

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GLEICE CUNHA DE AQUINO

**USO DA GEOFÍSICA NA DETECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM
AQUÍFERO FRATURADO – CAÇAPAVA DO SUL/RS**

**CAÇAPAVA DO SUL
2016**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo (a) autor (a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

A657u Aquino, Gleice Cunha de
USO DA GEOFÍSICA NA DETECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM
AQUÍFERO FRATURADO - CAÇAPAVA DO SUL/RS / Gleice Cunha
de Aquino.
45 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)--
Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2016.
"Orientação: Maximilian Fries".

1. Eletroresistividade. 2. Fraturas. 3. Aquífero.
4. Modelo geoeletrico. I. Título.

GLEICE CUNHA DE AQUINO

**USO DA GEOFÍSICA NA DETECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM
AQUIFERO FRATURADO – CAÇAPAVA DO SUL/RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geologia da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Geologia.

Orientador: Maximilian Fries

**CAÇAPAVA DO SUL
2016**

GLEICE CUNHA DE AQUINO

**USO DA GEOFÍSICA NA DETECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM
AQUIFERO FRATURADO – CAÇAPAVA DO SUL/RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geologia da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 05/12/2016.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Maximilian Fries
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Ms. Luiz Delfino Albarnaz
UNIPAMPA

Prof. Ms. Rafael Lima Dessart

Dedico este trabalho a minha família e ao gatinho que me auxiliou e apoiou nos período do curso, sempre acreditando nos meus sonhos.

AGRADECIMENTO

Agradeço a minha família por todo o suporte prestado durante este longo caminho. Ao meu orientador, os mais sinceros agradecimentos por ter acreditado em meu potencial e por ter fornecido todo apoio necessário nesta última fase de minha vida acadêmica. Aos colegas e professores por toda a vivência, experiência e conselhos dados ao longo dos anos. E por fim, agradeço ao meu companheiro, Aharon Barreiro, por haver feito parte desta jornada ao meu lado.

“Ipse se nihil scire id unum sciat”.

Autor desconhecido.

RESUMO

Atualmente a exploração de águas subterrâneas constitui uma área cada vez mais importante devido ao aumento da demanda de água por parte do crescimento populacional e industrial; e a inviabilidade de consumo de fontes como rios, lagos e aquíferos contaminados em consequência da atividade humana. Dificuldades para abastecer a população e perdas de produção na agricultura são registradas periodicamente. A geofísica aplicada à exploração de águas subterrâneas constitui um reconhecido método indireto de investigação amplamente utilizado na detecção, análise e caracterização de áreas potencialmente favoráveis à prospecção de águas subterrâneas e superficiais. Este trabalho tem como objetivo realizar um diagnóstico preliminar das características de um aquífero fraturado no município de Caçapava do Sul, RS por meio do método geofísico da eletrorresistividade, técnica de Caminhamento Elétrico (CE). Os resultados foram apresentados em 3 seções de caminhamento elétrico e possibilitaram a detecção do topo rochoso (granito) recoberto por espessa camada de solo na área. Fratura, zonas de alteração (saprólito) da rocha são apresentadas em seções interpretadas (modelos geoeletrico) a partir dos contrastes resistivos/condutivos observados. O estudo representa uma importante ferramenta na investigação indireta não invasiva em um local recoberto por camada de solo. Oferece, também, uma importante caracterização geotécnica do local como subsídios para estudos futuros.

Palavras chave: Eletrorresistividade, Fraturas, Aquífero, Modelo geoeletrico.

ABSTRACT

The exploration of underground water has recently gained importance due to the high demand of an ever growing industry and population over the past few years and the unavailability for consume of the said resource from rivers, lakes and aquifers as a result of human activity. Difficulties to supply the local population with water and losses of agricultural production are common. The geophysics applied to the exploration of underground water constitutes an acknowledged method of indirect investigation widely used for detection, analysis and characterization of potentially favorable areas for superficial and underground water prospection. This study has the objective to perform a preliminary diagnosis of the characteristics of a fractured aquifer in the municipality of Caçapava do Sul, RS through the geophysical method of DC resistivity, using constant separation traversing (CST). The results were presented in 3 sections of electric path and allowed the detection of the rocky top (granite) covered by thick layer of soil in the area. Fracture, alteration zones (saprophyte) of the rock are presented in interpreted sections (geoelectric models) from the observed resistive/conductive contrasts. The study represents an important tool in noninvasive indirect investigation in a site covered by soil layer. It also offers an important geotechnical characterization of the site as subsidies for future studies.

