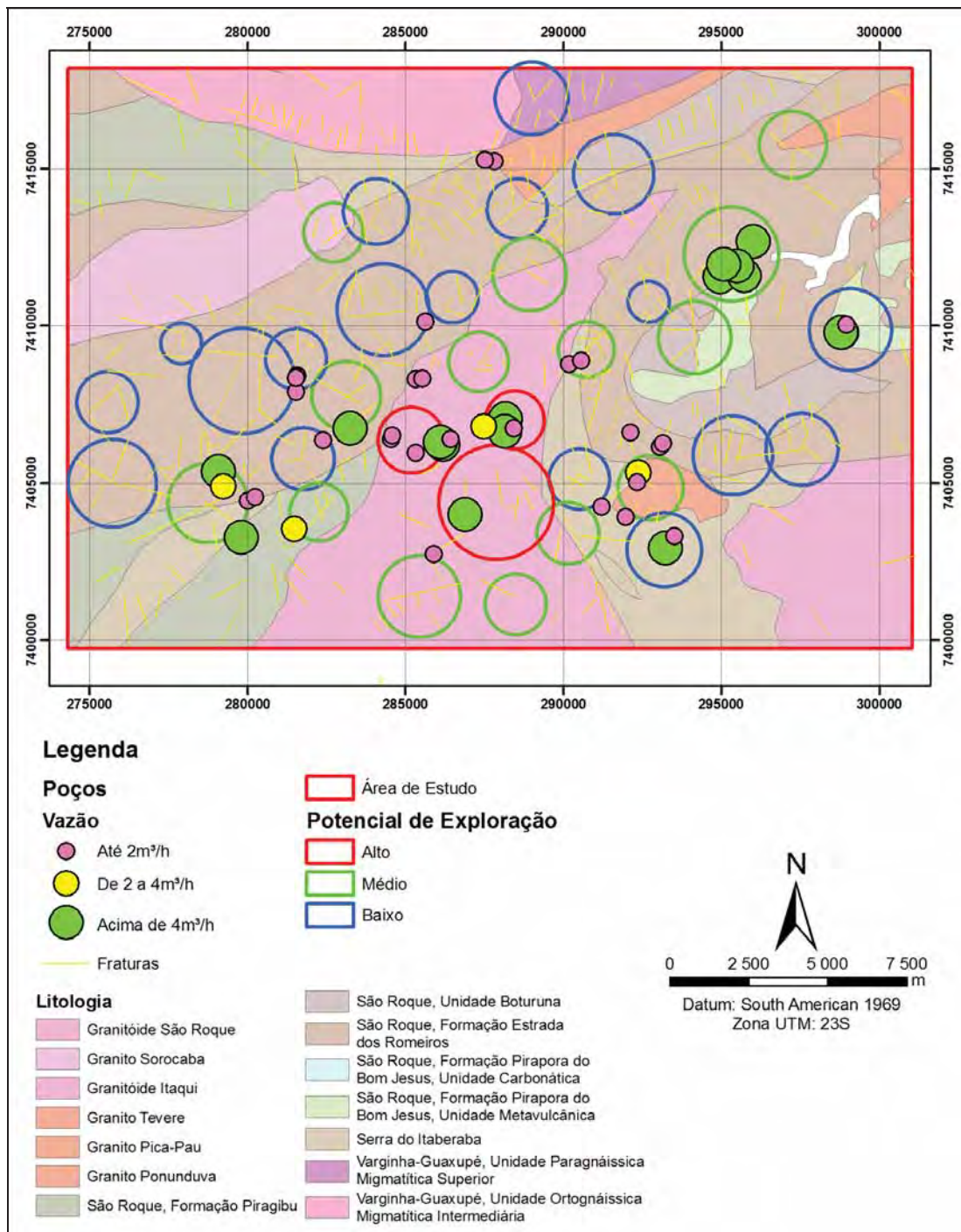


Figura 6\_5 – Mapa geológico com os alvos de potencial traçados.

#### 6.4 Mapa de Potencial

Com posse dos alvos de potencial traçados e classificados na etapa anterior como baixo (1), moderado (2) e alto (3), decidiu-se realizar uma expansão deste resultado que é pontual para o restante da área de estudo. Desta maneira, os dados foram interpolados

pelo método da mínima curvatura, possibilitando uma visão da influência destes alvos na área como um todo (Figura 6\_6).

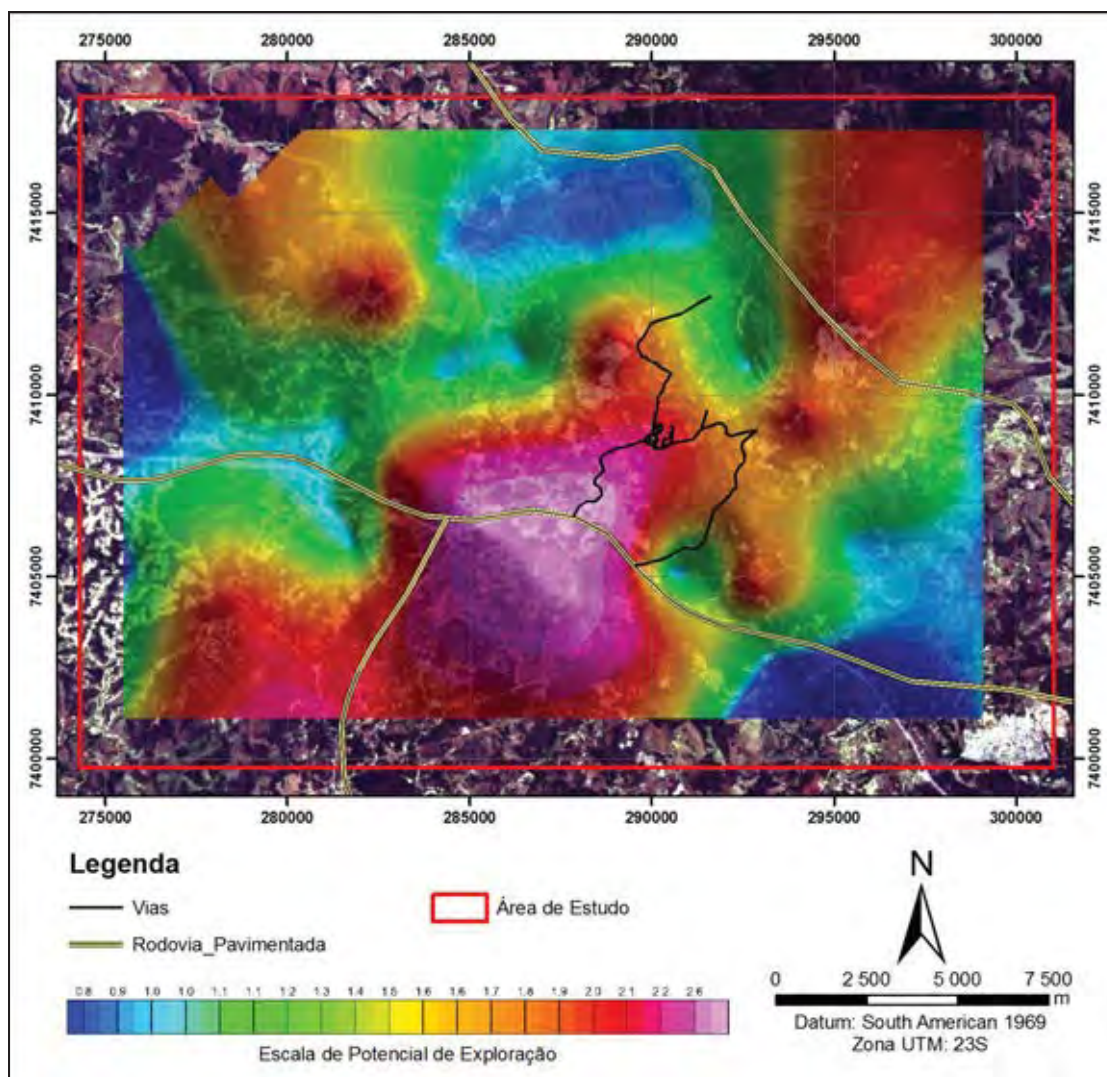


Figura 6\_6 – Mapa de potencial de exploração hidrogeológico para a área de estudo.

Pode-se verificar neste mapa que a área classificada como de maior potencial está localizada nos arredores da zona urbana do Município de Araçariguama, onde se tem um rio que atravessa a cidade no sentido E-W, associado a estruturas de direção NW-SE e tendo a presença de poços com produtividade superior a  $4 \text{ m}^3/\text{h}$ .

A zona com os poços de maior potencial possui as características estruturais definidas por Neves (2005) como sendo as mais favoráveis e estão associados aos granitóides que foram definidos como o litotipo de maior potencialidade para abrigar



um aquífero fraturado na área de estudo. Desta maneira pode-se dizer que a metodologia utilizada para a geração dos alvos foi validada.

### **6.5 Programação de Geofísica**

A área do condomínio Villa Verde está localizada em uma área do mapa classificada com um potencial de exploração moderado (aproximadamente 2), com presença nas proximidades de lineamentos de direção NE-SW e NW-SE e rochas graníticas. Desta maneira, os trabalhos de geofísica devem se concentrar na área de ocorrência do granito e investigar a ocorrência dentro da área do condomínio destas estruturas e seus possíveis cruzamentos.

## 7 Ensaios Geofísicos

Com base nos resultados de mapeamento geológico e análise estrutural elaborou-se uma programação de trabalhos geofísicos envolvendo métodos elétricos e eletromagnéticos que foram executados em duas campanhas de campo. Os ensaios foram programados visando cruzar as estruturas (falhas e fraturas) de direção NE-SW que correspondem, com as estruturas associadas, à direção de maior estiramento do elipsóide de deformação regional, coincidente também, com a maior estrutura encontrada na área de estudo, a falha que marca o contato entre o Granitóide São Roque e os xistos da unidade Serra do Itaberaba.

Realizou-se na primeira campanha de campo três linhas de GPR, sendo que 2 linhas cruzaram perpendicularmente a zona de falha, visando marcar a mesma em subsuperfície. A terceira linha foi realizada na região do Poço 2 (seco), com o objetivo de investigar a existência de alguma estrutura que tenha motivado a locação do mesmo.

Na segunda campanha de geofísica, optou-se pela utilização dos métodos elétricos, com a execução de quatro linhas de caminhamento elétrico (CE), que cruzaram perpendicularmente a zona de falha e cinco pontos de sondagem elétrica vertical. Na figura a seguir tem-se a localização dos ensaios realizados e sua relação com a geologia de superfície.

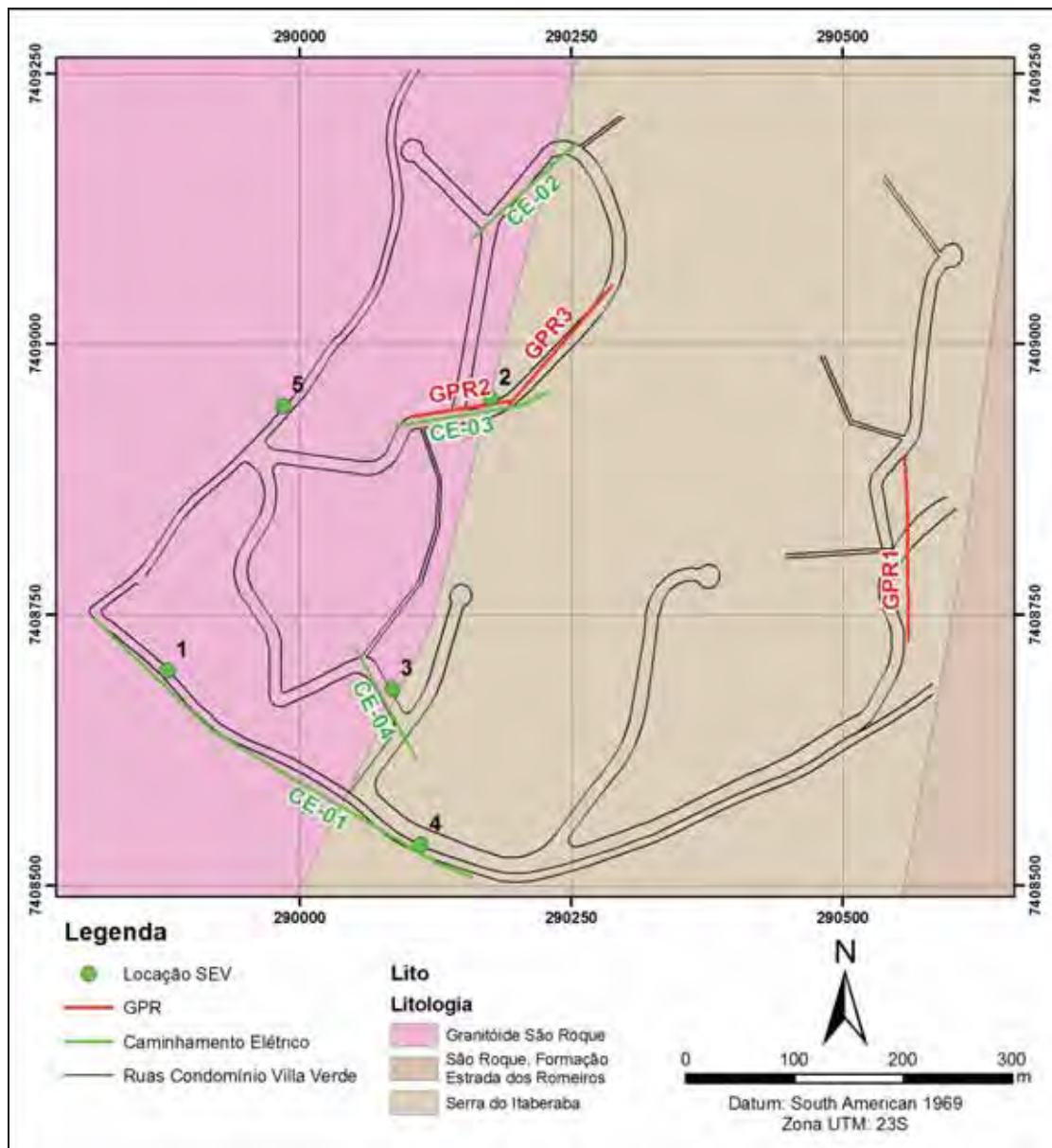


Figura 7\_1 – Localização dos ensaios geofísicos realizados em campo.

Os resultados dos ensaios geofísicos serão comentados por método e técnica, e posteriormente serão comentados os resultados obtidos.

## 7.1 GPR

A primeira e terceira linha de GPR foram realizadas na área de ocorrência do xisto, sendo que a primeira linha cruzou o poço 2 (seco). As linhas de GPR 2 e 3 são continuidade uma da outra (a linha 3 iniciou no final da linha 2, houve somente uma mudança de direção) e tiveram como objetivo determinar o contato entre o granito e o

xisto, esse contato foi interceptado pela linha número 2, desta maneira a linha número 3 iniciou no xisto.

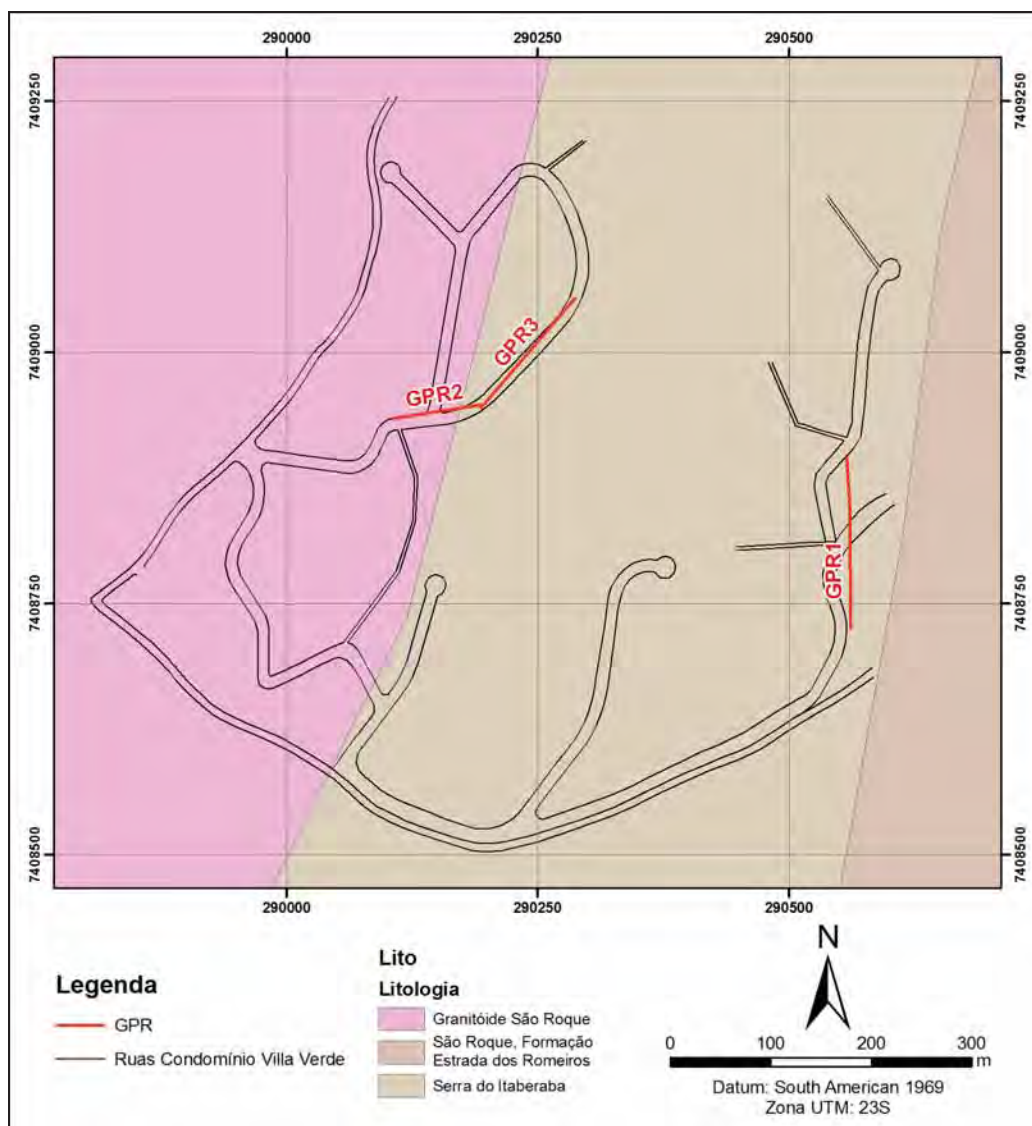


Figura 7\_2 – Localização das linhas de GPR na área do condomínio vila verde e sua relação com a geologia de superfície.

### 7.1.1 GPR-01

Realizada na região em que foi perfurado o poço 2, é possível observar neste perfil GPR hipérbolas associadas a interferências eletromagnéticas em superfície (carro e rede de energia), e em subsuperfície (caixas de tubulação). Observa-se também no radargrama que houve uma atenuação bastante grande das ondas eletromagnéticas a

partir de 150 ns. Na figura 7\_3 é mostrado o perfil GPR processado no software Reflex e na figura 7\_4 o mesmo perfil GPR, com as hipérboles identificadas e assinaladas.

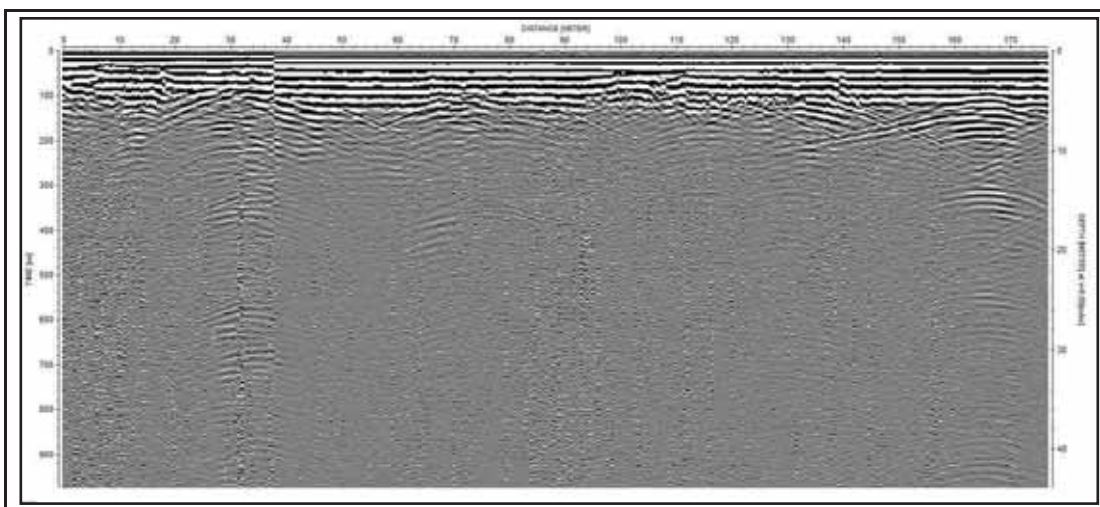


Figura 7\_3 – Perfil GPR da linha 1 processado no software Reflex.

Em amarelo foi assinalada uma descontinuidade no radargrama, que foi ocasionada pela reinicialização do equipamento, devido a um problema no software durante o levantamento.

Em azul foram assinaladas as hipérboles atribuídas a interferências aéreas com velocidade de 0,3m/ns. A hipérbole A1 representa a interferência causada por um carro estacionado, já as hipérboles de A2 a A5 são relacionadas a rede elétrica que possui ligações com varias residências nessa região.

Em vermelho foram traçadas as hipérboles associadas a interferências (caixas e dutos enterrados). A hipérbole I1 marca a localização da caixa do poço 2, que hoje está coberta por asfalto e a hipérbole I2 pode representar um duto, por possuir a mesma velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas atribuída ao meio (0,12m/ns), mas não foi verificado em campo nenhum sinal de caixa ou duto.

Em verde foi assinalada uma hipérbole atribuída a alguma mudança no meio geológico, pois ela apresenta uma velocidade de propagação das ondas GPR de 0,15m/ns. Esta mudança de velocidade pode representar um nível mais arenoso no xisto, ou até mesmo alguma descontinuidade.



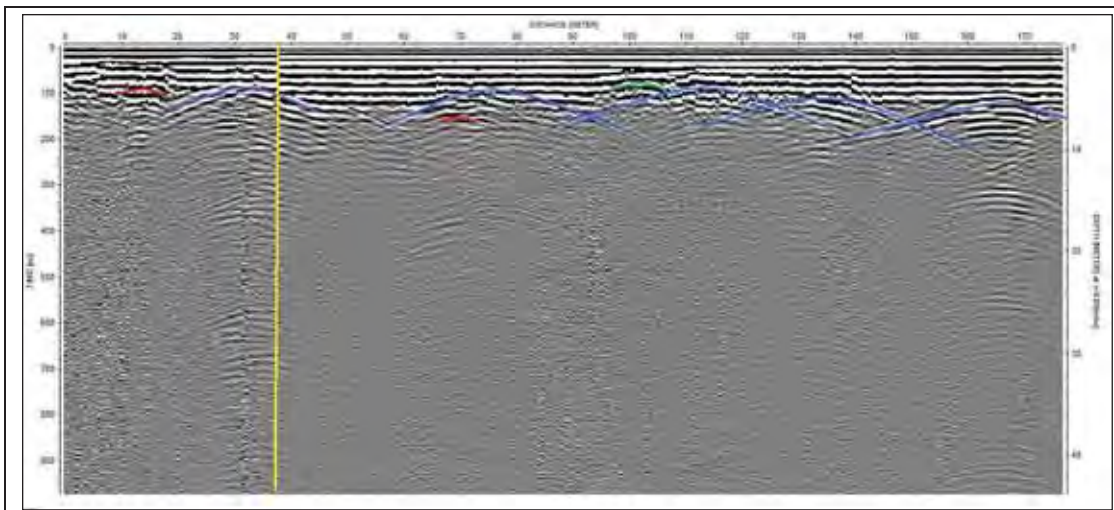


Figura 7\_4 – Perfil GPR da linha 1 com as hipérboles e estruturas assinaladas e identificadas.

### 7.1.2 GPR-02

Este perfil foi realizado na região oeste do condomínio visando identificar estruturas geológicas no granito e o contato entre o xisto e o granito em subsuperfície. Serão apresentados dois radargramas desta linha, o primeiro (Figura 7\_5) é o perfil processado no software Reflex e o segundo (Figura 7\_6) é o mesmo perfil com as estruturas identificadas assinaladas.

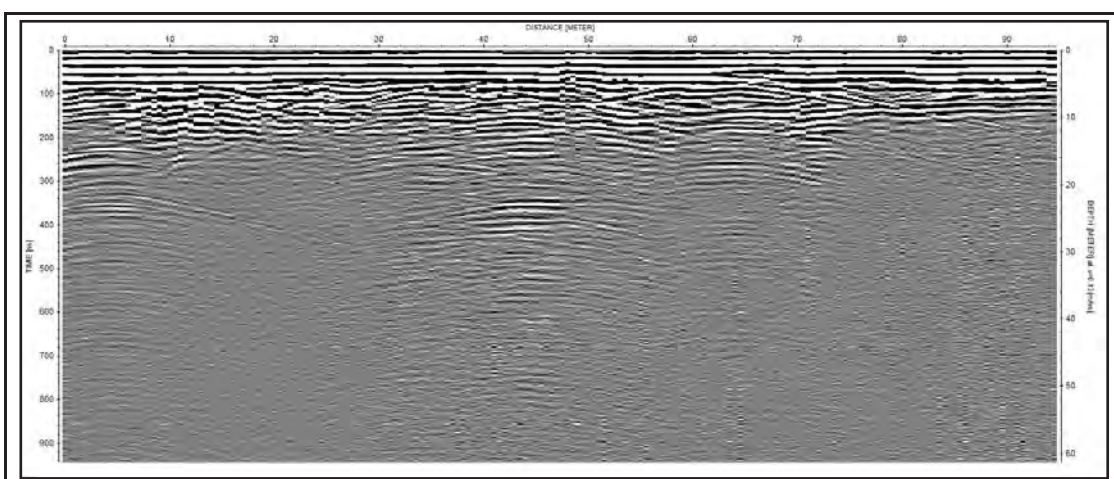


Figura 7\_5 – Perfil GPR da linha 2 processado no software Reflex.

A uma profundidade de aproximadamente 5 metros ocorre uma interface (assinalada em amarelo) que possui uma profundidade coincidente com a do perfil de

solo observado em afloramento (ponto 6). Esta interface modelada pode ser atribuída ao contato solo/saprolito.

Em azul foi assinalada uma zona de perturbação verticalizada que marca uma mudança de interface no radargrama. À direita desta perturbação é possível observar uma mudança no sinal do radar, ele fica mais atenuado e não é mais visível nenhuma estrutura. Esta região pode ser atribuída a zona de falha que marca o contato entre o granito e o xisto.

É interessante observar que à direita da zona assinalada em azul o radargrama fica semelhante ao radar GPR-01, que foi feito na área de domínio do xisto.

Em verde foram assinaladas pequenas descontinuidades no perfil, que aparecem na região de ocorrência do granito, essas descontinuidades são verticais e se projetadas possuem direção NNW. Em campo é comum observar em afloramentos fraturas sub-verticais nesta direção, sendo possível relacionar essas pequenas descontinuidades ao fraturamento do manto de alteração que pode formar um aquífero de baixa produtividade, se possuir extensão lateral (SINGHAL E GUPTA, 1999), estando diretamente relacionada com a recarga do aquífero cristalino.

Em vermelho foram traçadas as hipérbolas G1, G2 e G3 que possuem velocidade aproximada de 0,12m/ns, que é igual a velocidade de propagação das ondas GPR em rochas graníticas (Tabela 4.2.6\_1). Essas hipérbolas são atribuídas aos matacões da zona saprolítica, que são envolvidos por um solo arenoso gerado pelo intemperismo nas zonas de fratura, indicando que o contato com a rocha sã está há pelo menos 15 metros de profundidade.

Em laranja foi traçada a hipérbole I1 que possui velocidade aproximada de 0,2m/ns (solo arenoso seco), ela é atribuída a uma caixa de esgoto que existe no início da linha. Sua profundidade é de aproximadamente 3,5 metros no perfil GPR.

Em rosa foi traçada a hipérbole A1, com velocidade de 0,3m/ns, essa hipérbole pode ser atribuída à presença da rede de energia acima do solo, devido a sua velocidade.

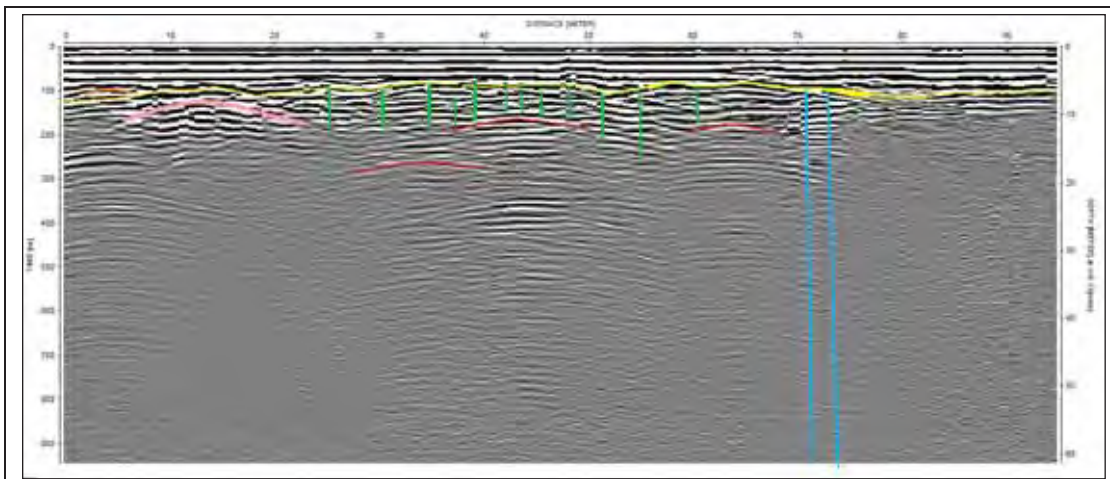


Figura 7\_6 – Perfil GPR da linha 2 com as hipérboles e estruturas assinaladas e identificadas.

### 7.1.3 GPR-03

A linha 3 foi iniciada no final da linha 2, mas sua direção foi NE-SW devido a existência de casas no local. Esta linha objetivou também buscar o contato entre o xisto e o granitóide, mas ela iniciou no xisto, pois o contato foi interceptado no final da linha GPR-02.

Foi possível observar nesta linha (Figuras 7\_7 e 7\_8) interferências relacionadas à rede elétrica e a caixas de esgoto das residências.

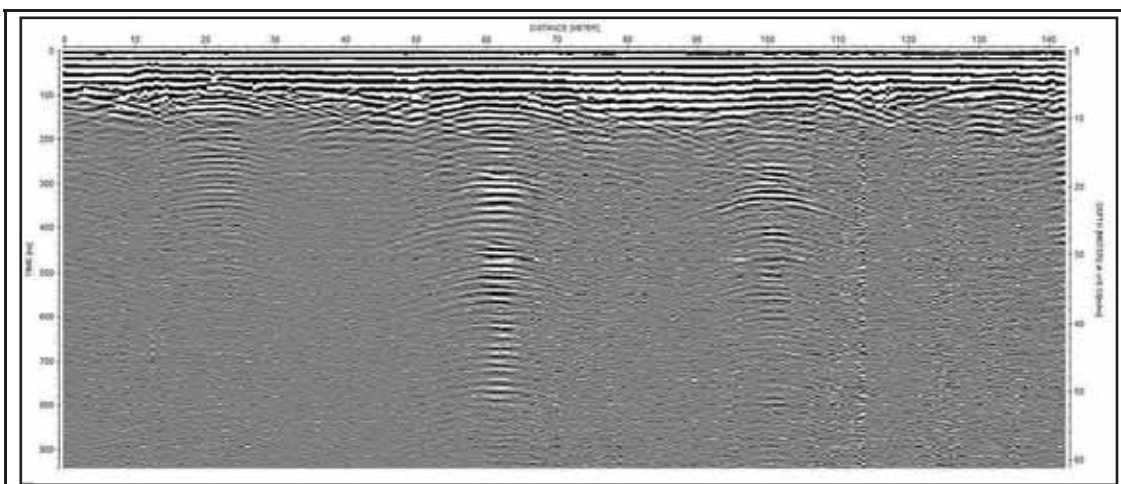


Figura 7\_7 - Perfil GPR da linha 3 processado no software Reflex.



A hipérbole marcada em verde possui velocidade de 0,3m/ns, ela é característica de interferência aérea e nessa localidade existe um transformador. Desta maneira, ela é atribuída à interferência eletromagnética gerada por ele.

Em vermelho estão assinaladas hipérboles com velocidade entre 0,2m/ns a 0,25m/ns que podem ser atribuídas à ocorrência de caixas e dutos de esgotos das casas existentes na rua onde foi realizado o ensaio.

Na posição de 110 metros é possível visualizar no radargrama pequenas estruturas de direção NE, elas podem representar parte de uma hipérbole maior, pois nesta região existe um transformador em um poste.

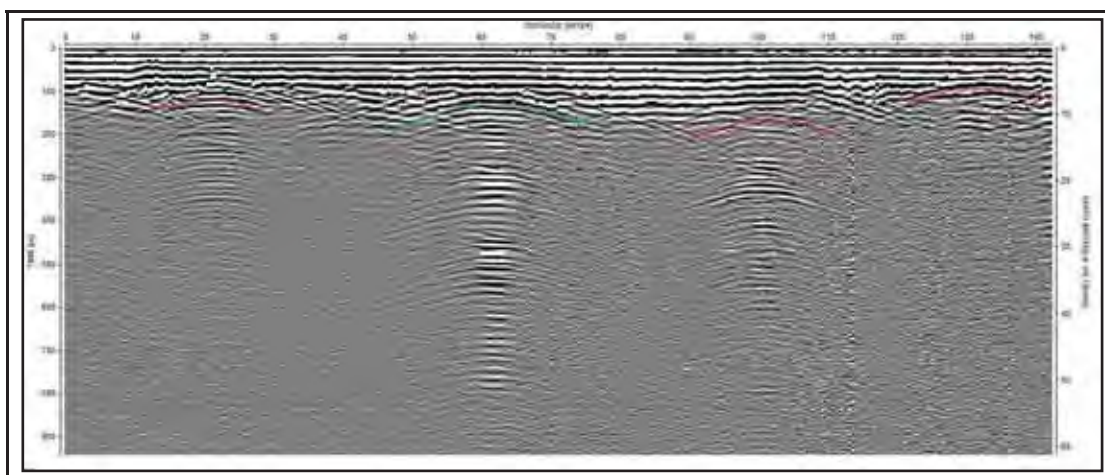


Figura 7\_8 - Perfil GPR da linha 3 com as hipérbolas e estruturas assinaladas e identificadas.

## 7.2 Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

Foram realizadas 5 sondagens elétricas verticais na área do condomínio com o intuito de verificar as relações de contato entre o solo, rocha e saprólito na área de estudo (Figura 7\_9). Desta forma, realizaram-se 2 sondagens na zona de contato entre o granito e o xisto dentro do condomínio (posições favoráveis para a locação de um poço), uma sondagem no granito e uma seção constituída pelas SEV 01 e 04 para estudar a relação de contato entre o granito e o xisto.

No geral as sondagens elétricas realizadas obtiveram um alcance de profundidade em torno de 30 metros e obtiveram sucesso na determinação da interface solo/saprólito/rocha.

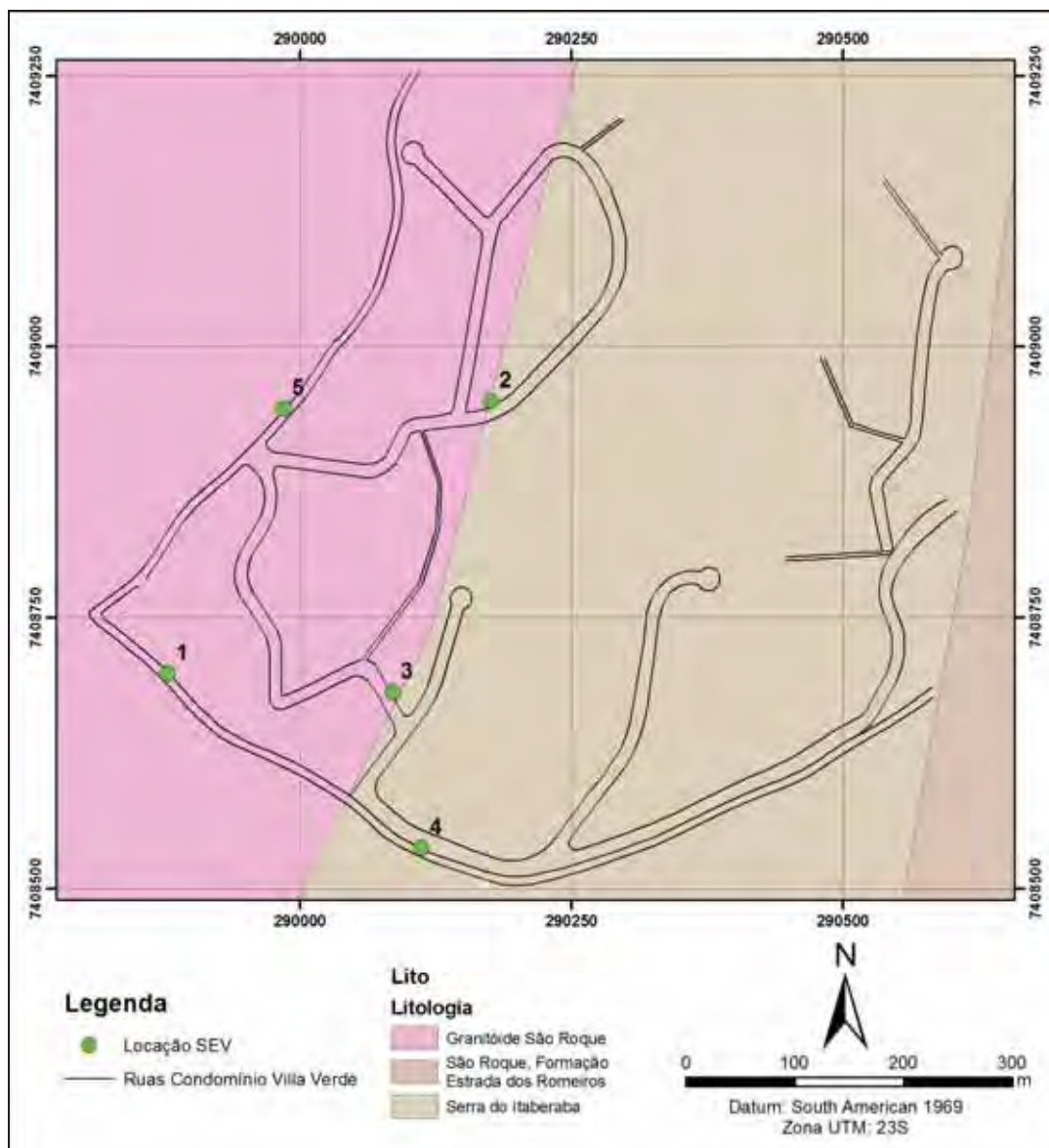


Figura 7\_9 – Localização das sondagens elétricas realizadas.

### 7.2.1 Seção 01\_04

As SEVS 01 e 04 foram interpretadas em conjunto por estarem alinhadas perpendicularmente ao “trend” principal. Foi realizada uma seção com estas duas sondagens, onde se aplicou somente a correção de topografia, inserindo-se a cota de cada SEV e a distância entre elas na seção (Figura 7\_10).

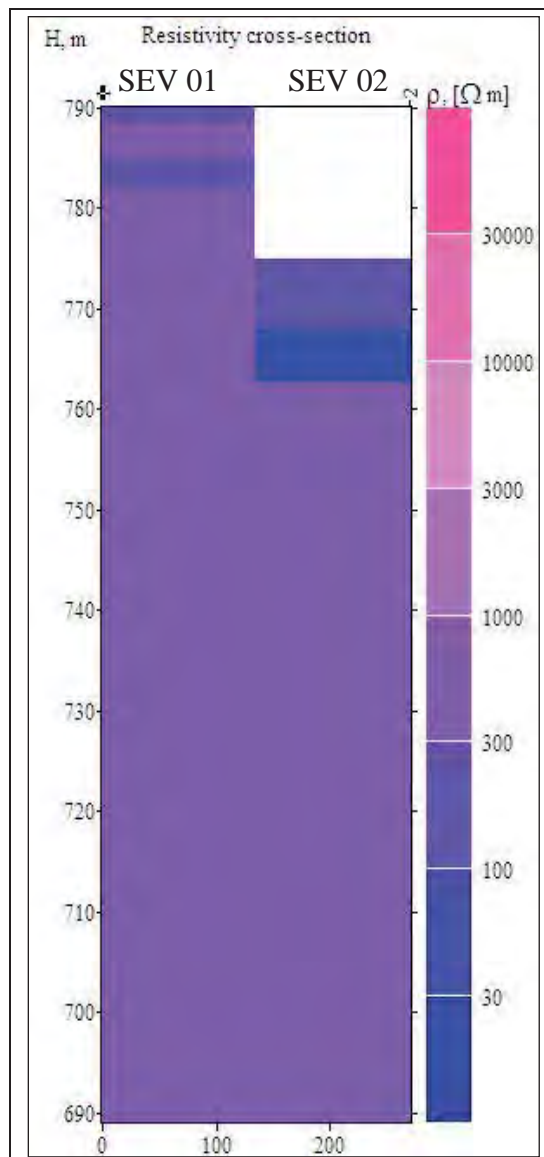


Figura 7\_10 – Seção de sondagem elétrica vertical modelada, mostrando as interfaces geolétricas modeladas.