Key words: Eletroresistivity, Fractures, Aquifer, Geoelectric models.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1- Modelo simplificado dos tipos de porosidade. | 18 |
| Figura 2 - Tipos de fratura. | 18 |
| Figura 3 - Modos de abertura das fraturas. | 19 |
| Figura 4 - Parâmetros usados na definição de resistividade. | 21 |
| Figura 5 - Princípio do método da eletrorresistividade. | 21 |
| Figura 6 - Esquema de investigação da sondagem elétrica vertical. | 22 |
| Figura 7 - Esquema do arranjo Schlumberger. | 23 |
| Figura 8 - Esquema de investigação do caminhamento elétrico. | 23 |
| Figura 9 - Esquema do arranjo dipolo-dipolo em campo. | 24 |
| Figura 10 - Mapa de localização e situação da área de estudo. | 25 |
| Figura 11 - Mapa contextualizando a geologia local. | 27 |
| Figura 12 - Mapa dos sistemas aquíferos de Caçapava e regiões próximas. | 28 |
| Figura 13 – Campo de matacões encontrado na área de estudo. | 29 |
| Figura 14 - Mapa de localização dos perfis realizados. | 30 |
| Figura 15 - Eletrorresistímetro utilizado em campo. | 31 |
| Figura 16 - Exemplo de arranjo de blocos utilizado no modelo, juntamente com a posição dos pontos de medida da correspondente pseudo-seção. | 32 |
| Figura 17 - Grid regular para geração do MDT. | 33 |
| Figura 18 – Seções geoeletricas dos perfis 1, 2 e 3. | 36 |
| Figura 19 - Seção de resistividade 1 e respectivo modelo geoeletrico. | 38 |
| Figura 20 - Seção de resistividade 2 e respectivo modelo geoeletrico. | 39 |
| Figura 21 - Seção de resistividade e respectivo modelo geoeletrico. | 40 |
| Figura 22 - Modelo digital de terreno da área com localização dos perfis realizados e falha aferida. | 41 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Valores de resistividade no qual foram baseadas as interpretações geológicas. | 34 |
| Tabela 2 - Limites dos valores de resistividade encontrados na área correspondente aos domínios. | 37 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 2 | OBJETIVOS..... | 14 |
| 2.1 | Geral..... | 14 |
| 2.2 | Específicos..... | 14 |
| 3 | JUSTIFICATIVA..... | 14 |
| 4 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 16 |
| 4.1 | Fundamentos teóricos e técnicas..... | 16 |
| 4.1.1 | Conceitos hidrogeológicos e estruturais – Breve Revisão..... | 16 |
| 4.1.2 | Geofísica aplicada à prospecção de água subterrânea..... | 20 |
| 5 | ÁREA DE ESTUDO..... | 25 |
| 6 | CONTEXTO GEOLÓGICO..... | 26 |
| 7 | CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO..... | 28 |
| 8 | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 29 |
| 8.1 | Análise de campo..... | 29 |
| 8.2 | Levantamento geofísico..... | 30 |
| 8.3 | Processamento dos dados..... | 32 |
| 8.4 | Modelo digital de terreno..... | 33 |
| 9 | RESULTADOS..... | 34 |
| 9.1 | Seções de eletrorresistividade..... | 34 |
| 9.2 | Seções de eletrorresistividade interpretadas – Modelos geoelétricos..... | 37 |
| 9.3 | Modelo Digital de Terreno (MDT)..... | 41 |
| 10 | DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 42 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 43 |

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso de base indispensável à vida, e as crescentes ações antropogênicas colocam este bem mineral em uma situação de vulnerabilidade, causada pela procura intensa, para atender a progressiva demanda decorrente de aumento na matriz industrial a nível nacional, bem como maior demanda por parte da população para usos diversos. Além das consequências da exploração e uso indiscriminado, ocorre também a poluição generalizada causada por elementos nocivos a saúde pública e ambiental, decorrentes da má gestão e fiscalização deste recurso.

A utilização das águas subterrâneas é frequentemente omitida nos planos de gerenciamento de recursos hídricos de uma área por não apresentar obras fotogênicas como barragens e estações de tratamento construídas para utilização da água superficial, contudo, o manancial subterrâneo constitui o maior volume de água doce que ocorre na Terra na forma líquida, da ordem de 10,3 milhões km³, enquanto os rios e lagos acumulam cerca de 104 mil km³ (FEITOSA *et al.*, 2008).

Com todo este volume, a escassez ainda apresenta uma sombra sobre a população, uma vez que, por não utilizar o potencial subterrâneo, ou por vezes esta não ocorrer de forma correta, sofrem frequentemente com secas.

O município de Caçapava do Sul, porção central do estado do Rio Grande do Sul, local proposto para realização deste estudo, situa-se sobre rochas cristalinas fraturadas graníticas onde, as respectivas acumulações e vazões são determinadas pelas direções preferenciais dos fraturamentos e juntas.

Segundo Madrucci (2005) este contexto litológico apresenta potencial para acumulação de água, porém, para que se obtenha sucesso em perfurações de poços, é necessário que se avalie de modo mais preciso os recursos e as ocorrências dos aquíferos fraturados em relação aos condicionantes geológicos.

Para tal contexto, além do mapeamento geológico e estrutural clássico no reconhecimento do arcabouço estrutural, uma ferramenta de grande valor na prospecção de águas subterrâneas é a geofísica aplicada, particularmente os métodos geoeletricos que são utilizados com muita eficácia na caracterização de aquíferos fraturados, identificação da espessura do manto de intemperismo, profundidade do topo rochoso (interface solo/rocha), fraturas preenchidas por água e conseqüentemente na determinação de locais para a perfuração de poços (GALLAS, 2003).

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo principal a delimitação e reconhecimento de topógrafos e fraturas através do método da eletrorresistividade para identificação e caracterização de zonas favoráveis à ocorrência de água em uma área no município de Caçapava do Sul, Estado do Rio Grande do Sul.

2.2 Específicos

Especificamente, pretende-se:

- Gerar seções aparentes de profundidade *versus* resistividade dos materiais (rochas e fluidos presentes);
- Interpretar lineamentos e estruturas locais correlacionáveis à ocorrência/vazão do aquífero, por meio de dados de sensoriamento remoto;
- Elaborar um modelo geoeletrico integrado (feições geológicas, estruturais e anomalias condutivas correlacionáveis a água);
- Determinar interface freático-rocha permitindo a locação de poço artesiano.

3 JUSTIFICATIVA

No Estado do Rio Grande do Sul de acordo com o IBGE (2014) a metade norte do Estado é dominada por aquíferos fissurais. O Aquífero Serra Geral é o aquífero fissural mais explorado no Estado. Esta formação aquífera apresenta características hidrogeológicas que permitem a exploração de grandes volumes de águas subterrâneas a profundidades economicamente viáveis. Já a metade sul do Estado apresenta aquíferos porosos e fissurais, e de acordo com pesquisas realizadas os dois apresentam de média a baixa vazão.