A SEV número 1 foi realizada na área de ocorrência do granito e marcou o contato do solo com o saprolito em aproximadamente 2 metros de profundidade e o contato do saprolito com a rocha em 8 metros, mostrada pela queda de resistividade na interface rocha/saprolito, que é marcada em campo por fraturas horizontais intemperizadas (Figura 7\_11).



Figura 7\_11 – Afloramento de Granito com um bloco restrito por fraturas subhorizontais e subverticais.

A SEV número 4 foi realizada em cima de um afloramento de xisto e mostrou em seu início uma baixa resistividade que pode ser atribuída à ocorrência do xisto. A 10 metros de profundidade ocorre uma interface de aproximadamente 7 metros de espessura com uma resistividade mais baixa, que pode ser atribuída à zona de contato entre o granito e o xisto.

Na pseudo-secção gerada para estas sondagens elétricas (Figura 7\_12), é possível observar uma mudança verticalizada na resistividade aparente, que nos mostra a mudança física do meio, com o xisto apresentando uma resistividade mais baixa que o granito. Esta mudança é visível no caminhamento elétrico CE-01 que passa por estes dois pontos de SEV analisados.

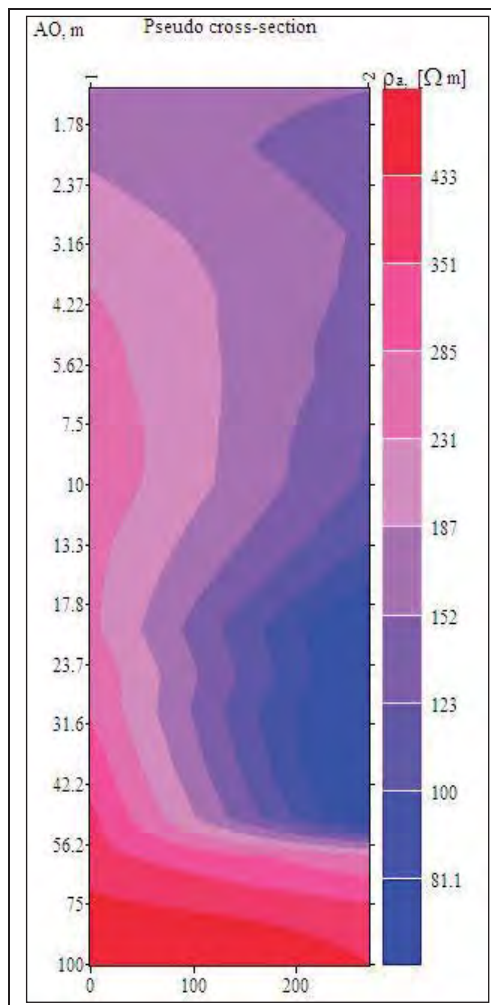


Figura 7\_12 – Pseudo-seção da SEV 01 e 04, mostrando uma mudança verticalizada na resistividade aparente.

### 7.2.2 SEV 02 e 03

As sondagens elétricas verticais (SEV) número 2 e 3 foram realizadas dentro da área do condomínio, na região de contato entre o granito e o xisto. Os pontos centrais destas sondagens elétricas foram locados em duas ruas que poderiam abrigar um segundo poço (Figura 7\_13).

Estas sondagens mostraram um capeamento de solo com uma espessura entre 1 e 2 metros, com o contato saprolito rocha sã em aproximadamente 8 metros de profundidade. Na SEV 03 foi modelada, no nível correspondente ao saprolito, uma interface de resistividade mais baixa (Figura 7\_14), que pode indicar um nível de saturação maior no solo naquele local (região de nascente da drenagem existente no condomínio).

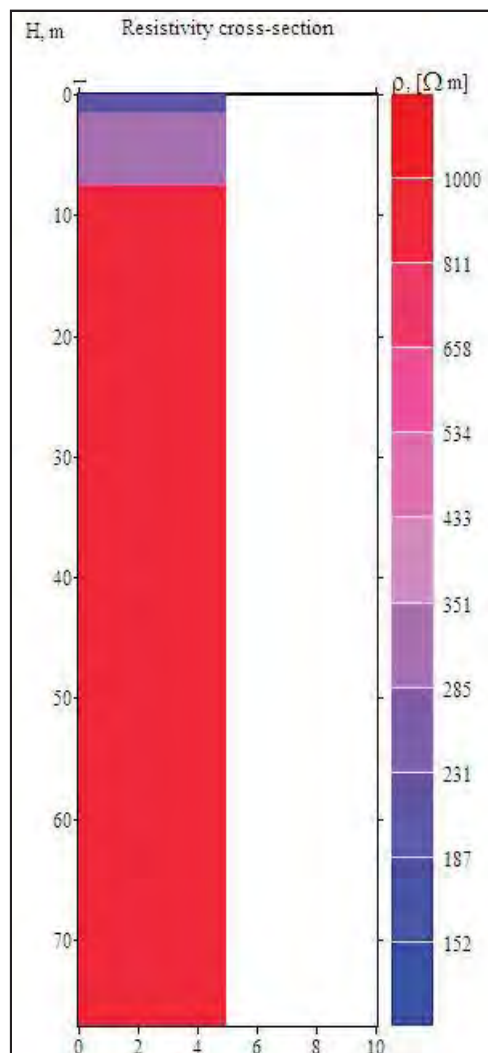


Figura 7\_13 - Sondagem elétrica vertical invertida (SEV 02), mostrando as interfaces geolétricas modeladas.

Essa zona de baixa resistividade pode estar relacionada com o manto de alteração, que é uma importante zona de recarga de aquíferos do tipo fraturado, indicando que este nível possui em torno de 10 metros nesse local.



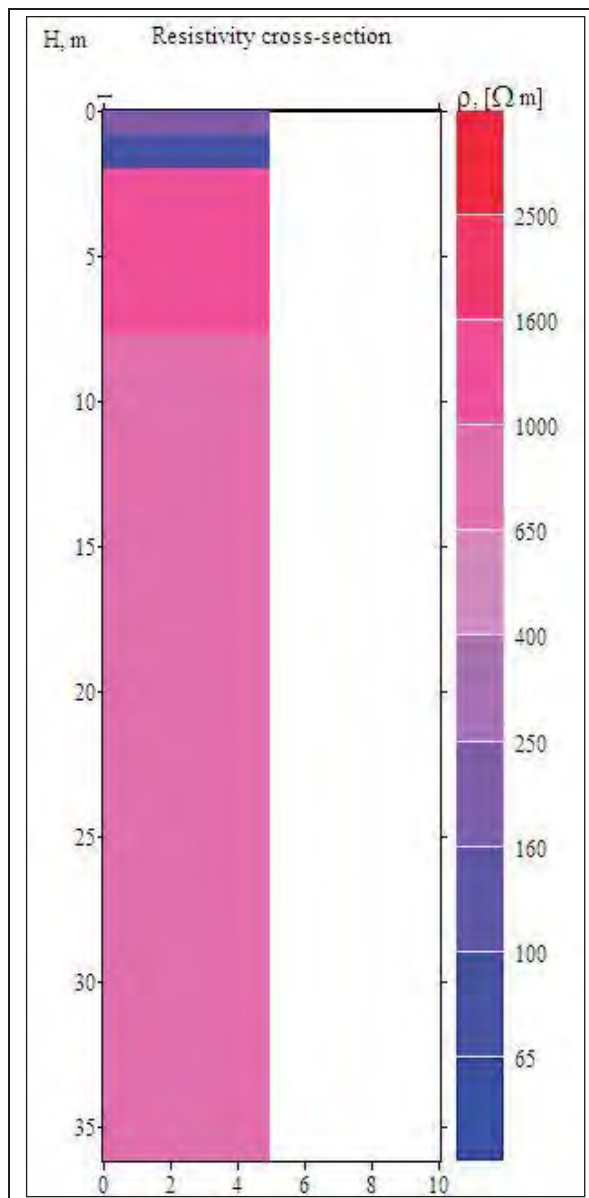


Figura 7\_14 - Sondagem elétrica vertical invertida (SEV 03), mostrando as interfaces geolétricas modeladas.

### 7.2.3 SEV 05

A SEV 05 foi realizada na região de ocorrência do granito, longe do contato com o xisto, com a finalidade de verificar a espessura da zona saprolítica do granito na área do condomínio e obter um guia de calibração para as interpretações próximas as zonas de contato, onde as curvas da SEV foram de pior qualidade.

Foram modelados 3 níveis para esta SEV (Figura 7\_15), sendo que:

- Nível 1: Com uma espessura de aproximadamente 1,5 metros ele pode ser relacionado com o nível de solo nessa região, que em afloramento possui cerca de 2 metros de espessura.

Nível 2: Possui cerca de 10 metros de espessura e está sendo relacionado com a zona saprolítica do granito (manto de alteração).

Nível 3: Este terceiro nível está sendo relacionado com o contato de topo da rocha sã que está ocorrendo na área com uma profundidade variando de 8 a 15 metros de profundidade, conforme visto no perfil GPR 02 e na seção 01\_04 de sondagem elétrica vertical.

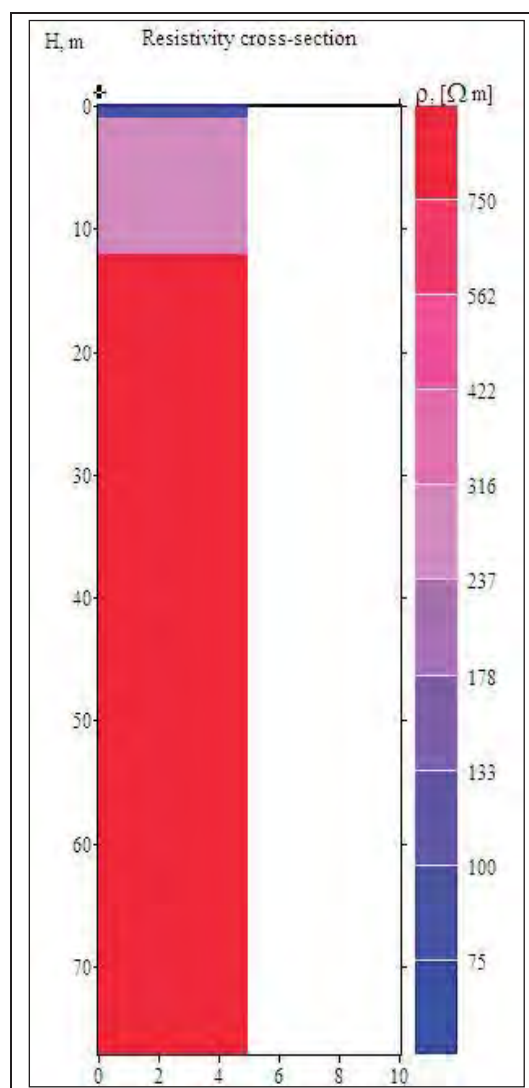


Figura 7\_15 - Sondagem elétrica vertical invertida (SEV 05), mostrando as interfaces geoeletricas modeladas.



### 7.3 Caminhamento Elétrico

Foram realizadas quatro linhas de caminhamento elétrico (CE) na área do condomínio com o intuito de verificar a continuidade e o comportamento no contato entre o xisto e o granito em subsuperfície (Figura 7\_16). Os caminhamentos 2, 3 e 4 foram realizados dentro da área do condomínio e por isso enfrentou-se problemas de espaço para realizar o arranjo, que ficou limitado à extensão das ruas e com no máximo 4 níveis de investigação, devido a não possibilidade de se estender o arranjo.

A presença de caixas de esgoto e dutos de energia interferiu na qualidade dos dados, sendo que nos caminhamentos 2 e 3 as únicas anomalias identificadas são atribuídas a interferências rasas.

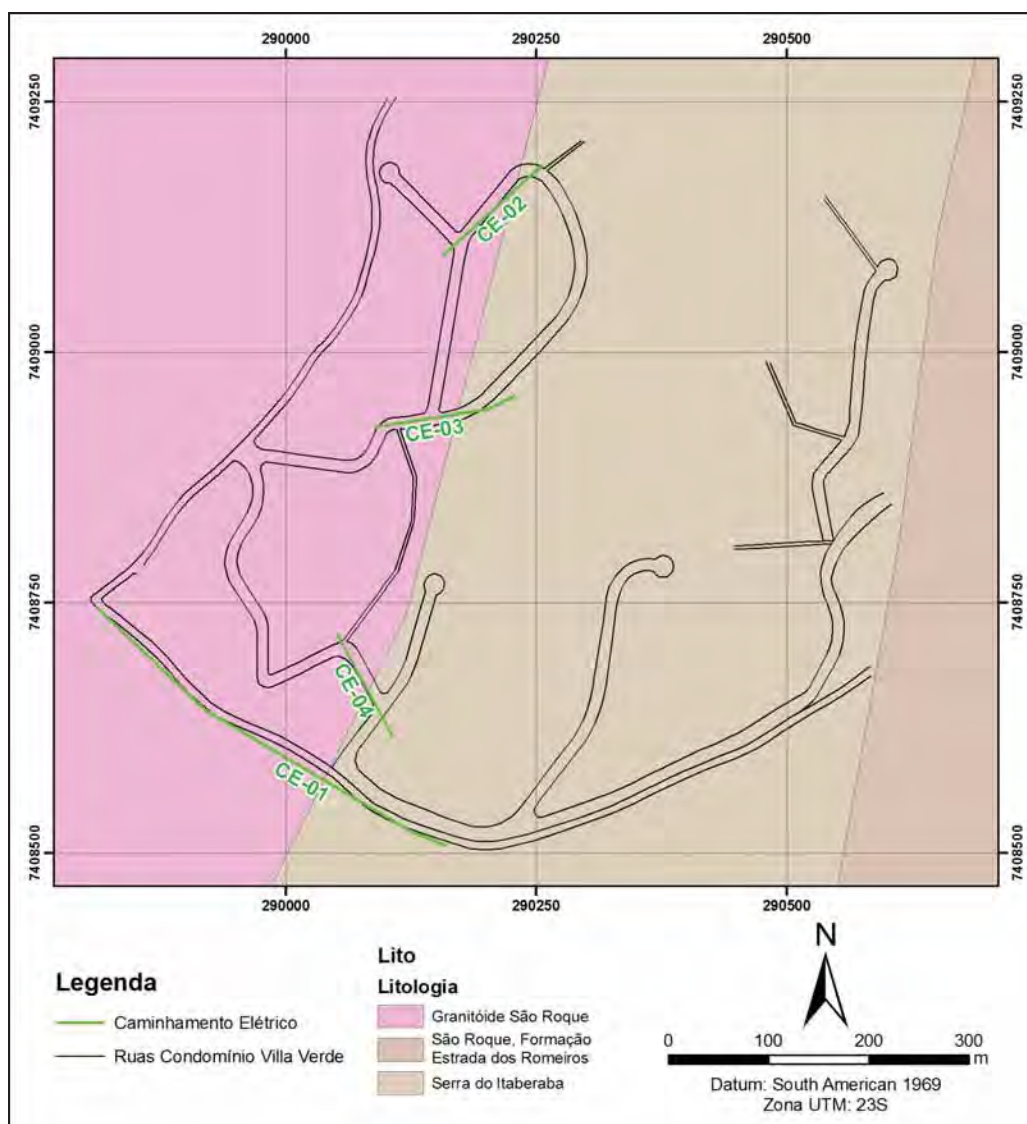


Figura 7\_16 – Localização das linhas de caminhamento elétrico.

### **7.3.1 Caminhamento CE01**

Este caminhamento foi realizado na estrada municipal que passa ao lado do condomínio. Foi realizada a inversão dos dados e a correção de topografia (Figura 7\_17), sendo possível dar destaque aos seguintes pontos neste perfil:

- 1- Nas posições de 100 e 240 metros da linha ocorre uma diminuição da resistividade aparente em profundidade, que pode ser relacionada a níveis mais intemperizados do maciço, onde o topo da rocha sã pode estar mais profundo (em torno de 20 metros de profundidade). Essa variação pode ocorrer em níveis onde o fraturamento é mais denso e profundo, gerando maior intemperismo nestas localidades.
- 2- Na posição de 350 metros da linha ocorre um aumento da resistividade que está sendo atribuída a entrada do xisto no perfil, o contato verificado em campo e na secção de SEV coincide com a posição desta anomalia identificada através do caminhamento elétrico.

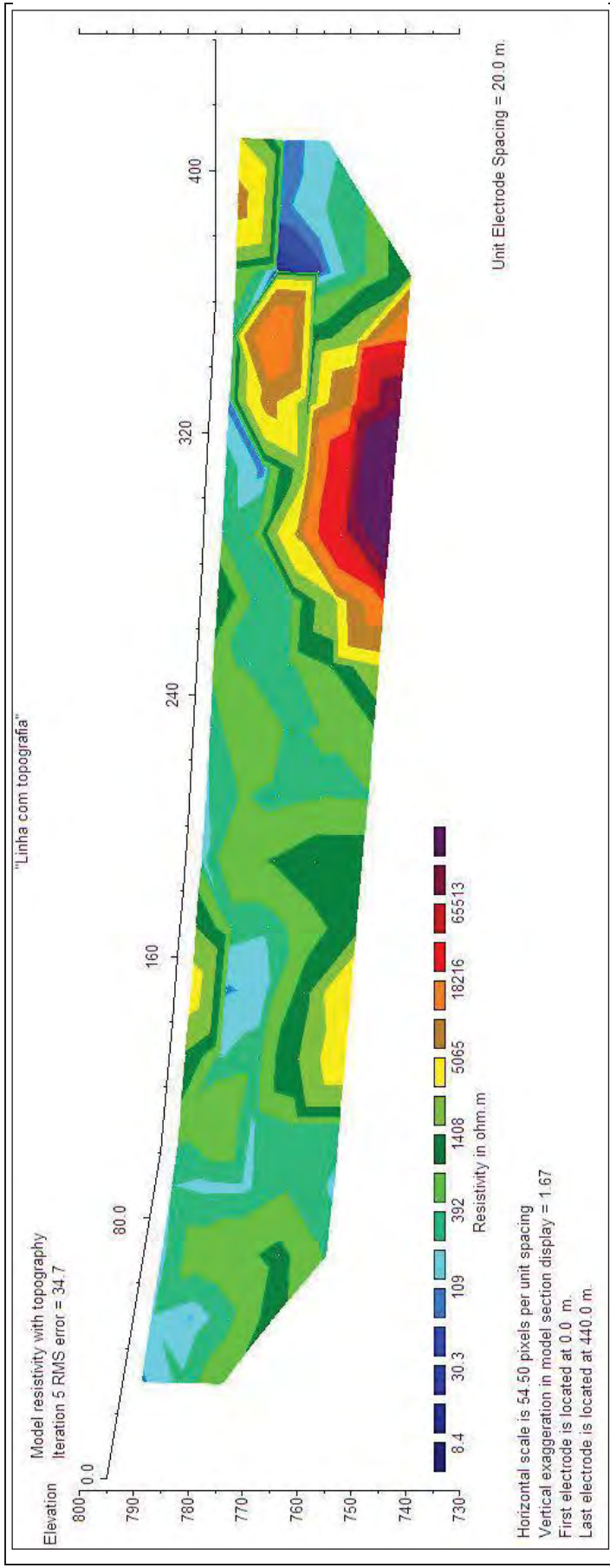


Figura 7\_17 – Secção de caminhamento elétrico (CE-01) modelada e com correção de topografia .

### 7.3.2 Caminhamento CE03 e CE04

Os caminhamentos elétricos CE03 e CE04 foram realizados dentro da área do condomínio, onde se encontrou dificuldades para a abertura do arranjo e locais adequados para se cravar os eletrodos. Os resultados das pseudosecções e da inversão não mostraram um padrão correspondente com a geologia local, sendo que as anomalias marcadas possuem geometria circular, estão horizontalizadas e isoladas (Figuras 7\_18 e 7\_19).

A alta resistividade medida no início da secção CE04 pode ser atribuída a uma grande caixa de captação de águas pluviais existente no local com aproximadamente 5 metros de profundidade. As outras anomalias de resistividade medida nestas secções podem ser atribuídas a interferências no meio ou a imprecisão nas leituras devido a falta de locais adequados para o cravamento dos eletrodos e disposição do arranjo.

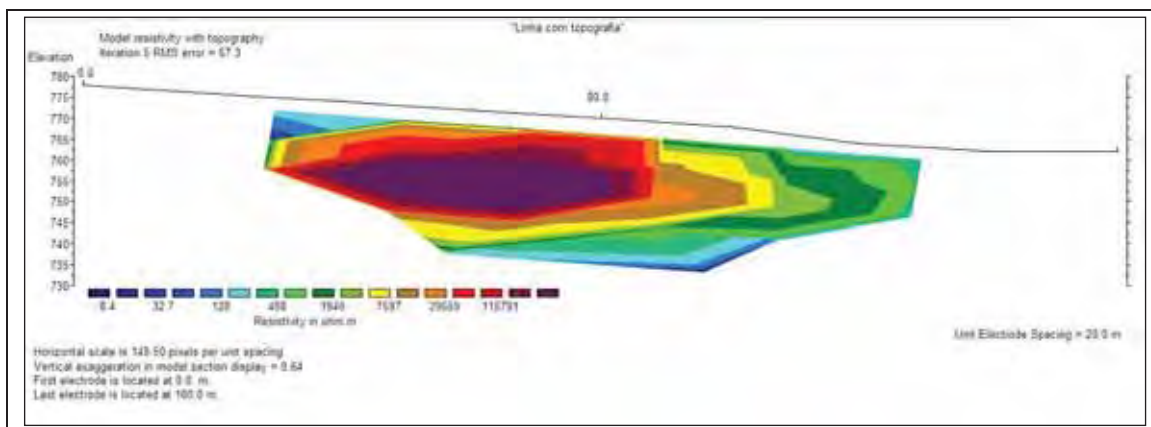


Figura 7\_18 - Secção de caminhamento elétrico (CE-03) invertida e com correção de topografia. .

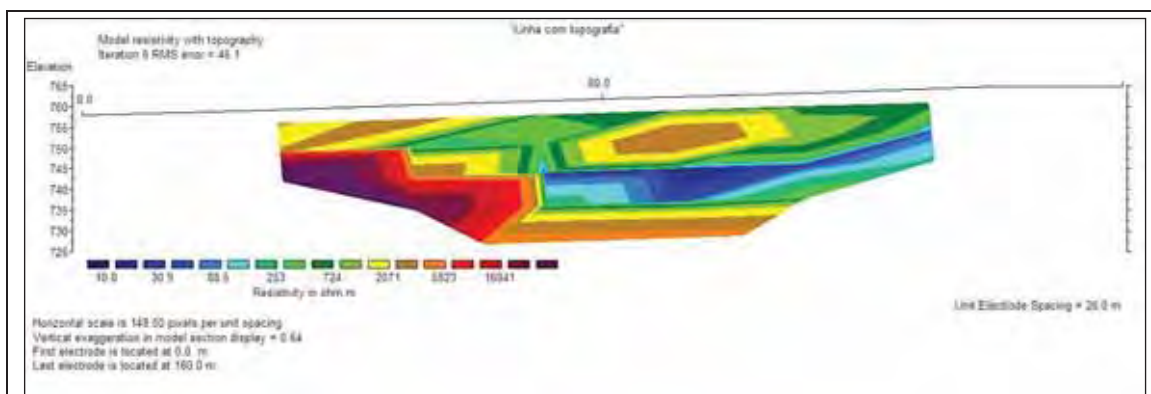


Figura 7\_19 - Secção de caminhamento elétrico (CE-04) invertida e com correção de topografia. .

### 7.3.3 Caminhamento CE02

O caminhamento elétrico CE02 (figura 7\_20), foi realizado na porção norte do condomínio, em uma rua que possui um corte onde é possível observar o contato entre o granito e o xisto em afloramento.

É possível observar na metragem de 50 metros do perfil uma mudança da resistividade aparente que cai consideravelmente conforme se avança no perfil, essa mudança possui caráter verticalizado e coincide com a posição do contato visto em campo. Desta forma a zona de maior resistividade corresponde com a área de ocorrência do xisto e a queda ocorre quando se cruza o contato, passando para a área de ocorrência do granito.

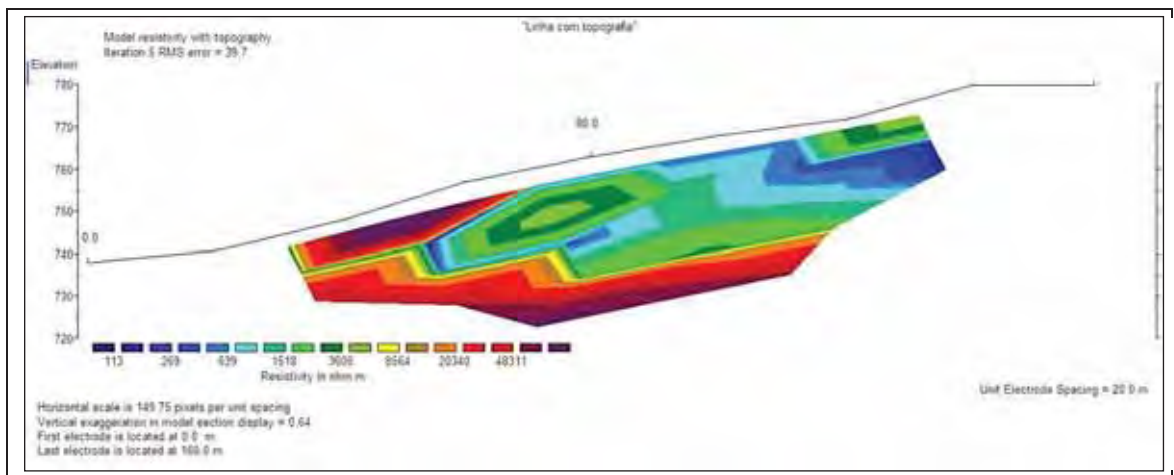


Figura 7\_20 - Seção de caminhamento elétrico (CE-02) invertida e com correção de topografia. .

## **8 Considerações Finais**

A atual situação política e econômica do Brasil transmite perspectivas de crescimento e desenvolvimento das grandes cidades nos próximos anos, ainda mais com a necessidade de investimentos em infra-estrutura devido à Copa do Mundo e os jogos Olímpicos que se aproximam. Desta maneira, o consumo e a busca por novas fontes de água potável tendem a se ampliar nos grandes e médios centros urbanos, bem como a busca por fontes de água de maior risco, como os aquíferos fraturados.

O aumento desta demanda vai exigir investimentos em pesquisa e em novos métodos e técnicas de investigação deste tipo de aquífero (fraturado), que pode ser classificado como de alta complexidade e de difícil entendimento. Diante desta situação, o presente trabalho realizou uma proposta prática de estudo e integração de dados geológicos, estruturais e de poços existentes, com o objetivo de dar suporte aos estudos geofísicos para a determinação da viabilidade de exploração de um aquífero fraturado em uma localidade definida, que neste caso foi o condomínio Villa Verde, localizado no município de Araçariguama – SP.

### **8.1 Aspectos Geológicos**

A área de estudo está localizada geologicamente na região de ocorrência do Grupo São Roque e Serra do Itaberaba que são cortados na porção central da área de estudo pelo Granitóide São Roque, sendo que os principais litotipos ocorrentes e mais abrangentes são rochas de composição granítica e xistos. Com a realização dos trabalhos de mapeamento foram reconhecidas e medidas as principais famílias de fraturas e juntas ocorrentes nos granitos e xistos, sendo verificado em campo que o solo, a quantidade de fraturas e o nível saprolítico do Granitóide São Roque são muito maiores que os ocorrentes nos xistos, podendo atingir espessuras de até 15 metros.

O solo mais a zona saprolítica constituem o manto de alteração, que constitui uma importante zona de recarga para os aquíferos do tipo fraturado. Desta maneira, o Granitóide São Roque foi definido como litologia foco deste estudo, por possuir, teoricamente, um maior potencial para abrigar um aquífero do tipo fraturado.

### **8.2 Aspectos Estruturais**

Primeiramente foi realizada a interpretação dos lineamentos em imagem de satélite para se determinar as direções preferenciais ocorrentes regionalmente na área de estudo, a análise



dos dados mostrou que os lineamentos mais freqüentes são os de direção NW-SE seguidos pelos lineamentos de direção NE-SW.

Posteriormente foi realizado o mapeamento geológico e estrutural, tendo como objetivo principal a coleta de dados estruturais no granitóide São Roque, os dados coletados em campo foram analisados e as fraturas medidas apresentaram duas direções preferenciais, sendo as fraturas de direção NE-SW mais freqüentes que as de direção NW-SE em escala de afloramento. Após os trabalhos de campo optou-se por utilizar os elipsóides de tensão/deformação elaborados por Neves (2005), porque estavam condizentes com os dados coletados em campo.

Desta maneira, as estruturas vistas em afloramento estariam relacionadas a um primeiro evento deformacional da região, que faz parte de um regime distensivo, que formou juntas abertas de direção NE-SW. Já as estruturas regionais estariam associadas ao segundo evento de deformação da área, que está relacionado à rotação da placa Sul-Americana que gerou transcorrências dextrais, que tendem a formar descontinuidades abertas de direção NW-SE e falhas transcorrentes dextrais de direção E-W.

### **8.3 Integração dos Dados**

Nesta fase do trabalho foram cruzados os dados de vazão dos poços existentes na região segundo cadastro disponibilizado no site do DAAE, com os dados geológicos e estruturais com o objetivo de gerar zonas de potencial de exploração de aquífero fraturado na área de estudo.

O produto desta fase do trabalho foi um mapa de potencial (Figura 6\_6) para a área de estudo. Pode-se verificar neste mapa que a área classificada como de maior potencial está localizada nos arredores da zona urbana do Município de Araçariguama, onde se tem um rio que atravessa a cidade no sentido E-W, associado a estruturas de direção NW-SE e tendo a presença de poços com produtividade superior a 4 m<sup>3</sup>/h.

A região com os poços de maior potencial possui características estruturais mais favoráveis e estão associados aos granitóides que foram definidos como o litotipo de maior potencialidade para abrigar um aquífero fraturado, na área de estudo. Podendo-se dizer que a metodologia utilizada para a geração dos alvos foi validada.



#### 8.4 Geofísica

A área do condomínio Villa Verde está localizada em uma área do mapa classificada com um potencial de exploração moderado (aproximadamente 2), com presença nas proximidades de lineamentos de direção NE-SW e NW-SE associados a rochas graníticas. Desta maneira, os trabalhos de geofísica foram programados visando cruzar essas estruturas de direção NE-SW e NW-SE, através de perfis de direção leste oeste, quando o espaço físico dentro da área do condomínio permitia.

O caminhamento elétrico obteve um resultado positivo na identificação da falha que marca o contato entre o granito e o xisto, sendo que foi possível interpretar esta estrutura nas linhas de caminhamento elétrico CE-02 e CE-01 e na linha de GPR 02 foi identificada, uma diferença na qualidade do sinal, no “*background*” do radargrama. Essa estrutura também pode ser interpretada na análise da pseudo seção realizada com as SEV 01 e 04 que mostraram uma mudança lateral e verticalizada nos níveis de resistividade aparente.

O perfil de GPR 02 identificou também estruturas verticalizadas em torno de 3 metros abaixo da superfície, interpretadas como as fraturas presentes na zona saprolítica do granito, que normalmente são preenchidas por solo arenoso, que é produto do intemperismo do próprio granito. Estruturas semelhantes foram interpretadas no perfil de caminhamento elétrico CE-01.

A inversão das sondagens elétricas verticais definiu basicamente para a área do condomínio duas interfaces de resistividade distintas, a primeira interface foi interpretada como sendo o contato solo/saprolito, com profundidade variando de 1 a 3 metros. A segunda interface identificada foi interpretada como sendo o contato saprolito/granito, com profundidade variando de 8 a 15 metros. Tais profundidades são condizentes com os afloramentos observados em campo.

Durante a execução dos ensaios foram enfrentadas dificuldades para a disposição dos arranjos de resistividade dentro do condomínio e locais adequados para cravar os eletrodos, principalmente o de caminhamento elétrico, que se restringiu a leitura de 4 níveis devido a falta de espaço físico para se esticar os cabos. Outro fator que dificultou a locação das linhas e interferiu na qualidade dos dados foi a topografia íngreme, sendo que na linha de caminhamento elétrico CE-02, por exemplo, o desnível é de aproximadamente 40 metros.

Estas dificuldades encontradas interferiram na qualidade dos dados e resultaram na baixa qualidade das seções de caminhamento elétrico CE-03 e CE-04. Outro fato que ficou evidente neste trabalho é a necessidade do intérprete possuir um bom conhecimento da geologia local para se obter uma interpretação adequada dos resultados de geofísica.

Desta maneira, é possível dizer que a região mais viável para a realização de um poço artesiano dentro da área do condomínio Villa Verde seria a posição da SEV de número 2. Nesta região foi interpretada uma zona saprolítica de aproximadamente 10 metros de profundidade com presença de fraturas verticais próximas ao contato de uma grande estrutura de direção NE-SW (falha), que apresenta continuidade em subsuperfície. A topografia nesta região é mais plana e propicia maiores possibilidades para o acúmulo de água.

Outro ponto com potencial para locação de um poço dentro da área do condomínio seria o da região da caixa d'água, localizada entre as linhas de caminhamento elétrico CE-01 e CE-04. Entretanto se faz necessário um refinamento de campo nessa localidade, para a locação do mesmo.

## 9 Referências Bibliográficas

ALMEIDA FFM. O Cráton do São Francisco. 1977. Rev. Brasileira de Geociências 7:349-364.

ANNAN, A. P. Practical Processing of GPR data. 1992. PROCEEDINGS OF THE SECOND GOVERNMENT WORKSHOP ON GROUND PENETRATING RADAR: SENSOR & SOFTWARE INC. Columbus, 1992. 22p.

ANNAN, A. P.; DAVIS, J. L. Ground penetrating radar – Coming of age at last. 1997. Mississauga: Sensors & Softwares, Inc. 1997. 13p. <http://www.sensoft.ca/>.

BANKS, D; ROHR-TORP, E; SKARPHAGEN, H. Groundwater resources in hard rock: experiences from the Hvaler study, southeastern Norway.1994. Applied Hydrogeology, Hannover, v. 2, n. 2, p.33-42, 1994.

BARTORELLI A., et al. Geologia do Continente Sul-Americano, Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. 2004. 1º edição. Oficina de Textos – São Paulo, 2004. 674p.

BERGMANN, M. Caracterização Estratigráfica e Estrutural da Sequência Vulcano-Sedimentar do Grupo São Roque na Região de Pirapora do Bom Jesus, Estado de São Paulo. 1988. 155 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro-SP, 1988.

BERTACHINI, A. C. Estudo das Características Hidrogeológicas dos Terrenos Cristalinos sob Clima Úmido, na região de Jundiaí, em São Paulo. 1987. 104 f. Dissertação de Mestrado. São Paulo-SP, 1987.

BJOMBERG, A.J.S. & KUTNER, A.S. Resumo das feições geológicas de interesse às fundações em rocha, em barragens da Bacia do Alto Paraná. 1983. In: ABMS/ABGE/CBMR, SIMPÓSIO SOBRE A GEOTECNIA DA BACIA DO ALTO PARANÁ, 1, São Paulo, 1983. Vol. 1A: 263-297.

BOTELHO, B. M. Avaliação Geotécnica – Geofísica das Subestruturas da Ferrovia Vitória – Minas (EFVM) Usando o Radar de Penetração no Solo (GPR). 2005. NINTH

INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY. Salvador-Ba, 2005. 4p.

BRAGA, A. C. O. Métodos Elétricos Aplicados. Apostila. 91 p. ([www.rc.unesp.br](http://www.rc.unesp.br)).

BRIZ-KISHORE, BH. Assessment of yield characteristics of granitic aquifers in South India. 1993. Ground Water, 31(6):921-928.

CARNEIRO, C.D.R. Análise Estrutural do Grupo São Roque na Faixa entre o Pico do Jaraguá e a Serra dos Cristais. 1983. 155 f. Tese de Doutorado. São Paulo-SP, 1983.

CHILTON, P.J. & FOSTER, S.S.D. Hydrogeological characterisation and water-supply potential of basement aquifers in tropical Africa. 1995. Hydrogeology Journal, 3(1):36-49.

DAVIS, J.L., ANNAN, A.P. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy: Geophysical Prospecting. 1989. 37: 531-551.

DOMENICO, P. & SCHWARTZ, F. Physical and chemical hydrogeology. 1990. John Wiley & Sons, Nova York, 1990. 824 p.

DUKE, S. Calibration of Ground Penetrating Radar and Calculation of Attenuation and Dielectric Permittivity Versus Depth. 1990. M.Sc. Thesis – Colorado School of Mines, 236p.

DUNNE, W.M. & HANCOCK, P.L. Palaeostress analysis of small-scale brittle structures. 1994. In: P. L. Hancock (ed.), Continental Deformation, Pergamon Press, U.K., p. 101-120.

FERNANDES, A. J. Aquíferos Fraturados: Uma Revisão dos Condicionantes Geológicos e dos Métodos de Investigação. 2008. Revista do Instituto Geológico. 49-72p.

FERNANDES, C. E. de M. Fundamentos de prospecção geofísica. 1984. Rio de Janeiro, 1984. Interciência.

FERNANDES, T. N. O Metamorfismo dos Grupos Serra do Itaberaba e São Roque na Região entre Mairinque e Pirapora do Bom Jesus. 2000. 156 f. Trabalho de Formatura. Rio Claro – SP, 2000.

FIGUEROLA, J. C. Tratado de Geofísica Aplicada. 1974. 2º edição. Libreria Ciencia – Industria S. L., Madrid – Espanha, 1974. 520p.

FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A. Groundwater. 1979. Prentice Hall, New Jersey, 1979. 604 pp.

GALE, J. & ROULEAU, A. Characterizing and interpreting the geometry, permeability and porosity of fractures for repository evaluation. 1983. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIELD MEASUREMENTS IN GEOMECHANICS, Zurich, 1983. Proceedings, p. 1343-1369.

GANDOLFO, O. C. B. Aplicação da sísmica de reflexão de alta resolução e do radar de penetração no solo (GPR): um estudo comparativo. 1999. 140 f. Dissertação de Mestrado, IGCE/ UNESP. Rio Claro-SP, 1999.

GANDOLFO, C. B. O. Aplicações de GPR no Brasil: Potencialidade e Limitações a Partir de Casos Estudados. 2003. III WORKSHOP DE GEOFÍSICA APLICADA À ENGENHARIA E MEIO AMBIENTE. Rio de Janeiro, 2003.

GARY, R. O. Applications And Frustrations In Using Ground Penetrating Radar. 2003. III WORKSHOP DE GEOFÍSICA APLICADA À ENGENHARIA E MEIO AMBIENTE. Rio de Janeiro, 2003.

GODOY, A.M.; et al. Geologia da Região de Sorocaba- SP. 1996. Geociências, 15, (n. especial), 89-110.

GUDMUNDSSON, A., et al. Effects of linking up of discontinuities on fracture growth. 2003. Hydrogeology Journal, 11(1):84-99.

HACKSPACHER, P.C.; OLIVEIRA, M.A.F; GODOY, A.M. Geologia dos Grupos Serra do Itaberaba/São Roque na Folha Cabreúva – SP, em 1:50.000, In: CONGR. BRAS. GEOL., 37. São Paulo. 1992b. *Anais...* São Paulo, SBG-NSP. v. 2, p. 124-125, 1992b.

HASUI, Y.; PENALVA, F; HENNIES, W.T. Geologia do Grupo São Roque. 1969. In: CONGR. BRÁS. GEOL., 23. Salvador. *Anais...* Salvador, 1969. SBG. v. 1. p. 101-134.

HASUI, Y., et al. Condicionamento Tectônico da Bacia Sedimentar de São Paulo. 1976. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 29, *Anais*, 257-268.

HASUI Y., et al. As grandes falhas do Leste Paulista. 1977. In: SBG, Simp. Geol. Reg., 1, *Atas*, 369-380.