No município de Caçapava do Sul a captação é feita por intermédio da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) e que, conseqüentemente, acarreta um alto custo para o setor público, em razão da logística envolvida e, dificultando a

implantação de fábricas, cooperativas (oliveiras, produtores rurais, agronegócios) e, recentemente na fabricação de cervejas artesanais.

A proposta deste estudo representa importante elemento no desenvolvimento econômico e social da região. É também importante fator de saúde pública, levando-se em conta que muita água usada para consumo humano se encontra contaminada com resíduos domésticos, hospitalar, esgotos e por necrópoles (cemitérios) próximas a poços de captação.

Considerando as premissas acima expostas, a comprovada eficácia e os resultados satisfatórios da geofísica se justificam. Pretende, também, contribuir e otimizar nas análises hidrogeológicas na região em razão da crescente demanda de água subterrânea nos municípios de abrangência da UNIPAMPA.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Fundamentos teóricos e técnicas

4.1.1 Conceitos hidrogeológicos e estruturais – Breve Revisão

As águas subterrâneas ocorrem preenchendo os vazios presentes nas rochas, como os poros, fraturas e fissuras, desta forma conseguem armazenar a maior porcentagem de água existente na Terra (97%). Segundo Giampá e Gonçalves (2006) as propriedades físicas que regem o sistema água/rocha como, porosidade específica (propriedade de estocagem) e permeabilidade (propriedade de transporte) são capazes de determinar as classes hidrogeológicas dos sedimentos ou rochas, que podem ser:

(a) Aquífero – Camada ou corpo rochoso que apresenta os maiores valores de porosidade específica e permeabilidade, como sedimentos arenosos, rochas compactas muito fraturadas ou intemperizadas e sistemas cársticos bem desenvolvidos;

(b) Aquitarde – Camada ou corpo rochoso que apresentam os valores de permeabilidade e porosidade específica baixos, assim como sedimentos argilosos, rochas compactadas pouco fraturadas ou intemperizados e sistemas cársticos pouco desenvolvidos;

(c) Aquiclude – Camada ou corpo rochoso que apresentam os valores de permeabilidade e porosidade específica praticamente nula, como camadas de sedimentos essencialmente argilosos, rochas compactas muito pouco fraturadas ou carstificada;

(d) Aquífuge – Camada ou corpo rochoso muito compacto que apresentam os valores de permeabilidade e porosidade específica também nula, tais como rochas cristalinas do embasamento (magmáticas e metamórficas) não fraturadas ou intemperizadas.

Os aquíferos podem ser classificados ainda de acordo com a pressão das águas nas suas superfícies limítrofes (topo e base) (FEITOSA *et al.*, 2008), com os principais sendo: (a) Aquífero livre – que é designada a primeira camada porosa e permeável, onde as águas da zona saturada (zona abaixo da superfície freática, onde todos os vazios estão preenchidos) estão sob as condições de pressão atmosférica normal;

(b) Aquífero confinado – no qual a camada aquífera se encontra entre duas camadas impermeáveis, resultando em uma pressão superior à atmosférica, pois o peso das camadas superiores é suportado pela estrutura sólida do aquífero;

(c) Aquífero suspenso – nesta situação, o aquífero ocorre acima do nível regional do freático, sobre uma camada impermeável ou semipermeável que não armazena ou transmite água.

No que concerne aos tipos de rochas onde a água se encontra armazenada, que irão influenciar diretamente no padrão de vazios presentes no aquífero, pode-se classificar segundo os domínios hidrogeológicos, que são os sedimentares, cristalinos e cársticos.

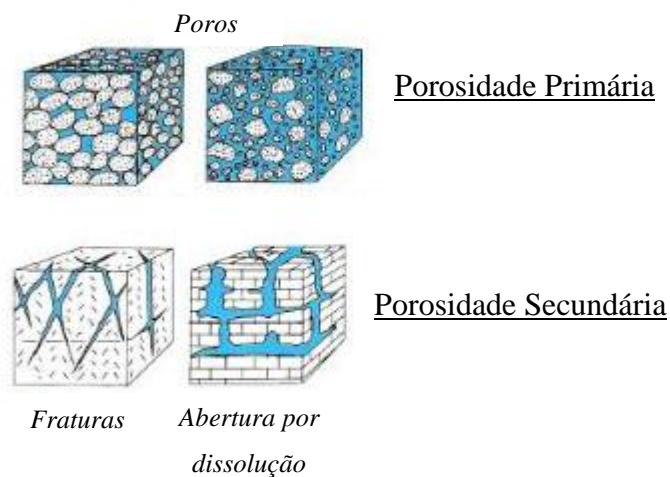
Nos domínios sedimentares se a ocorrência de água subterrânea é nos sedimentos inconsolidados ou pouco consolidados esta apresentará uma grande produtividade, e o padrão de vazios se apresentará do tipo poroso (Figura 1), com alta porosidade (primária) e conectividade entre os poros, permitindo assim que a água flua mais facilmente, já nos corpos rochosos dependerá do grau de compactação e tamanho de grãos existente (FEITOSA *et al.*, 2008).

Já no domínio cárstico a água preenche espaços gerados pela dissolução química de rochas carbonáticas, estas aberturas podem atingir grandes dimensões, criando assim, verdadeiros rios subterrâneos (FEITOSA *et al.*, 2008).

No domínio cristalino, caso abordado neste estudo, a capacidade de acumular água está relacionada à quantidade de fraturas e fissuras conectadas presentes nas rochas, este padrão é denominado de porosidade secundária, e apresenta um grande potencial para a acumulação de água, contudo, para que ocorra sucesso na localização destes tipos de aquíferos é necessário um estudo integrado dos condicionantes geológicos/estruturais (método direto) juntamente com aplicação de métodos geofísicos (método indireto) (FERNANDES, 2008).

Neste último, para melhor entender o comportamento do aquífero é importante compreender as estruturas presentes no corpo, como se desenvolveram assim como sua propagação. As fraturas, que são as principais estruturas em corpos graníticos, de modo geral, podem ser desenvolvidas por movimentos tectônicos, de alívio de pressão, carga e descarga de glaciação, encolhimento durante o resfriamento da massa rochosa, e as forças de compressão e de tensão causados por tensões tectônicas regionais, todos estes eventos serão reflexo do limite de resistência intrínseca do material, referindo-se ao campo de deformação rúptil.

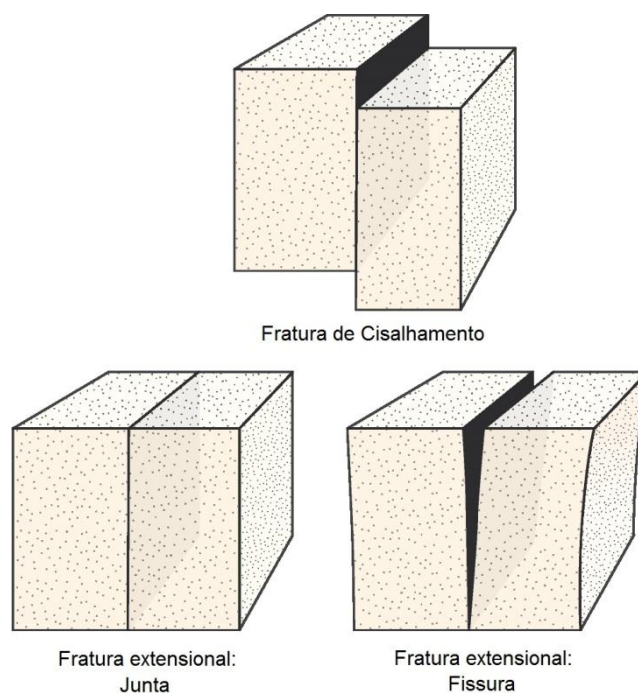
Figura 1- Modelo simplificado dos tipos de porosidade.



Fonte: Desconhecida.

Fossen (2012) define 3 tipos de fraturas de acordo com os movimentos relativos dos blocos, de cisalhamento onde há um movimento paralelo à fratura, a extensional que apresenta extensão perpendicular às paredes, podendo ser junta que não possui deslocamento entre as paredes e fissura ou veios quando são preenchidos por gás, fluídos ou minerais, há ainda a fratura de contração, que apresenta deslocamentos por contração e são preenchidas com materiais residuais da rocha encaixante (Figura 2).

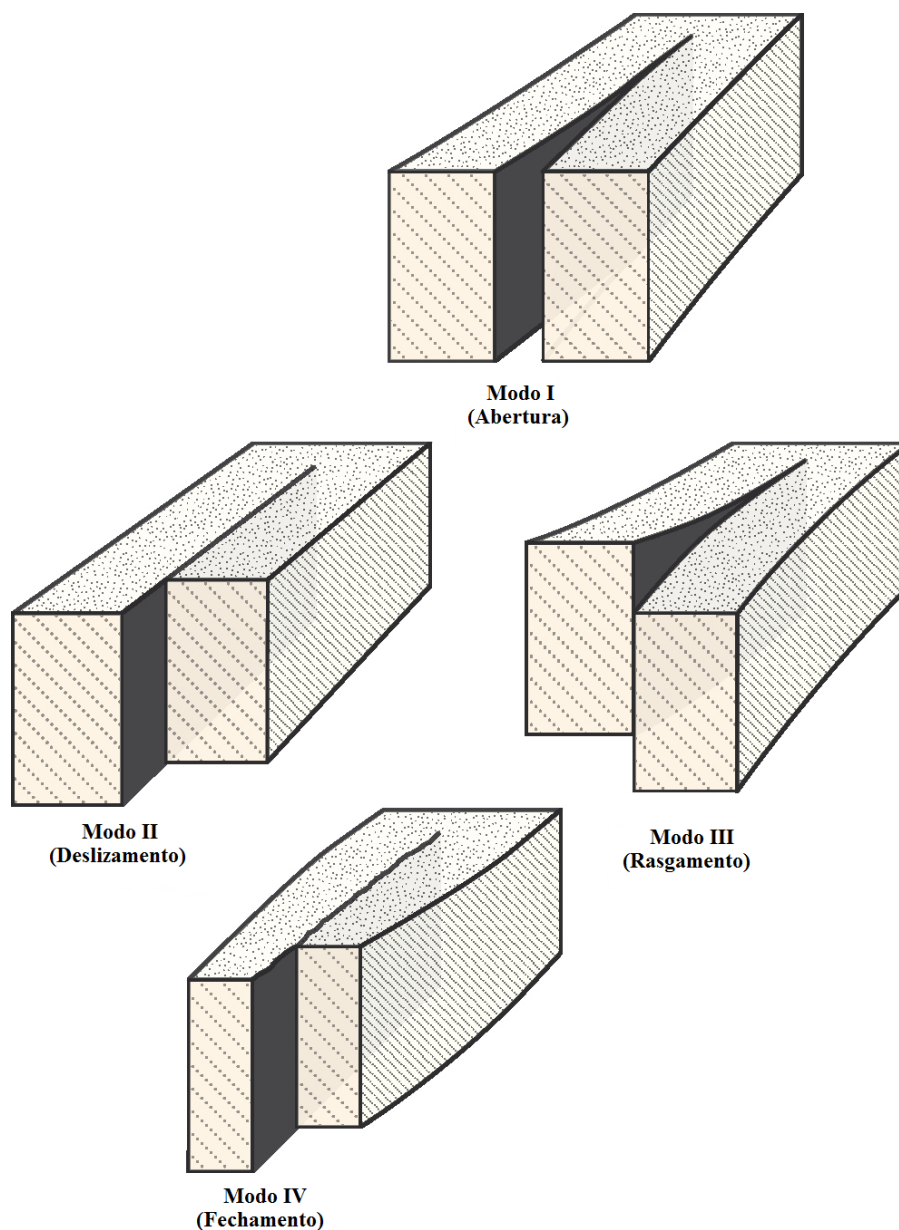
Figura 2 - Tipos de fratura.