- HASUI, Y. & OLIVEIRA, M.A.F. Província Mantiqueira. 1984. In: ALMEIDA, F.F.M. DE & HASUI, Y. (Coords.), O pré-cambriano do Brasil. São Paulo: Editora Edgard Blucher, p. 308-344, 1984.
- HANCOCK, P.L. Brittle microtectonics: principles and practice. *Journal of Structural Geology*. 1985. p 437-457.
- JULIANI, C.; BELJAVSKIS, P.; SCHORSCHER, H.D. Petrogênese do vulcanismo e aspectos metalogenéticos associados: Grupo Serra do Itaberaba na região do São Roque - SP. 1986. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34, Goiânia, 1986. Anais..., Goiânia, SBG, v.2, p. 730-743.
- JULIANI, C. & BELJAVSKIS, P. Revisão da litoestratigrafia da faixa São Roque/Serra do Itaberaba (SP). 1995. *Revista do Instituto Geológico*. 16(1/2):33-58.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; Hill, I. *An Introduction to Geophysical Exploration*. 2002. 3<sup>o</sup> edition. Blackweel Science Ltda – Iowa, 2002. 257p.
- KELLER, G. H. *Electromagnetic Theory for Geophysical Applications: Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. 1987. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, ed. Misac N. Nabighian, v. 1.
- LAMONTAGNE, E. Étude Hydromécanique d'une fracture en cisaillement sous contrainte normale constante. 2001. Department du Ressources Minérales, Université du Quebec à Chicoutimi, Thèse Doctorat, 2001. 530 p.
- LAWN, B.R. & WILSHAW, T.R. *Fracture of brittle solids*. 1975. Cambridge Press University, 204p.
- LACHASSAGNE, P., et al. Exploitation of high-yield in hard-rock aquifers: Downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones. 2001. *Ground Water*, 39, 568–581.
- LACHASSAGNE, P. et al. Recent improvements in the conceptual model of hard rock aquifers and its application to the survey, management, modelling and protection of groundwater. 2008. *GROUNDWATER AND CLIMATE IN AFRICA (PROCEEDINGS OF THE KAMPALA CONFERENCE, JUNE 2008)*. IAHS Publ. 334, 2009.



MAPA DE ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA NA BACIA DOS RIOS SOROCABA E MÉDIO TIETÊ. Disponível em: [http://www.rededasaguas.org.br/comite/comite\\_05.asp](http://www.rededasaguas.org.br/comite/comite_05.asp). Acessado em: 02 ago2010.

NEVES, M. A. Análise Integrada Aplicada à Exploração de Água Subterrânea na Bacia do Rio Jundiáí (SP). 2005. 187 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro – SP, 2005.

PORSANI, J. L. Ground penetrating radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP. 1999. 145 f. Tese de Doutorado. Rio Claro – SP, 1999.

PORSANI, J. L., et al. O Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP: Instalação e Resultados Preliminares. 2004. I SIMPÓSIO REGIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA. São Paulo, 2004. 4p.

RAMSAY, J. G. & HUBER, M.I. The techniques of modern structural geology. Volume 2: Folds and Fractures. 1987. Academic Press, London, 700 pp.

RODRIGUES, I. S., et al. Emprego do GPR no Mapeamento de Tambores Plásticos Enterrados no SCGR do IAG. 2004. I SIMPÓSIO REGIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA. São Paulo, 2004. 4p.

SINGHAL, B.B.S and GUPTA, R.P. Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. 1999. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 400 pp.

TEIXEIRA, W. et al. 2000. Decifrando a Terra. 1º Edição. Oficina de Textos – São Paulo. 566p.

UNESCO. Ground water in hard rocks: Studies and reports in hydrogeology. 1984. UNESCO, Paris.

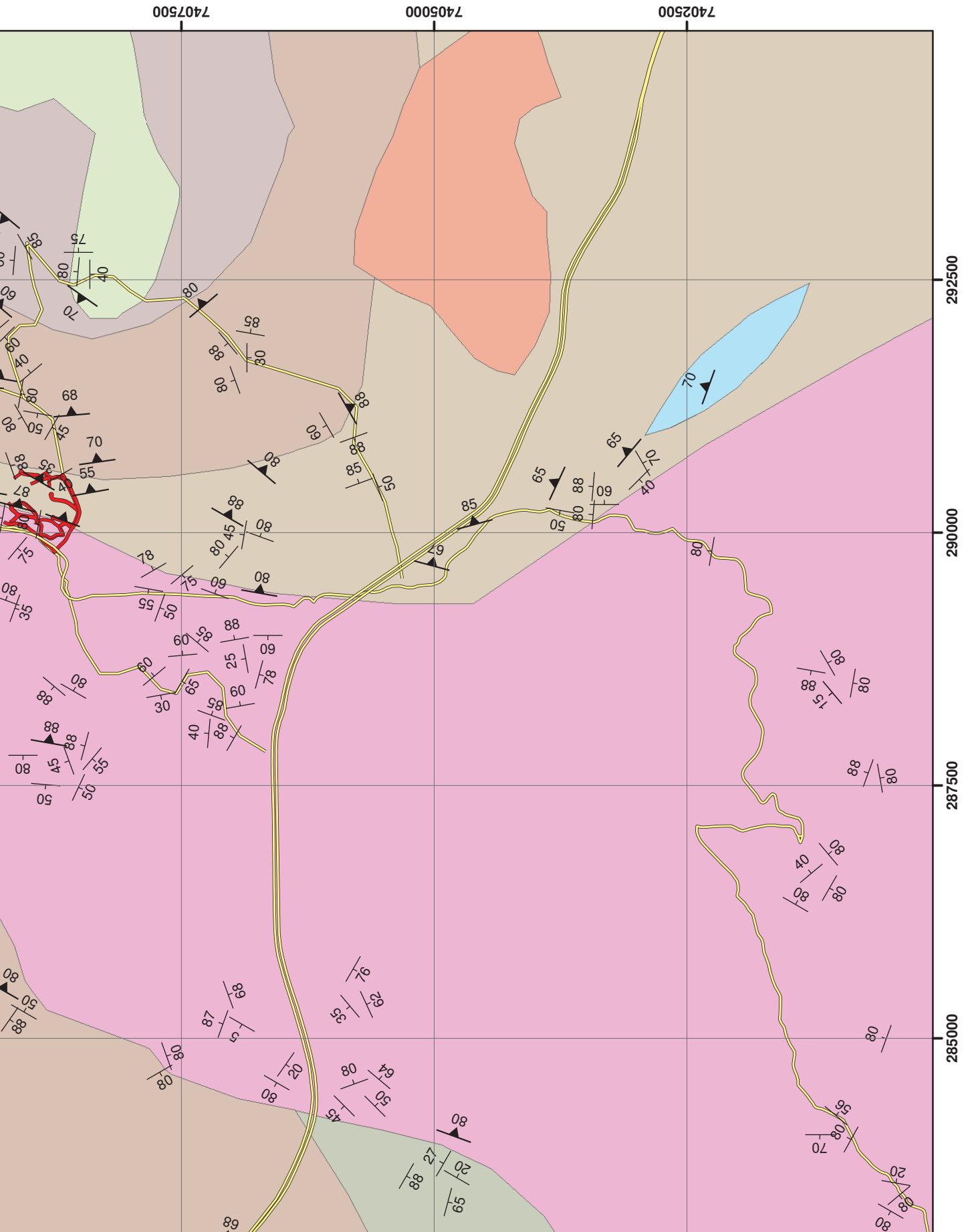
YOUNG, H. H.; FREEDMAN A. R.; colaboradores SANDIN, T. R; FORD, L. University Physics with Modern Physics. 2000. 10 º edição. Person Education do Brasil - São Paulo, 2000. 402 p.

— Fratura

### Lito

### Litologia

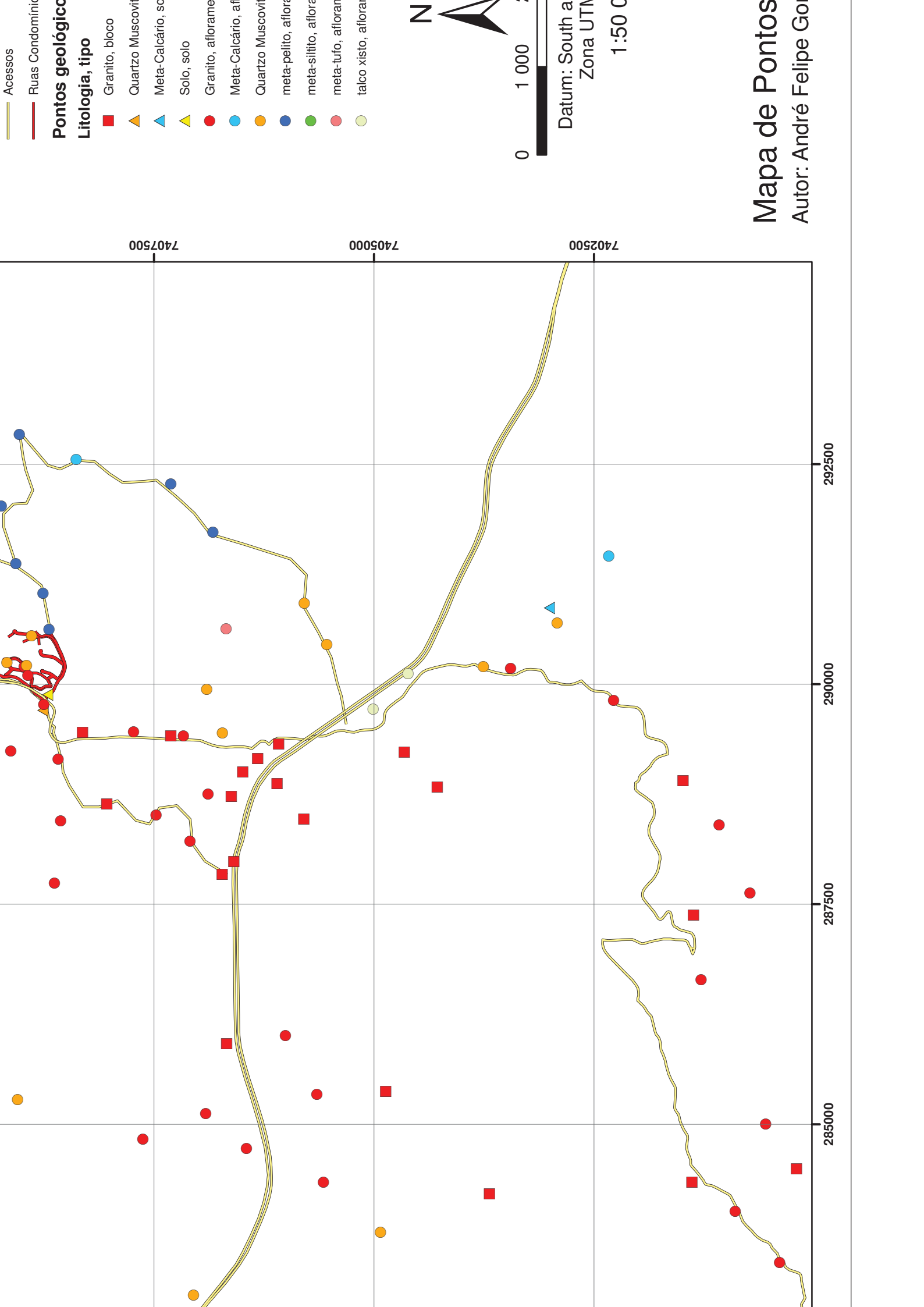
- Granitóide São Roque
- Granito Sorocaba
- Granitóide Itaqui
- Granito Tevere
- Granito Pica-Pau
- Granito Ponanduva
- São Roque, Formação Piragibú
- São Roque, Unidade Boturuna
- São Roque, Formação Estrada c
- São Roque, Formação Pirapora
- Serra do Itaberaba
- Serra do Itaberaba, Unidade Ca
- Varginha-Guaxupé, Unidade Pa
- Varginha-Guaxupé, Unidade Ort



Datum: South  
Zona UT  
1:50

# Mapa Geológico

Autor: André Felipe Go



## ANEXO 3

Planilha de pontos Geológicos							
Ponto	Descritor	Data	X	Y	Z	Litologia	tipo
1	André De Mario	04/06/2009	289885	7408707		Solo	solo
2	André De Mario	04/06/2009	290205	7408964		Quartzo Muscovita Xisto	afioramento
3	André De Mario	04/06/2009	290205	7408975		Granito	afioramento
4	André De Mario	04/06/2009	290551	7408889		Quartzo Muscovita Xisto	afioramento
5	André De Mario	04/06/2009	290251	7409172		Quartzo Muscovita Xisto	afioramento
6	André De Mario	04/06/2009	290216	7408948		Quartzo Muscovita Xisto	afioramento
7	André De Mario	04/06/2009	290104	7408932		Granito	afioramento
8	André De Mario	18/05/2010	289007	7406489		Granito	bloco
9	André De Mario	18/05/2010	288728	7406620	705	Granito	bloco
10	André De Mario	18/05/2010	289321	7406084	737	Granito	bloco
11	André De Mario	18/05/2010	289154	7406321	739	Granito	bloco
12	André De Mario	18/05/2010	287841	7406724	706	Granito	bloco
13	André De Mario	18/05/2010	285914	7406674	669	Granito	bloco
14	André De Mario	18/05/2010	285121	7406911	674	Granito	afioramento
15	André De Mario	18/05/2010	284729	7406449	690	Granito	afioramento
16	André De Mario	18/05/2010	283059	7407051	680	Quartzo Muscovita Xisto	afioramento
17	André De Mario	19/05/2010	288870	7406099	713	Granito	bloco
18	André De Mario	19/05/2010	288467	7405797	737	Granito	bloco
19	André De Mario	19/05/2010	289719	7405010	764	talco xisto	afioramento
20	André De Mario	19/05/2010	290125	7404611	796	talco xisto	afioramento
21	André De Mario	19/05/2010	290200	7403756	793	Quartzo Muscovita Xisto	afioramento
22	André De Mario	19/05/2010	290180	7403448	777	Granito	afioramento
23	André De Mario	19/05/2010	290697	7402918	763	Quartzo Muscovita Xisto	afioramento
24	André De Mario	19/05/2010	291455	7402331	782	Meta-Calcário	afioramento
25	André De Mario	19/05/2010	290867	7403006	765	Meta-Calcário	solo
26	André De Mario	19/05/2010	289817	7402276	788	Granito	afioramento
27	André De Mario	19/05/2010	285279	7409048	679	Quartzo Muscovita Xisto	afioramento
28	André De Mario	19/05/2010	284998	7410212	639	meta-siltito	afioramento
29	André De Mario	19/05/2010	284831	7407626	658	Granito	afioramento
30	André De Mario	19/05/2010	286008	7406005	673	Granito	afioramento
31	André De Mario	19/05/2010	285344	7405650	737	Granito	afioramento
32	André De Mario	19/05/2010	285376	7404866	786	Granito	bloco
33	André De Mario	19/05/2010	284211	7403687	917	Granito	bloco
34	André De Mario	19/05/2010	284344	7401385	937	Granito	bloco
35	André De Mario	19/05/2010	284012	7400895	936	Granito	afioramento
36	André De Mario	19/05/2010	283431	7400390	865	Granito	afioramento
37	André De Mario	20/05/2010	289445	7406723	704	Quartzo Muscovita Xisto	afioramento
38	André De Mario	20/05/2010	289942	7406901	774	Quartzo Muscovita Xisto	afioramento
39	André De Mario	20/05/2010	290632	7406680	804	meta-tufo	afioramento
40	André De Mario	20/05/2010	290920	7405790		Quartzo Muscovita Xisto	afioramento
41	André De Mario	20/05/2010	290455	7405537	734	Quartzo Muscovita Xisto	afioramento
42	André De Mario	20/05/2010	288216	7407091	693	Granito	afioramento
43	André De Mario	20/05/2010	288751	7406885	695	Granito	afioramento
44	André De Mario	20/05/2010	288518	7407476	717	Granito	afioramento
45	André De Mario	20/05/2010	288637	7408034	749	Granito	bloco
46	André De Mario	20/05/2010	288460	740902	751	Granito	bloco
47	André De Mario	20/05/2010	287387	7409514	690	Granito	afioramento
48	André De Mario	20/05/2010	287738	7408632	683	Granito	afioramento
49	André De Mario	20/05/2010	288452	7408559	721	Granito	afioramento
50	André De Mario	20/05/2010	289151	7408589	772	Granito	afioramento
51	André De Mario	20/05/2010	290038	740038	789	Granito	bloco
52	André De Mario	20/05/2010	290516	7410598	795	Granito	bloco
53	André De Mario	20/05/2010	290153	7409590	800	Granito	bloco
54	André De Mario	20/05/2010	289246	7409126	728	Granito	afioramento
55	André De Mario	21/05/2010	289417	7407164	730	Granito	afioramento
56	André De Mario	21/05/2010	289418	7407309	717	Granito	bloco
57	André De Mario	21/05/2010	289462	7407732	713	Granito	afioramento
58	André De Mario	21/05/2010	289457	7408311	747	Granito	bloco
59	André De Mario	21/05/2010	289702	7408763	778	Quartzo Muscovita Xisto	solo
60	André De Mario	21/05/2010	289772	7408753	791	Granito	afioramento

## Planilha de pontos Geológicos

Ponto	Descritor	Data	X	Y	Z	Litologia	tipo
61	André De Mario	21/05/2010	290625	7408694	782	meta-pelito	afloramento
62	André De Mario	21/05/2010	291032	7408761	788	meta-pelito	afloramento
63	André De Mario	21/05/2010	291370	7409069	737	meta-pelito	afloramento
64	André De Mario	21/05/2010	292026	7409236	685	meta-pelito	afloramento
65	André De Mario	21/05/2010	292839	7409029	769	meta-pelito	afloramento
66	André De Mario	21/05/2010	292554	7408385	720	Meta-Calcário	afloramento
67	André De Mario	21/05/2010	292277	7407309	706	meta-pelito	afloramento
68	André De Mario	21/05/2010	291728	7406830	745	meta-pelito	afloramento
69	André De Mario	21/05/2010	288903	7401488	744	Granito	bloco
70	André De Mario	21/05/2010	288405	7401076	771	Granito	afloramento
71	André De Mario	21/05/2010	287630	7400728	779	Granito	afloramento
72	André De Mario	21/05/2010	287376	7401369	748	Granito	bloco
73	André De Mario	21/05/2010	286647	7401283	715	Granito	afloramento
74	André De Mario	21/05/2010	285002	7400549	779	Granito	afloramento
75	André De Mario	21/05/2010	284495	7400198	882	Granito	bloco
76	André De Mario	22/05/2010	281275	7398872	768	Granito	afloramento
77	André De Mario	22/05/2010	281757	7401036	799	Granito	afloramento
78	André De Mario	22/05/2010	282430	7403207	741	Granito	afloramento
79	André De Mario	22/05/2010	283773	7404925	769	Quartzo Muscovita Xisto	afloramento
80	André De Mario	22/05/2010	284343	7405572	723	Granito	afloramento
81	André De Mario	22/05/2010	287988	7406591	724	Granito	bloco
82	André De Mario	22/05/2010	289230	7404655	744	Granito	bloco
83	André De Mario	22/05/2010	288832	7404279	738	Granito	bloco

## ANEXO 4

Estruturas Extraídas de Imagem de Satélite em Ambiente GIS								
Lineamento	Direção	Distância (m)	Lineamento	Direção	Distância (m)	Lineamento	Direção	Distância (m)
1	16	1764,884	64	342	689,684	127	320	895,709
2	22	512,36	65	346	783,855	128	23	194,083
3	29	564,642	66	349	989,416	129	97	298,208
4	91	650,602	67	346	1108,85	130	329	1209,965
5	333	616,9	68	19	307,54	131	14	325,002
6	8	1295,97	69	352	635,504	132	351	1114,749
7	140	951,218	70	348	644,137	133	315	696,718
8	267	887,653	71	354	766,038	134	9	819,644
9	352	1549,661	72	7	661,585	135	337	680,647
10	357	907,34	73	9	665,227	136	72	330,335
11	46	2188,803	74	338	648,942	137	58	1247,106
12	26	352,514	75	50	410,427	138	1	1655,435
13	86	315,914	76	323	620,109	139	325	524,717
14	28	696,718	77	316	687,679	140	357	433,983
15	296	396,579	78	33	378,942	141	145	552,124
16	300	706,405	79	26	293,762	142	139	517,263
17	346	1032,46	80	305	1035,444	143	322	421,73
18	74	592,825	81	306	357,377	144	14	406,253
19	29	749,346	82	306	394,123	145	322	618,786
20	117	401,658	83	348	535,904	146	320	433,983
21	66	566,189	84	37	252,77	147	340	627,056
22	148	273,772	85	35	286,063	148	34	1001,35
23	209	1156,132	86	45	250,818	149	322	674,815
24	86	315,914	87	313	729,32	150	323	402,503
25	328	973,412	88	335	352,278	151	320	693,377
26	322	646,41	89	2	332,726	152	344	552,836
27	55	792,668	90	355	923,297	153	353	535,945
28	63	705,029	91	275	500,779	154	327	492,519
29	301	860,678	92	288	361,062	155	328	451,712
30	333	528,772	93	307	166,271	156	131	712,685
31	356	671,168	94	344	322,792	157	187	657,063
32	167	908,409	95	340	565,695	158	356	978,348
33	13	1175,782	96	15	383,701	159	301	624,257
34	9	1039,955	97	357	330,698	160	3	948,811
35	300	865,278	98	320	274,63	161	325	574,585
36	354	613,745	99	292	195,688	162	333	794,053
37	357	433,983	100	295	228,669	163	333	529,369
38	354	415,702	101	84	131,531	164	325	681,273
39	15	717,315	102	158	100,732	165	323	846,369
40	342	660,671	103	326	373,021	166	357	829,121
41	332	819,644	104	41	376,808	167	327	558,352
42	338	548,95	105	32	278,861	168	225	41,85
43	47	818,326	106	332	350,374	169	357	829,121
44	58	860,678	107	90	206,915	170	307	485,355
45	326	663,148	108	291	205,856	171	37	485,355
46	112	483,058	109	357	736,166	172	303	426,791
47	138	558,612	110	156	800,414	173	327	1050,85
48	330	635,504	111	350	799,119	174	6	745,123
49	136	1059,174	112	355	737,571	175	79	632,618
50	123	816,215	113	36	656,872	176	64	4010,318
51	35	583,397	114	353	501,981	177	46	649,017
52	67	683,147	115	53	277,118	178	355	415,352
53	306	656,872	116	351	557,374	179	340	814,2
54	28	834,615	117	41	628,438	180	171	389,23
55	306	394,123	118	35	508,556	181	60	477,167
56	319	242,242	119	21	486,706	182	347	545,661
57	159	590,454	120	312	558,071	183	40	2224,373
58	145	510,166	121	354	415,702	184	335	781,267
59	331	387,944	122	132	320,793	185	331	1046,257
60	279	639,295	123	144	339,038	186	350	1080,029
61	15	1115,368	124	150	361,757	187	199	627,056
62	339	590,454	125	340	604,501	188	18	561,48



## Estruturas Extraídas de Imagem de Satélite em Ambiente GIS

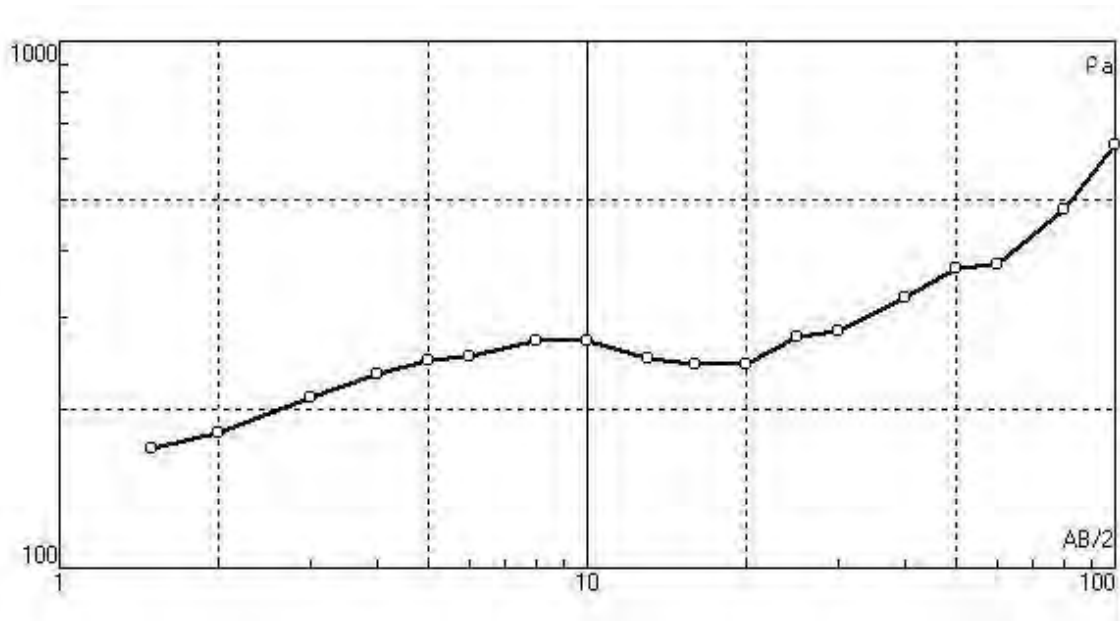
Lineamento	Direção	Distância (m)	Lineamento	Direção	Distância (m)	Lineamento	Direção	Distância (m)
63	345	732,876	126	277	298,208	189	212	492,519
190	353	565,366	253	163	1020,409	316	175	905,616
191	5	653,722	254	310	545,661	317	344	919,183
192	15	552,836	255	35	657,063	318	354	1102,702
193	29	781,828	256	81	627,754	319	150	753,15
194	15	674,815	257	19	786,295	320	163	756,264
195	347	667,64	258	34	1321,435	321	227	676,423
196	349	632,618	259	103	1277,633	322	192	652,847
197	311	398,128	260	303	320,093	323	172	768,595
198	32	665,011	261	351	418,503	324	206	950,032
199	4	415,352	262	90	503,074	325	48	952,668
200	325	467,9	263	149	822,227	326	230	854,516
201	26	330,855	264	104	2045,533	327	127	920,716
202	294	357,569	265	3	474,406	328	180	938,249
203	354	1336,918	266	333	4456,723	329	30	841,023
204	22	928,756	267	346	1302,684	330	19	1030,115
205	283	638,817	268	45	564,979	331	345	712,744
206	83	1787,6	269	349	474,463	332	217	920,716
207	323	739,815	270	26	545,912	333	131	940,917
208	354	1575,372	271	9	518,135	334	159	868,16
209	0	384,704	272	28	556,192	335	353	909,07
210	6	565,366	273	29	536,812	336	289	638,284
211	10	841,7	274	51	648,215	337	277	999,072
212	332	701,538	275	316	706,398	338	51	705,007
213	346	638,817	276	170	696,92	339	322	909,931
214	53	1183,705	277	25	665,094	340	315	763,687
215	347	789,629	278	311	801,77	341	54	874,633
216	355	742,179	279	143	665,834	342	116	1045,065
217	350	1080,029	280	345	640,571	343	172	856,347
218	3	1096,525	281	348	1201,374	344	295	767,984
219	9	360,01	282	82	2125,228	345	352	768,595
220	21	1648,71	283	15	414,627	346	96	1763,363
221	347	1967,631	284	127	617,07	347	339	1098,145
222	330	1842,601	285	348	876,361	348	60	1315,969
223	50	1155,629	286	25	555,995	349	325	769,668
224	358	858,696	287	326	705,894	350	135	512,969
225	313	607,19	288	97	715,75	351	12	910,792
226	74	215,437	289	17	1488,188	352	339	774,779
227	281	603,573	290	298	1589,484	353	341	785,74
228	43	774,513	291	53	739,815	354	24	1355,371
229	55	722,448	292	33	533,488	355	123	1494,01
230	347	789,629	293	11	1027,252	356	288	1508,361
231	354	1219,058	294	96	1934,642	357	290	619,823
232	352	686,396	295	77	2548,575	358	126	1309,454
233	352	686,396	296	65	2502,982	359	144	689,414
234	51	2167,545	297	73	2312,961	360	164	1056,269
235	23	2358,7	298	116	1215,874	361	148	1147,751
236	94	2344,549	299	202	650,924	362	38	1498,406
237	0	1657,186	300	217	467,367	363	279	1362,632
238	309	841,18	301	10	756,886	364	114	819,548
239	45	1590,31	302	195	734,4	365	294	1948,271
240	5	951,116	303	185	604,234	366	349	1365,886
241	325	467,9	304	220	741,196	367	310	1272,769
242	4	1039,539	305	284	1189,386	368	331	1136,23
243	345	459,401	306	148	913,883	369	189	918,344
244	284	459,401	307	158	588,469	370	305	624,054
245	351	418,503	308	189	1149,592	371	288	1743,53
246	119	1629,745	309	178	832,22	372	340	1152,898
247	20	1330,023	310	137	551,351	373	173	1588,239
248	284	1679,495	311	193	528,125	374	32	1589,895
249	27	1098,52	312	197	632,612	375	314	782,383
250	40	818,491	313	217	1136,57	376	122	2062,829

Estruturas Extraídas de Imagem de Satélite em Ambiente GIS

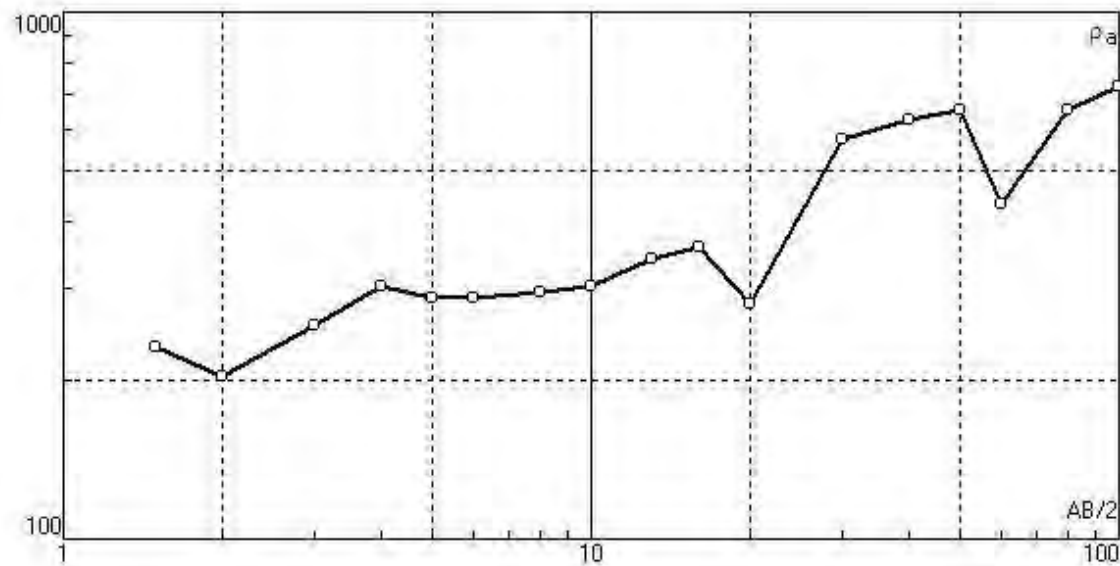
Lineamento	Direção	Distância (m)	Lineamento	Direção	Distância (m)	Lineamento	Direção	Distância (m)
251	325	1321,435	314	161	856,53	377	321	1291,624
252	47	1236,178	315	136	563,439	378	349	1252,318

# Anexo 5 – Gráficos do Tipo Log - SEV

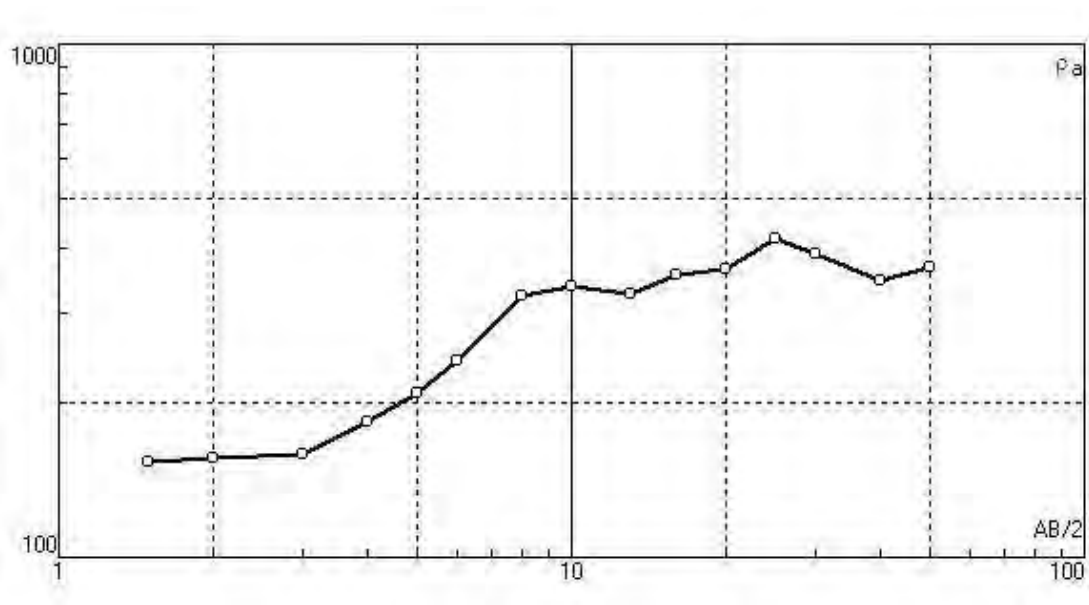
## SEV-01



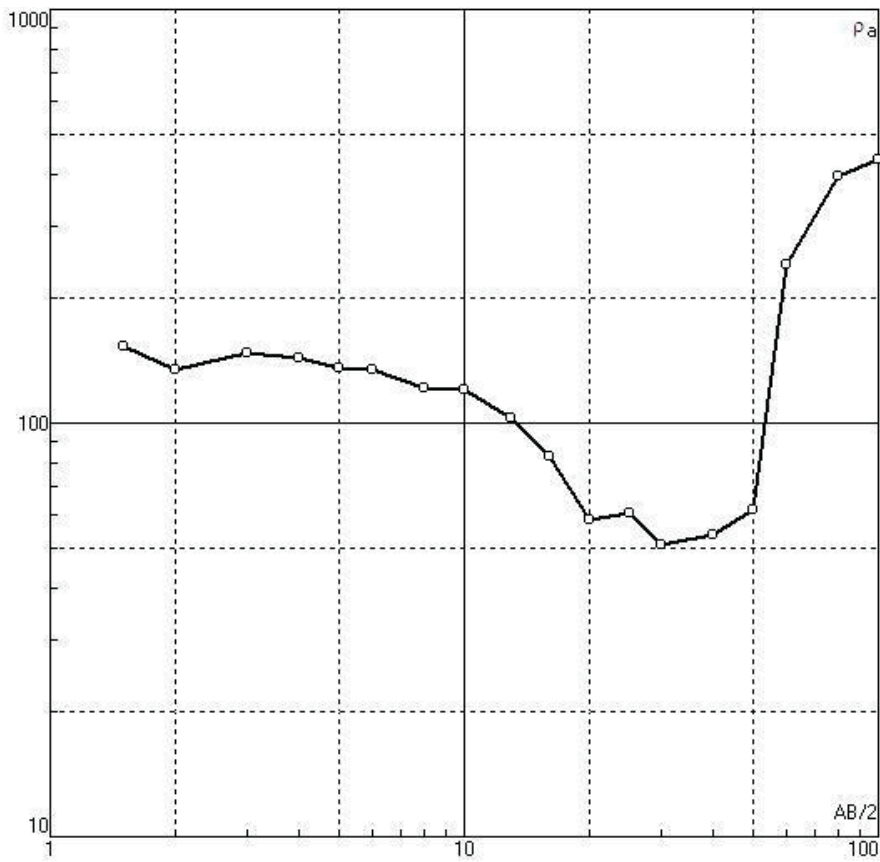
## SEV-02



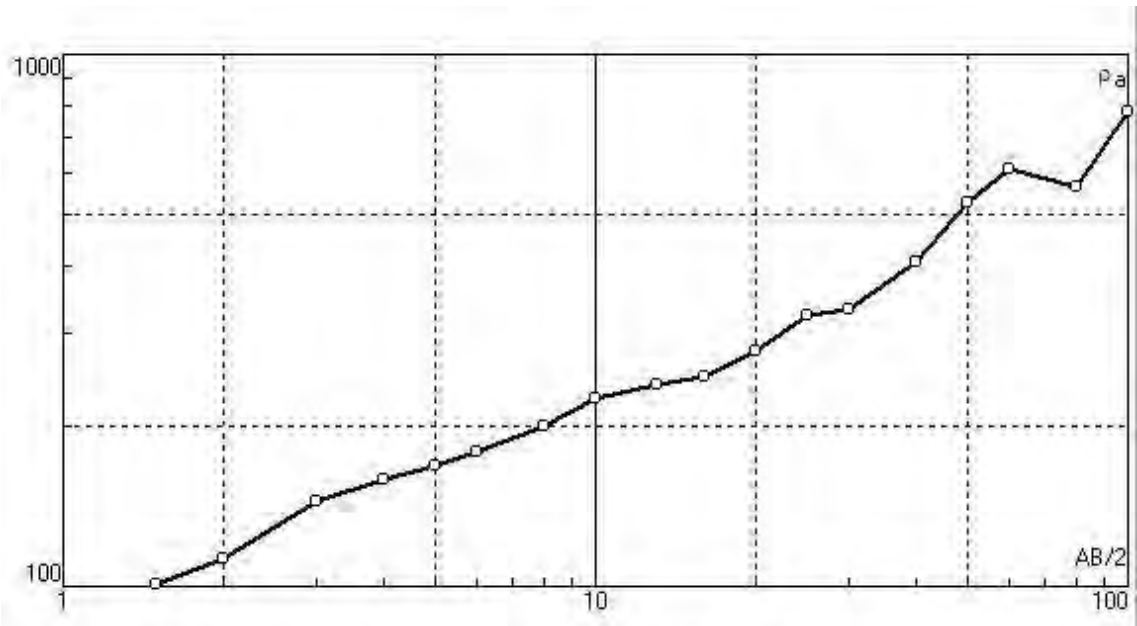
### SEV-03



### SEV-04



# SEV-05



## Anexo 6

### Planilhas de Aquisição - Caminhamento Elétrico (CE)

<b>CE</b>	<b>1</b>	<b>UTM</b>	<b>X</b>	<b>289985</b>		
<b>Data</b>	<b>27/07/2010</b>	<b>Inicial</b>	<b>Y</b>	<b>7408943</b>		
<b>A</b>	<b>B</b>	<b>M</b>	<b>N</b>	<b>k</b>	<b>v/I</b>	<b>pA</b>
0	20	40	60	376.991	0.47	177.1858
0	20	60	80	1507.964	0.14	211.115
0	20	80	100	3769.91	0.082	309.1326
0	20	100	120	7539.82	0.057	429.7697
0	20	120	140	13194.69	0.018	237.5044
0	20	140	160	21111.5	0.016	337.784
20	40	60	80	376.991	0.463	174.5468
20	40	80	100	1507.964	0.142	214.1309
20	40	100	120	3769.91	0.064	241.2742
20	40	120	140	7539.82	0.042	316.6724
20	40	140	160	13194.69	0.017	224.3097
20	40	160	180	21111.5	0.013	274.4495
40	60	80	100	376.991	0.638	240.5203
40	60	100	120	1507.964	0.155	233.7344
40	60	120	140	3769.91	0.067	252.584
40	60	140	160	7539.82	0.038	286.5132
40	60	160	180	13194.69	0.032	422.2301
40	60	180	200	21111.5	0.017	358.8955
60	80	100	120	376.991	0.746	281.2353
60	80	120	140	1507.964	0.239	360.4034
60	80	140	160	3769.91	0.111	418.46
60	80	160	180	7539.82	0.079	595.6458
60	80	180	200	13194.69	0.016	211.115
60	80	200	220	21111.5	0.016	337.784
80	100	120	140	376.991	0.841	317.0494
80	100	140	160	1507.964	0.103	155.3203
80	100	160	180	3769.91	0.099	373.2211
80	100	180	200	7539.82	0.046	346.8317
80	100	200	220	13194.69	0.02	263.8938
80	100	220	240	21111.5	0.006	126.669
100	120	140	160	376.991	0.969	365.3043
100	120	160	180	1507.964	0.222	334.768
100	120	180	200	3769.91	0.084	316.6724
100	120	200	220	7539.82	0.094	708.7431
100	120	220	240	13194.69	0.056	738.9026
100	120	240	260	21111.5	0.042	886.6831
120	140	160	180	376.991	0.801	301.9698



<b>CE</b>	<b>1</b>	<b>UTM</b>	<b>X</b>	<b>289985</b>		
<b>Data</b>	<b>27/07/2010</b>	<b>Inicial</b>	<b>Y</b>	<b>7408943</b>		
<b>A</b>	<b>B</b>	<b>M</b>	<b>N</b>	<b>k</b>	<b>v/I</b>	<b>pA</b>
120	140	180	200	1507.964	0.148	223.1787
120	140	200	220	3769.91	0.117	441.0795
120	140	220	240	7539.82	0.08	603.1856
120	140	240	260	13194.69	0.063	831.2655
120	140	260	280	21111.5	0.065	1372.248
140	160	180	200	376.991	0.564	212.6229
140	160	200	220	1507.964	0.24	361.9114
140	160	220	240	3769.91	0.121	456.1591
140	160	240	260	7539.82	0.064	482.5485
140	160	260	280	13194.69	0.062	818.0708
140	160	280	300	21111.5	0.035	738.9026
160	180	200	220	376.991	1.293	487.4494
160	180	220	240	1507.964	0.322	485.5644
160	180	240	260	3769.91	0.148	557.9467
160	180	260	280	7539.82	0.128	965.097
160	180	280	300	13194.69	0.081	1068.77
160	180	300	320	21111.5	0.057	1203.356
180	200	220	240	376.991	0.665	250.699
180	200	240	260	1507.964	0.199	300.0848
180	200	260	280	3769.91	0.128	482.5485
180	200	280	300	7539.82	0.059	444.8494
180	200	300	320	13194.69	0.035	461.8142
180	200	320	340	21111.5	0.03	633.3451
200	220	240	260	376.991	1.007	379.6299
200	220	260	280	1507.964	0.396	597.1537
200	220	280	300	3769.91	0.122	459.929
200	220	300	320	7539.82	0.058	437.3096
200	220	320	340	13194.69	0.036	475.0088
200	220	340	360	21111.5	0.05	1055.575
220	240	260	280	376.991	1.046	394.3326
220	240	280	300	1507.964	0.247	372.4671
220	240	300	320	3769.91	0.096	361.9114
220	240	320	340	7539.82	0.065	490.0883
220	240	340	360	13194.69	0.093	1227.106
220	240	360	380	21111.5	0.035	738.9026
240	260	280	300	376.991	0.864	325.7202
240	260	300	320	1507.964	0.186	280.4813
240	260	320	340	3769.91	0.1	376.991
240	260	340	360	7539.82	0.179	1349.628
240	260	360	380	13194.69	0.049	646.5398
240	260	380	400	21111.5	0.0299	631.2339
260	280	300	320	376.991	0.716	269.9256