Fonte: Extraído de Fossen, 2012.

E através de experimentos em mecânica das rochas, que foram desenvolvidos sob esforços diferenciais e pressões confinantes variadas, é comum a classificação em 4 diferentes modos (FOSSSEN, 2012) (Figura 3). O modo I é o de abertura (extensional) com deslocamento perpendicular, o II representa o modo de deslizamento (cisalhamento) perpendicular à borda, o modo III refere-se ao deslizamento paralelo à borda da fratura (rasgamento ou tearing mode) e o modo IV pode ser usado nos casos de feições contracionais (fechamento).

Figura 3 - Modos de abertura das fraturas.



4.1.2 Geofísica aplicada à prospecção de água subterrânea

A geofísica aplicada é amplamente utilizada como uma ferramenta de auxílio na prospecção de águas subterrâneas, e a escolha do método deve ser baseada na capacidade e objetivo das investigações. Dentre os métodos elétricos, o da eletrorresistividade é o usualmente adotado, pois satisfaz a condição básica para identificação de um aquífero, que é a presença de contraste entre as grandezas, por exemplo, consegue delimitar as zonas de fraturas saturadas em água, vertical e horizontalmente (GIAMPÁ & GONÇALES, 2006).

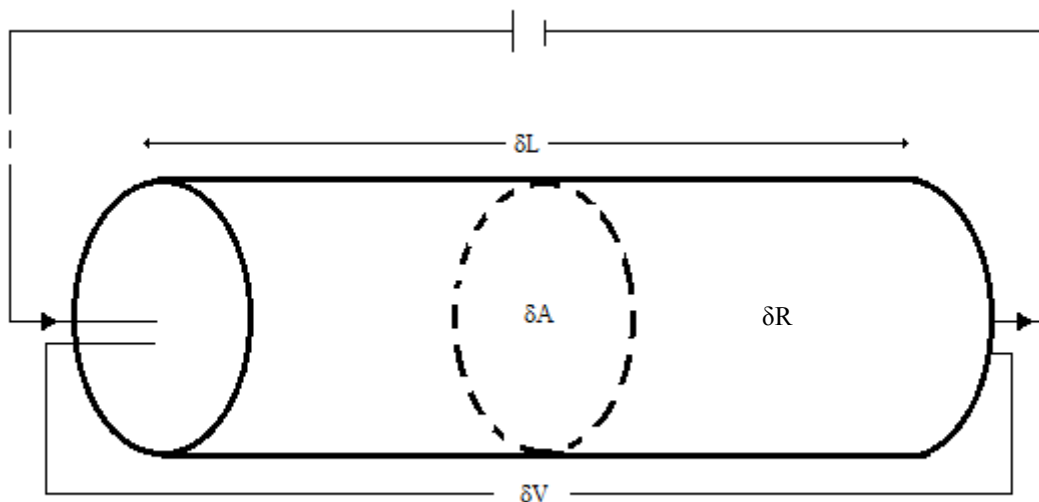
Hazell (1992), Gallas (2003), Madrucci *et al.* (2005), entre outros, vem utilizando o método da eletrorresistividade em terrenos com rochas cristalinas fraturadas com o objetivo de identificação de estruturas com potencial produtor aquífero, uma vez que este tipo de estrutura é favorável à locação de poços tubulares profundos para o fornecimento de água, pois normalmente, fraturamentos assumem o comportamento de zonas de baixa resistividade encaixadas em um “background” mais resistivo, isto se deve ao fato de que a presença de fraturas/fissuras em uma matriz rochosa torna-se uma região que facilita a infiltração de águas e alteração da rocha. Estes processos têm como consequência proporcionar uma redução nos valores de resistividade originais da rocha sã.

Segundo Telford *et al.* (1990) e Kearey *et al.* (2009) este método baseia-se na medida da intensidade de uma grandeza física presente no material, a resistividade elétrica (ρ), que varia de acordo com a composição mineralógica ou química, granulometria, saturação, compactação, cimentação entre outros, e pode ser explicada pela equação 4.1:

$$\rho = \frac{\delta R \delta A}{\delta L} \quad \text{Eq. 4.1}$$

Esta explica a resistividade do material como a resistência em ohms entre as faces opostas de um cubo unitário do material, ou seja, pode ser considerada como sendo uma medida de dificuldade que a corrente elétrica encontra na sua passagem em um determinado material. Onde δR representa a resistência do cilindro condutor com área de seção transversal δA e comprimento δL , e δV é a diferença de potencial entre as extremidades. Porém, como visto em Braga (2006), deve-se considerar que a Terra ou qualquer corpo tridimensional, a corrente elétrica não flui por um único caminho, como no caso do condutor (Figura 4).

Figura 4 - Parâmetros usados na definição de resistividade.



Fonte: Extraído de Kearey (2009).