<b>CE</b>	<b>1</b>	<b>UTM</b>	<b>X</b>	<b>289985</b>		
<b>Data</b>	<b>27/07/2010</b>	<b>Inicial</b>	<b>Y</b>	<b>7408943</b>		
<b>A</b>	<b>B</b>	<b>M</b>	<b>N</b>	<b>k</b>	<b>v/I</b>	<b>pA</b>
260	280	320	340	1507.964	0.337	508.1839
260	280	340	360	3769.91	0.81	3053.627
260	280	360	380	7539.82	0.111	836.92
260	280	380	400	13194.69	0.069	910.4336
260	280	400	420	21111.5	0.023	485.5646
280	300	320	340	376.991	0.0662	24.9568
280	300	340	360	1507.964	0.746	1124.941
280	300	360	380	3769.91	0.211	795.451
280	300	380	400	7539.82	0.057	429.7697
280	300	400	420	13194.69	0.02	263.8938
280	300	420	440	21111.5	0.072	1520.028
300	320	340	360	376.991	1.789	674.4369
300	320	360	380	1507.964	0.195	294.053
300	320	380	400	3769.91	0.038	143.2566
300	320	400	420	7539.82	0.016	120.6371
300	320	420	440	13194.69	0.012	158.3363
320	340	360	380	376.991	0.704	265.4017
320	340	380	400	1507.964	0.02	30.15928
320	340	400	420	3769.91	0.021	79.16811
320	340	420	440	7539.82	0.011	82.93802
340	360	380	400	376.991	0.331	124.784
340	360	400	420	1507.964	0.111	167.384
340	360	420	440	3769.91	0.036	135.7168
360	380	400	420	376.991	0.505	190.3805
360	380	420	440	1507.964	0.017	25.63539
380	400	420	440	376.991	2.13	802.9908

<b>CE</b>	<b>2</b>	<b>UTM</b>	<b>X</b>	<b>290256</b>		
<b>Data</b>	<b>28/07/2010</b>	<b>Inicial</b>	<b>Y</b>	<b>7409187</b>		
<b>A</b>	<b>B</b>	<b>M</b>	<b>N</b>	<b>k</b>	<b>v/I</b>	<b>pA</b>
0	20	40	60	376.991	3.11	1172.442
0	20	60	80	1507.964	0.613	924.3819
0	20	80	100	3769.91	0.596	2246.866
0	20	100	120	7539.82	0.386	2910.371
0	20	120	140	13194.69	0.228	3008.389
20	40	60	80	376.991	0.463	174.5468
20	40	80	100	1507.964	0.383	577.5502
20	40	100	120	3769.91	0.185	697.4334
20	40	120	140	7539.82	0.106	799.2209
40	60	80	100	376.991	4.175	1573.937
40	60	100	120	1507.964	0.89	1342.088
<b>CE</b>	<b>2</b>	<b>UTM</b>	<b>X</b>	<b>290256</b>		
<b>Data</b>	<b>28/07/2010</b>	<b>Inicial</b>	<b>Y</b>	<b>7409187</b>		
<b>A</b>	<b>B</b>	<b>M</b>	<b>N</b>	<b>k</b>	<b>v/I</b>	<b>pA</b>
40	60	120	140	3769.91	0.339	1277.999
60	80	100	120	376.991	1.815	684.2387
60	80	120	140	1507.964	0.353	532.3113
80	100	120	140	376.991	1.187	447.4883

<b>CE</b>	<b>3</b>	<b>UTM</b>	<b>X</b>	<b>290100</b>		
<b>Data</b>	<b>28/07/2010</b>	<b>Inicial</b>	<b>Y</b>	<b>7408936</b>		
<b>A</b>	<b>B</b>	<b>M</b>	<b>N</b>	<b>k</b>	<b>v/I</b>	<b>pA</b>
0	20	40	60	376.991	0.036	13.57168
0	20	60	80	1507.964	0.707	1066.131
0	20	80	100	3769.91	0.062	233.7344
0	20	100	120	7539.82	0.007	52.77874
0	20	120	140	13194.69	0.009	118.7522
20	40	60	80	376.991	0.775	292.168
20	40	80	100	1507.964	0.327	493.1042
20	40	100	120	3769.91	0.078	294.053
20	40	120	140	7539.82	0.065	490.0883
40	60	80	100	376.991	2.681	1010.713
40	60	100	120	1507.964	1.444	2177.5
40	60	120	140	3769.91	0.541	2039.521
60	80	100	120	376.991	1.044	393.5786
60	80	120	140	1507.964	0.742	1118.909
80	100	120	140	376.991	0.695	262.0087

<b>CE</b>	<b>4</b>	<b>UTM</b>	<b>X</b>	<b>290062</b>		
<b>Data</b>	<b>28/07/2010</b>	<b>Inicial</b>	<b>Y</b>	<b>7408707</b>		
<b>A</b>	<b>B</b>	<b>M</b>	<b>N</b>	<b>k</b>	<b>v/I</b>	<b>pA</b>
0	20	40	60	376.991	3.841	1448.022
0	20	60	80	1507.964	0.352	530.8033
0	20	80	100	3769.91	0.099	373.2211
0	20	100	120	7539.82	0.066	497.6281
20	40	60	80	376.991	0.503	189.6265
20	40	80	100	1507.964	0.0741	111.7401
20	40	100	120	3769.91	0.0252	95.00173
40	60	80	100	376.991	0.85	320.4424
40	60	100	120	1507.964	0.238	358.8954
60	80	100	120	376.991	1.209	455.7821

## Anexo 7

### Planilhas de Aquisição de Sondagem Elétrica Vertical

SEV	1	UTM	X	289878	
Data	26/07/2010		Y	7408699	
AB/2	Mn/2	K	V	I	pA
1.5	0.3	11.31	299	20	169.0845
2	0.3	20.47	175.9	20	180.0337
3	0.3	46.65	89.9	20	209.6918
4	0.3	83.3	56	20	233.24
5	0.3	130.43	37.8	20	246.5127
6	0.3	188.02	26.9	20	252.8869
8	0.3	334.63	16.17	20	270.5484
8	2	47.12	124.8	20	294.0288
10	0.3	523.13	10.3	20	269.412
10	2	75.4	77.9	20	293.683
13	0.3	884.41	5.65	20	249.8458
13	2	129.59	42.2	20	273.4349
16	0.3	1339.94	3.64	20	243.8691
16	2	197.92	27	20	267.192
20	0.3	2093.92	2.32	20	242.8947
20	2	311.02	17.1	20	265.9221
25	2	487.73	11.29	20	275.3236
25	5	188.5	25.6	20	241.28
30	2	703.72	8.02	20	282.1917
30	5	274.89	18.45	20	253.586
40	2	1253.49	5.22	20	327.1609
40	5	494.8	11.87	20	293.6638
50	2	1960.35	3.8	20	372.4665
50	5	777.54	8.55	20	332.3984
60	5	1123.12	6.69	20	375.6836
60	10	549.78	14.28	20	392.5429
80	5	2002.76	4.77	20	477.6583
80	10	989.6	9.99	20	494.3052
100	5	3133.74	4.05	20	634.5824
100	10	1555.09	8.2	20	637.5869

SEV	2	UTM	X	290176	
Data	27/07/2010		Y	7408950	
AB/2	Mn/2	K	V	I	pA
1.5	0.3	11.31	410	20	231.855
2	0.3	20.47	199	20	203.6765
3	0.3	46.65	109	20	254.2425
4	0.3	83.3	72.3	20	301.1295
5	0.3	130.43	44.1	20	287.5982
6	0.3	188.02	30.4	20	285.7904
8	0.3	334.63	17.6	20	294.4744
8	2	47.12	119.3	20	281.0708
10	0.3	523.13	11.51	20	301.0613
10	2	75.4	77.8	20	293.306
13	0.3	884.41	7.68	20	339.6134
13	2	129.59	50.6	20	327.8627
16	0.3	1339.94	5.36	20	359.1039
16	2	197.92	34.4	20	340.4224
20	0.3	2093.92	2.67	20	279.5383
20	2	311.02	16.31	20	253.6368
25	2	487.73	0	20	0
25	5	188.5	0	20	0
30	2	703.72	16.24	20	571.4206
30	5	274.89	40.1	20	551.1545
40	2	1253.49	9.95	20	623.6113
40	5	494.8	25.3	20	625.922
50	2	1960.35	6.63	20	649.856
50	5	777.54	14.7	20	571.4919
60	5	1123.12	7.71	20	432.9628
60	10	549.78	24.1	20	662.4849
80	5	2002.76	16.3	50	652.8998
80	10	989.6	32.2	50	637.3024
100	5	3133.74	1.42	50	88.99822
100	10	1555.09	23.3	50	724.6719

<b>SEV</b>	<b>3</b>	<b>UTM</b>	<b>X</b>	<b>290093</b>	
<b>Data</b>	<b>27/07/2010</b>		<b>Y</b>	<b>7408684</b>	
<b>AB/2</b>	<b>Mn/2</b>	<b>K</b>	<b>V</b>	<b>I</b>	<b>pA</b>
1.5	0.3	11.31	271	20	153.2505
2	0.3	20.47	153	20	156.5955
3	0.3	46.65	68	20	158.61
4	0.3	83.3	44	20	183.26
5	0.3	130.43	32.1	20	209.3402
6	0.3	188.02	25.7	20	241.6057
8	0.3	334.63	19.3	20	322.918
8	2	47.12	173.7	20	409.2372
10	0.3	523.13	12.88	20	336.8957
10	2	75.4	111.2	20	419.224
13	0.3	884.41	7.36	20	325.4629
13	2	129.59	62	20	401.729
16	0.3	1339.94	5.29	20	354.4141
16	2	197.92	43.5	20	430.476
20	0.3	2093.92	3.48	20	364.3421
20	2	311.02	28.3	20	440.0933
25	2	487.73	17.15	20	418.2285
25	5	188.5	48.2	20	454.285
30	2	703.72	11.12	20	391.2683
30	5	274.89	32.4	20	445.3218
40	2	1253.49	5.5	20	344.7098
40	5	494.8	15.43	20	381.7382
50	2	1960.35	3.74	20	366.5855
50	5	777.54	10.18	20	395.7679

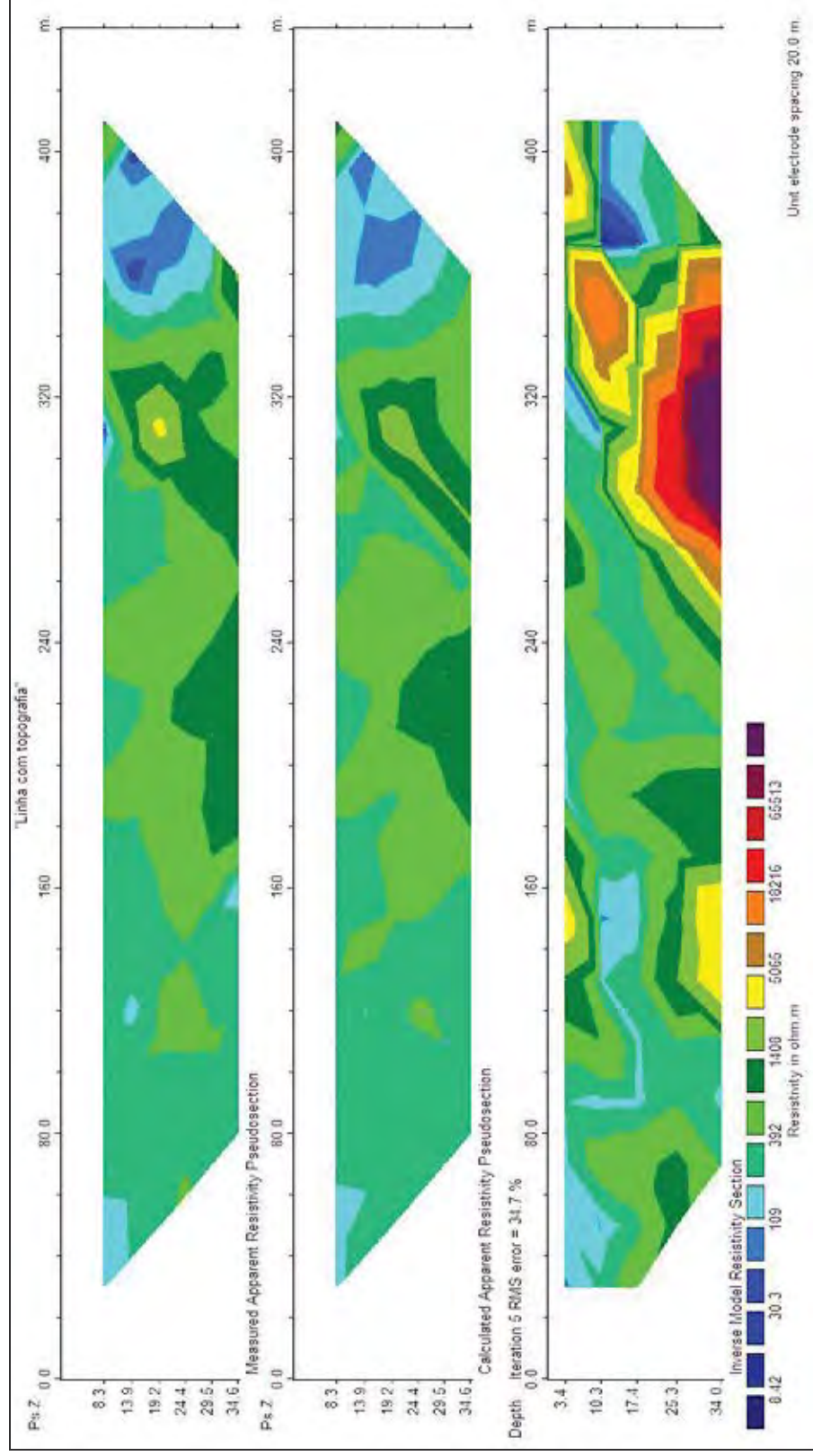


<b>SEV</b>	<b>4</b>	<b>UTM</b>	<b>X</b>	<b>290118</b>	
<b>Data</b>	<b>27/07/2010</b>		<b>Y</b>	<b>7408550</b>	
<b>AB/2</b>	<b>Mn/2</b>	<b>K</b>	<b>V</b>	<b>I</b>	<b>pA</b>
1.5	0.3	11.31	271	20	153.2505
2	0.3	20.47	131.6	20	134.6926
3	0.3	46.65	63.3	20	147.6473
4	0.3	83.3	34.5	20	143.6925
5	0.3	130.43	20.8	20	135.6472
6	0.3	188.02	14.4	20	135.3744
8	0.3	334.63	7.28	20	121.8053
8	2	47.12	90.4	20	212.9824
10	0.3	523.13	4.57	20	119.5352
10	2	75.4	56.4	20	212.628
13	0.3	884.41	2.34	20	103.476
13	2	129.59	27.3	20	176.8904
16	0.3	1339.94	1.24	20	83.07628
16	2	197.92	13.6	20	134.5856
20	0.3	2093.92	0.56	20	58.62976
20	2	311.02	6.08	20	94.55008
25	2	487.73	2.48	20	60.47852
25	5	188.5	18.23	20	171.8178
30	2	703.72	1.45	20	51.0197
30	5	274.89	10.65	20	146.3789
40	2	1253.49	0.86	20	53.90007
40	5	494.8	6.21	20	153.6354
50	2	1960.35	0.63	20	61.75103
50	5	777.54	4.97	20	193.2187
60	5	1123.12	4.29	20	240.9092
60	10	549.78	11.34	20	311.7253
80	5	2002.76	3.94	20	394.5437
80	10	989.6	9.85	20	487.378
100	5	3133.74	2.77	20	434.023
100	10	1555.09	6.56	20	510.0695

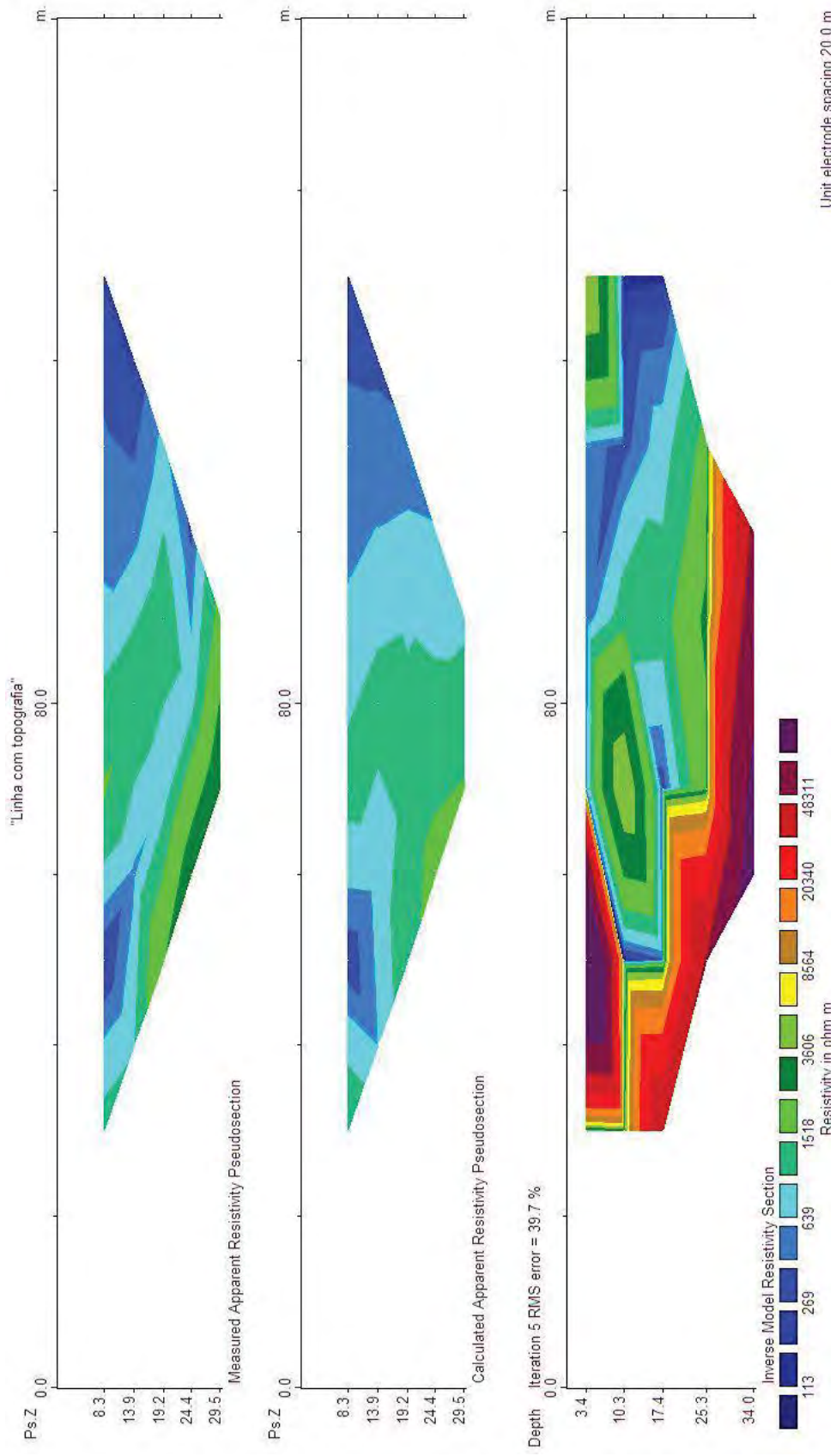
<b>SEV</b>	<b>5</b>	<b>UTM</b>	<b>X</b>	<b>289985</b>	
<b>Data</b>	<b>27/07/2010</b>		<b>Y</b>	<b>7408943</b>	
<b>AB/2</b>	<b>Mn/2</b>	<b>K</b>	<b>V</b>	<b>I</b>	<b>pA</b>
1.5	0.3	11.31	178.3	20	100.8287
2	0.3	20.47	110.2	20	112.7897
3	0.3	46.65	62	20	144.615
4	0.3	83.3	38	20	158.27
5	0.3	130.43	25.9	20	168.9069
6	0.3	188.02	19.1	20	179.5591
8	0.3	334.63	11.95	20	199.9414
8	2	47.12	86.8	20	204.5008
10	0.3	523.13	8.61	20	225.2075
10	2	75.4	61.9	20	233.363
13	0.3	884.41	5.43	20	240.1173
13	2	129.59	38.8	20	251.4046
16	0.3	1339.94	3.71	20	248.5589
16	2	197.92	25.5	20	252.348
20	0.3	2093.92	2.65	20	277.4444
20	2	311.02	18.22	20	283.3392
25	2	487.73	13.2	20	321.9018
25	5	188.5	35.2	20	331.76
30	2	703.72	9.46	20	332.8596
30	5	274.89	24.5	20	336.7403
40	2	1253.49	6.49	20	406.7575
40	5	494.8	16.2	20	400.788
50	2	1960.35	5.35	20	524.3936
50	5	777.54	13.74	20	534.17
60	5	1123.12	10.83	20	608.1695
60	10	549.78	20.8	20	571.7712
80	5	2002.76	5.61	20	561.7742
80	10	989.6	10.69	20	528.9412
100	5	3133.74	4.98	20	780.3013
100	10	1555.09	9.48	20	737.1127