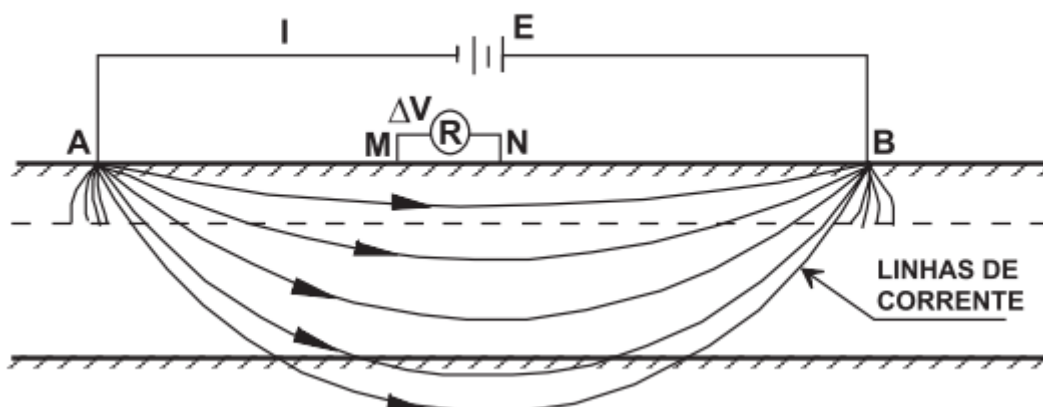
Em campo obtêm-se a resistividade aparente (ρ_a), no qual, baseia-se na passagem pelo solo de uma corrente contínua de intensidade I , transmitida por um par de eletrodos A e B, ligado a um emissor E (baterias ou grupo gerador). Mede-se a diferença de potencial ΔV entre dois eletrodos M e N, e é dada pela equação 4.2:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K \quad \text{Eq. 4.2}$$

Onde: K é um coeficiente que depende das dimensões e arranjo do quadripolo AMNB e é dado pela equação 4.3 (GALLAS, 2003) (Figura 5).

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} + \frac{1}{BM} + \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad \text{Eq. 4.3}$$

Figura 5 - Princípio do método da eletrorresistividade.

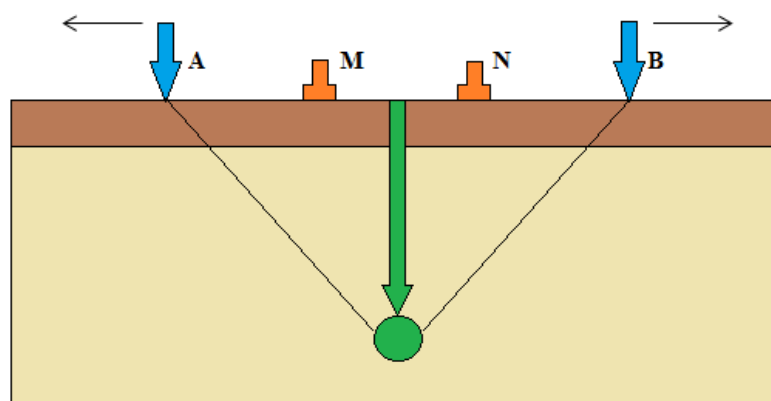


Fonte: Extraído de Gallas (2003).

Tendo em vista a definição dos parâmetros a se obter, têm-se dois procedimentos principais que são empregados em levantamentos de resistividade, apresentando como diferença básica a disposição dos eletrodos na superfície do terreno, que são a sondagem elétrica vertical (SEV) e o caminhamento elétrico (CE).

A sondagem elétrica vertical (SEV) é utilizada em estudos que tem como objetivo a investigação de variações de resistividade elétrica com a profundidade, a partir de um ponto fixo na superfície do terreno (KEARY *et al.*, 2009). Nesta técnica as medidas são executadas através de um arranjo composto por quatro eletrodos AMNB (AB de emissão de corrente e MN de recepção de potencial), dispostos simetricamente em relação ao ponto investigado, que é o centro do arranjo (Figura 6). Portanto, as leituras são tomadas enquanto as correntes atingem progressivamente maiores profundidades.

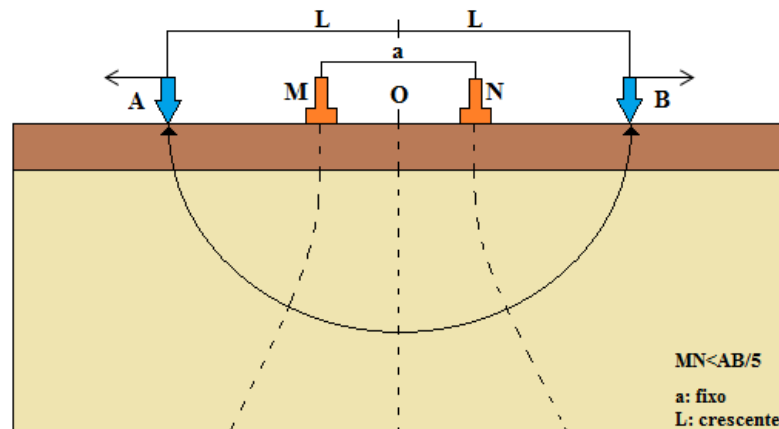
Figura 6 - Esquema de investigação da sondagem elétrica vertical.



Fonte: Extraído de Braga (2006).

Para o desenvolvimento da técnica de SEV existem dois tipos principais de arranjo dos eletrodos, o Schlumberger, onde os eletrodos de potencial (M e N) permanecem próximos ao ponto central (O), com uma distância a entre eles fixa e tendendo a zero a medida os eletrodos de corrente (A e B) são progressivamente afastados (Figura 7), e o arranjo Wenner, no qual, os eletrodos tanto de corrente quanto de potencial são deslocados simultaneamente do ponto central. O arranjo Schlumberger é usualmente adotado no Brasil, por apresentar uma maior praticidade e qualidade dos resultados (BRAGA, 2006).