# Anexo 8 – Pseudo Seções de Caminhamento Elétrico

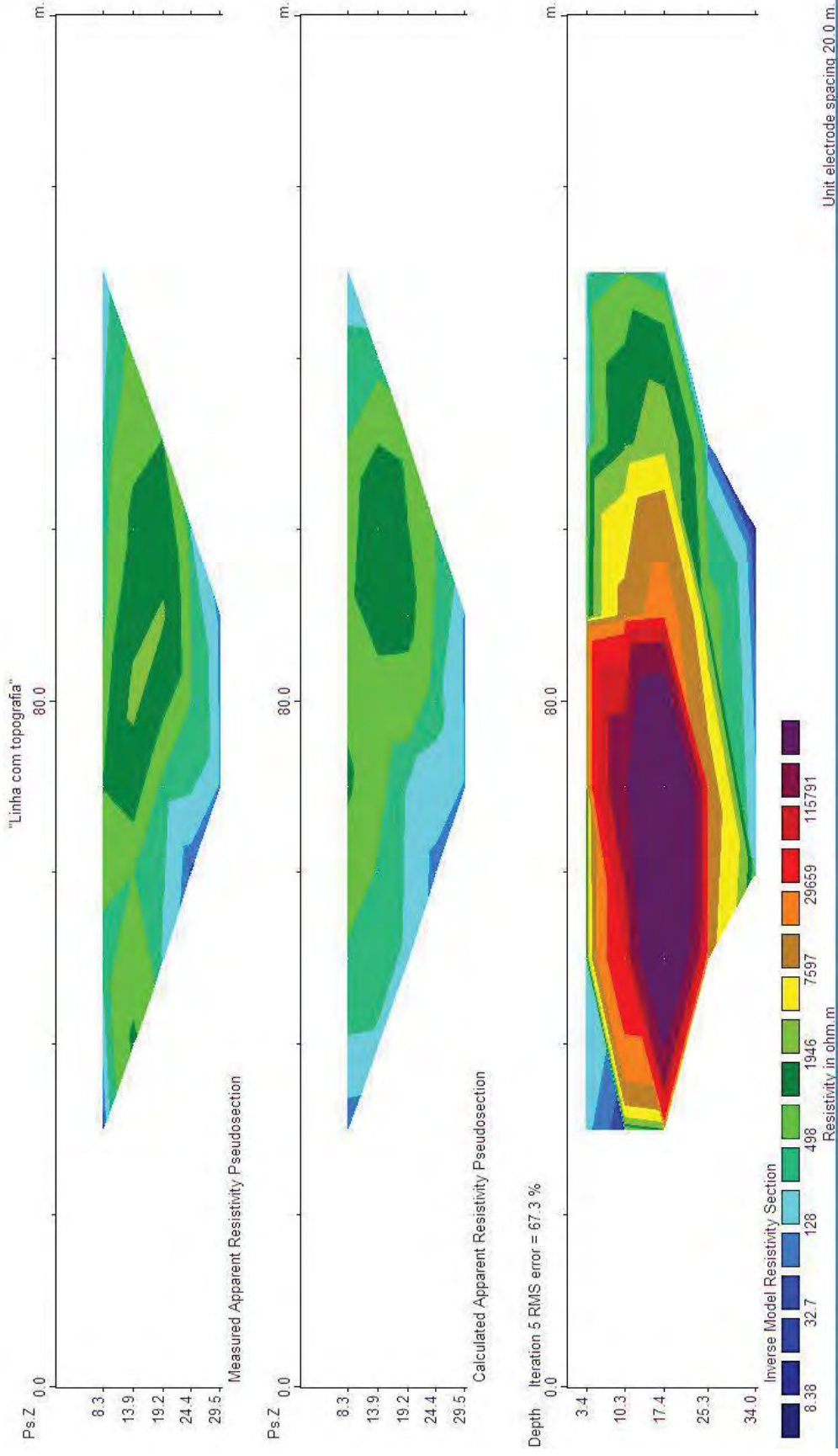
## Seção CE-01



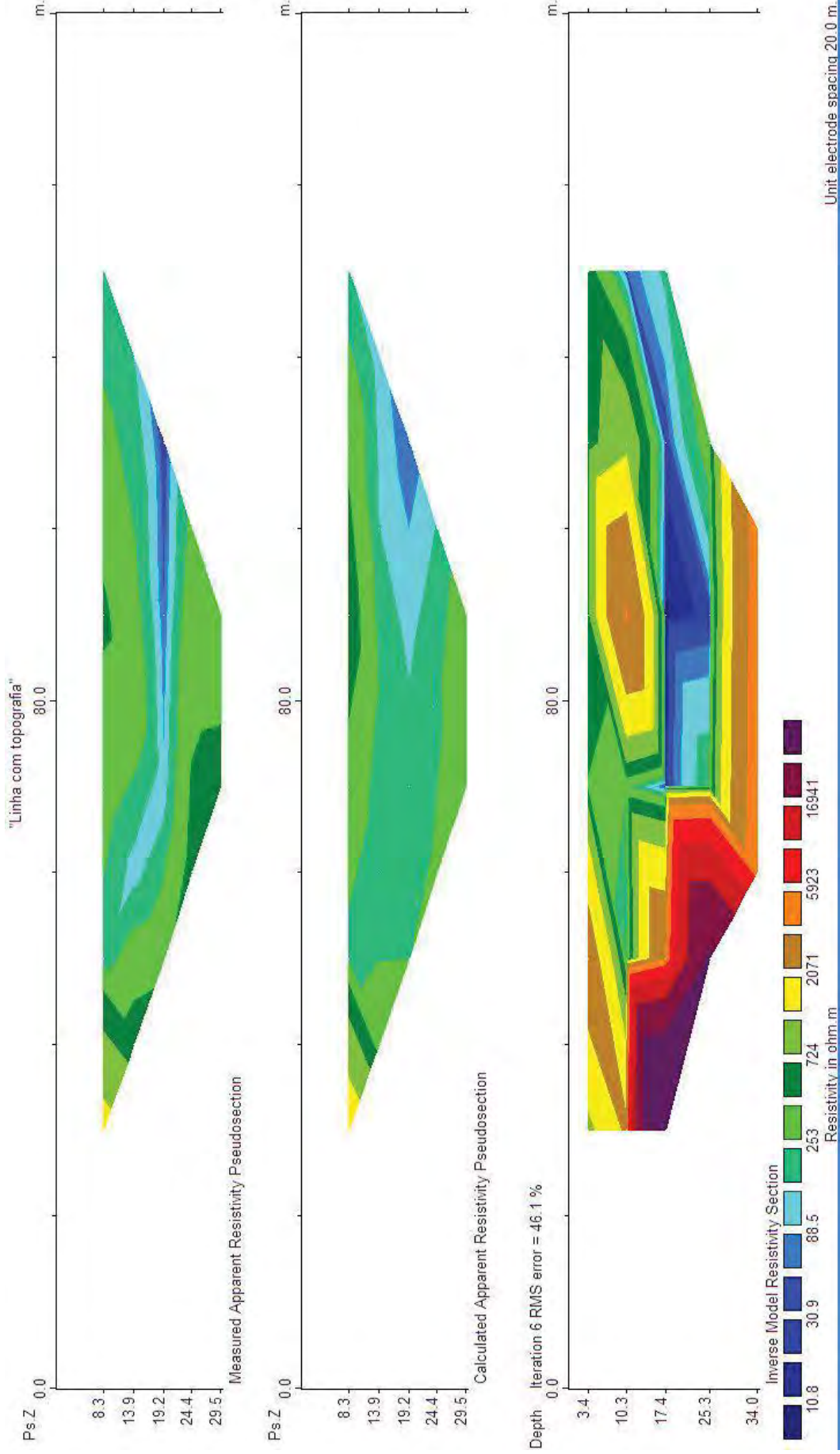
## Seção CE-02



# Seção CE-03



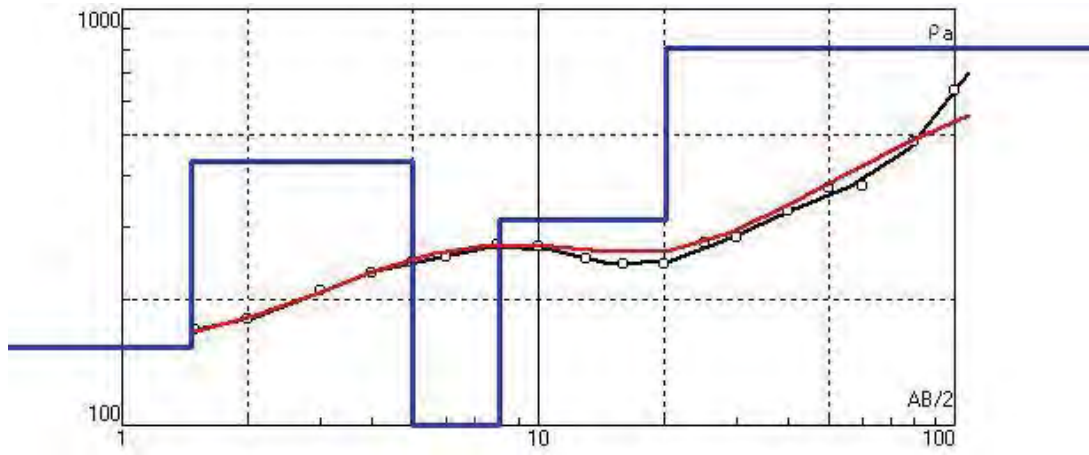
## Seção CE-04



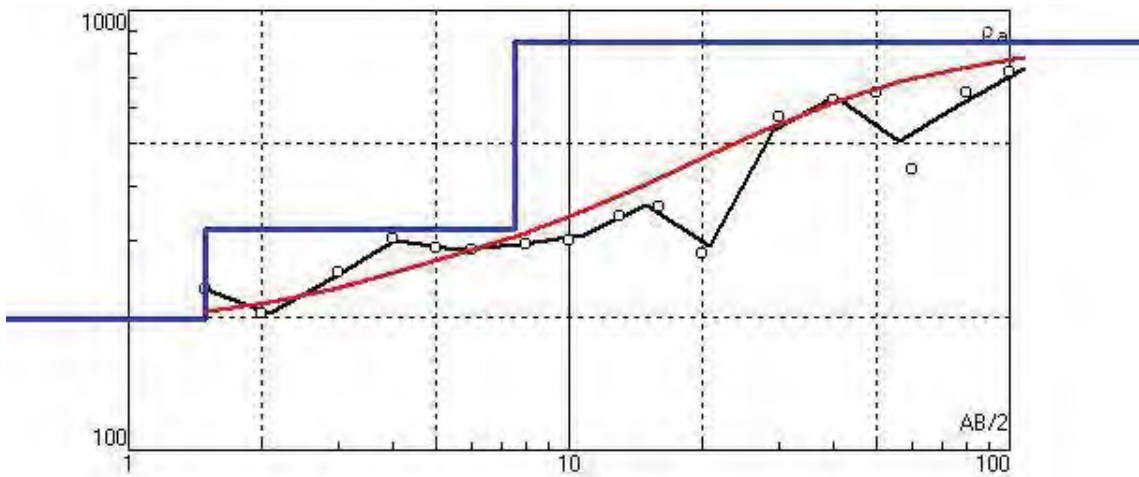


# Anexo 9 – Curvas Modeladas - SEV

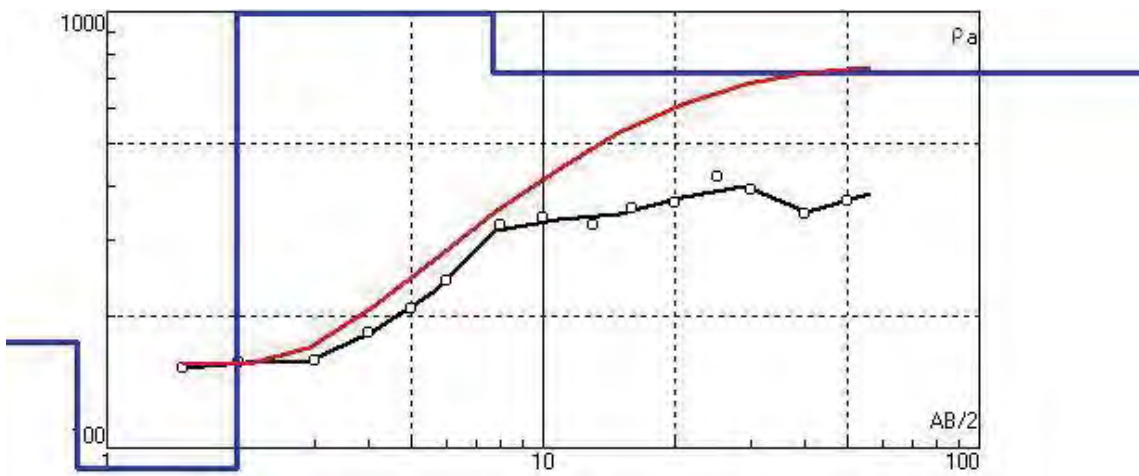
## SEV-01



## SEV-02

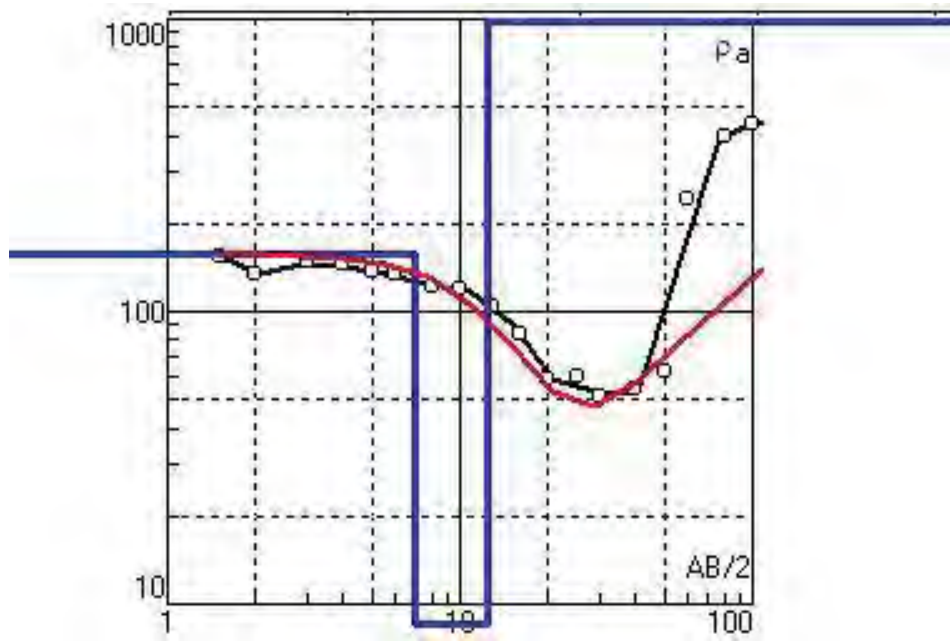


## SEV-03

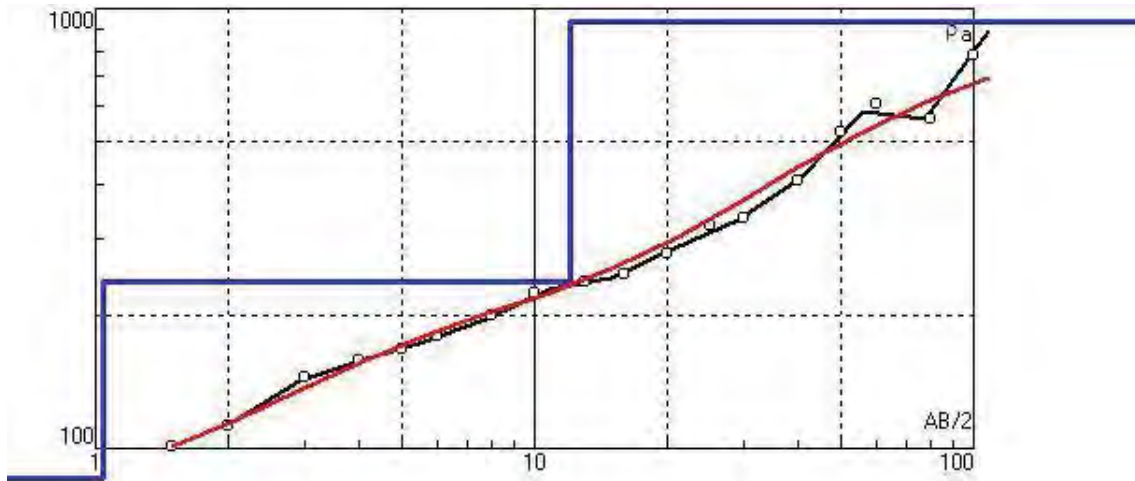




### SEV-04



### SEV-05



321	2	CRISTALINO	7403930	291970	0	4	0
321	102	CRISTALINO	7404000	286880	10	6.3	700
321	5	CRISTALINO	7404240	291210	0	2.54	780
321	25	CRISTALINO	7404440	280010	1	27	740
321	26	CRISTALINO	7404550	280230	0.6	7	690
321	21	TERCIARIO FORMACAO SAO PAULO	7404900	279230	3	30.43	740
321	44	CRISTALINO	7405030	292330	0.3	4	0
321	43	CRISTALINO	7405340	292370	3.7	4	0
321	87	CRISTALINO	7405370	279070	6	23	0
321	33	CRISTALINO	7405970	285320	0	16	720
321	4	CRISTALINO	7406150	293050	0	3.5	0
321	89	CRISTALINO	7406220	286170	10	4	0
321	3	CRISTALINO	7406270	293140	0	0.1	0
321	18	CRISTALINO	7406310	286100	9	2.08	642
321	104	FREATICO	7406360	282390	0	0	0
321	62	FREATICO	7406400	284540	2	3	0
321	90	CRISTALINO	7406400	286430	0	0	0
321	61	FREATICO	7406510	284580	2	3	0
321	1	CRISTALINO	7406610	292110	0	5.58	0
321	24	CRISTALINO	7406650	288140	5	8.2	700
321	28	GRUPO TUBARAO	7406740	283240	7.5	41	700
321	108	CRISTALINO	7406740	288430	2	8	0
321	101	CRISTALINO	7406800	287470	3	22.11	720
321	118	CRISTALINO	7407040	288150	6	26.4	704
321	116	CRISTALINO	7407900	281520	0.24	45.57	700
321	14	CRISTALINO	7408310	285320	0	0	637
321	13	CRISTALINO	7408320	285520	0	6.5	637
321	32	**	7408350	281520	0	0	650
321	64	**	7408400	281570	0.3	0	0
321	63	**	7408420	281560	2	0	0
322	4	PRECAMBRIANO TERCIARIO SAO PAUL	7409800	298800	46	42.5	0
322	211	CRISTALINO	7409800	298780	33	38	755
322	225	**	7410030	298950	0	0	0
321	59	CRISTALINO	7410140	285630	1.4	11.3	640
321	110	FORMACAO SANTO ANASTACIO	7411560	294960	39.2	21.52	0
322	236	TERCIARIO FORMACAO SAO PAULO	7411600	295710	26	4.6	680
321	109	TERCIARIO FORMACAO SAO PAULO	7411900	295490	10	6.15	680
321	111	FORMACAO SANTO ANASTACIO	7411970	295080	7.2	53.03	0
322	237	TERCIARIO FORMACAO SAO PAULO	7412680	296000	15	0	680
321	49	**	7415230	287810	1.5	0	650
321	50	**	7415280	287500	1	0	636