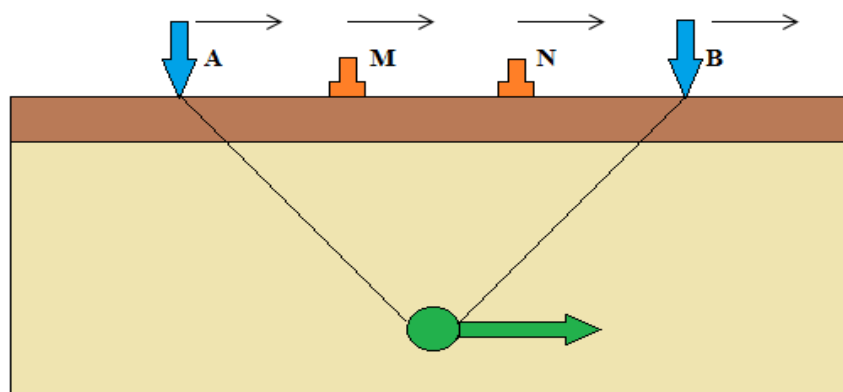
Figura 7 - Esquema do arranjo Schlumberger.



Fonte: Extraído de Braga (2006).

O caminhamento elétrico busca investigar o terreno horizontalmente, por meio de perfis, com o objetivo de obter as variações laterais da resistividade em subsuperfície (GALLAS, 2003). Neste procedimento um conjunto de quatro eletrodos AMNB com distâncias fixas entre eles, é deslocado lateralmente no terreno, ocupando sucessivamente diferentes pontos, nos quais se determina a resistividade (Figura 8).

Figura 8 - Esquema de investigação do caminhamento elétrico.



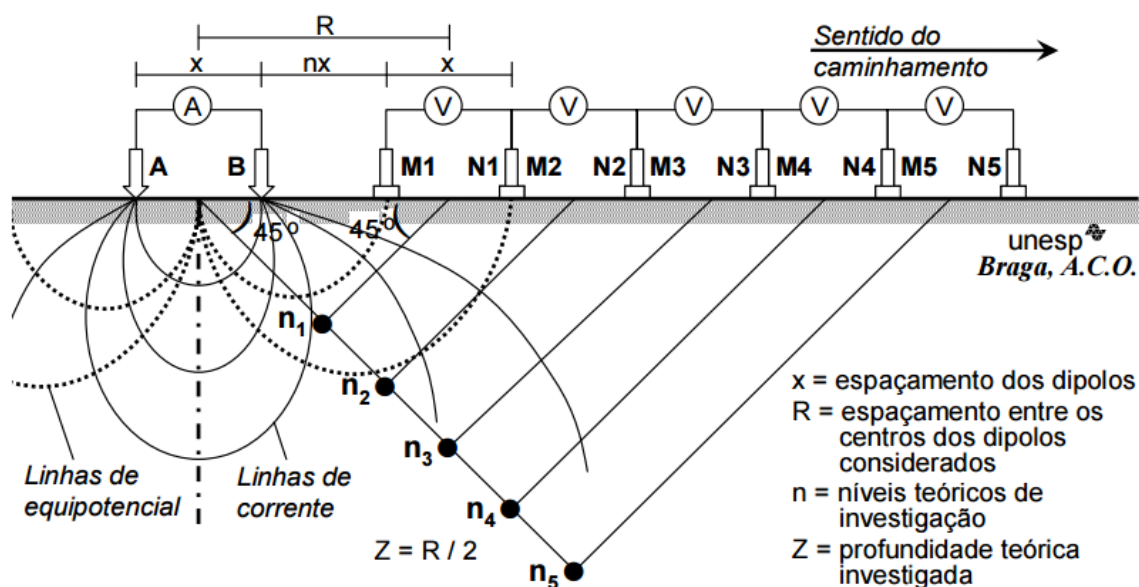
Fonte: Extraído de Braga (2006).

Os arranjos de campo utilizados para execução desta técnica são bastante variados. Segundo Gallas (2000), o que apresenta maior vantagem é o arranjo dipolo-dipolo (Figura 9), pelo fato de se tratar de um arranjo simétrico, sendo mais fácil a

interpretação de uma pseudo-seção, principalmente para se determinar com segurança a posição de uma anomalia. Neste arranjo, o quadripolo é alinhado ao longo de perfis previamente estaqueados, com espaçamento pré-determinado e constante, em função das profundidades de investigações requeridas, pois tanto o espaçamento entre os dipolos como os números de dipolos utilizados regulam as profundidades de investigações atingidas.

Após a disposição do arranjo no terreno, e obterem-se as leituras pertinentes, todo o arranjo é deslocado para a estaca seguinte e efetuadas as leituras correspondentes, continuando este procedimento até final do perfil a ser levantado (BRAGA, 2006).

Figura 9 - Esquema do arranjo dipolo-dipolo em campo.



Fonte: Extraído de Braga (2006).

5 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no município de Caçapava do Sul, na região central do Rio Grande do Sul. O município citado possui acesso por duas das principais rodovias do estado, a BR-392 e BR-290, que fazem ligação entre a capital e o interior. A área situa-se próxima ao campus da Universidade Federal do Pampa/UNIPAMPA as margens da Avenida Pedro Anunciação.

Figura 10 - Mapa de localização e situação da área de estudo.



Fonte: Adaptado de Google Earth e banco de dados do IBGE.

6 CONTEXTO GEOLÓGICO

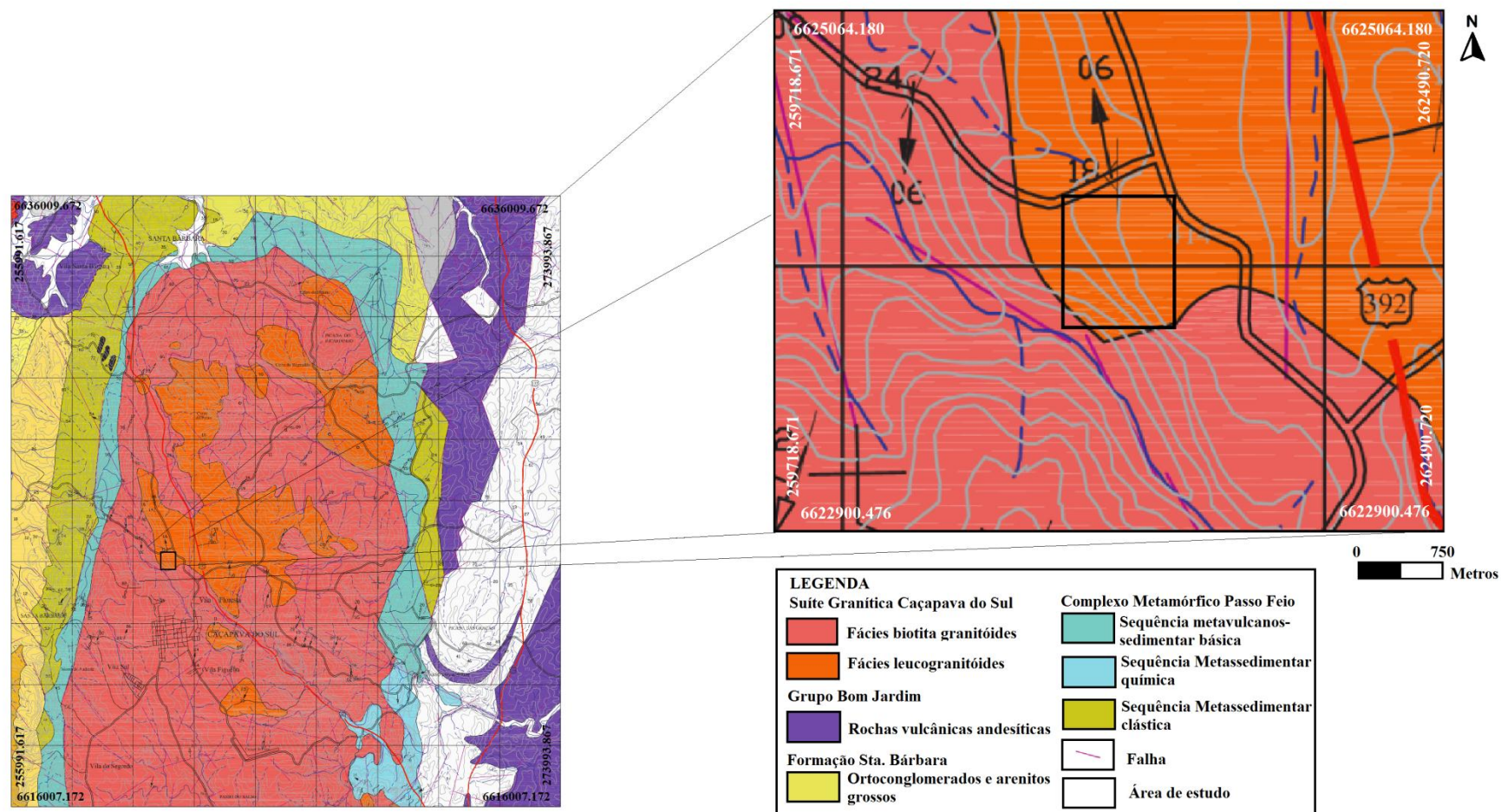
A área de estudo está inserida na Suíte Granítica Caçapava do Sul (SGCS) que é classificada como granitóides sintranscorrentes contidos no Domínio Ocidental do Escudo Sul-Rio-Grandense que congrega associações de rochas metamórficas, ígneas e sedimentares, de idade, origem e evolução diversas, distribuídas num complexo arranjo tectono-estratigráfico, controlado por lineamentos regionais NE-SW e NW-SE (PORSCHÉ & LOPES, 2000). Os granitóides sintranscorrentes são representados por corpos plutônicos intrusivos nas unidades metamórficas do Domínio Ocidental, com foliação milonítica relacionada a eventos transcorrentes.

A SGCS compreende dois corpos graníticos intrusivos na associação metassedimentar do Complexo Metamórfico Passo Feio que constitui uma sequência de rochas vulcano-sedimentares que foram metamorfizadas, estas podem conter desde ardósias, filitos, xistos pelíticos, xistos grafiticos, mármore, quartzitos, metaconglomerados, anfibolitos e metabasaltos (REMUS *et al.*, 2000). As relações de contato das rochas graníticas com as encaixantes são marcadas pela emissão de apófises, geralmente concordantes ou de baixo ângulo com a foliação principal dos metamorfitos. A foliação milonítica que afeta os granitóides é de maneira geral concordante com a foliação principal da sequência metamórfica (PORSCHÉ & LOPES, 2000).

Esta SGCS é constituída predominantemente por monzo e sienogranitos, com participação subordinada de rochas de composição granodiorítica a tonalítica presentes na borda oeste do corpo principal. Devido aos diversos tipos petrográficos, existem três fácies principais: biotita granitos, leucogranitos e granitos transicionais (NARDI & BITENCOURT, 1989). A área de estudo compreende principalmente a fácies leucogranitóide.

A constituição mineralógica principal está representada por proporções variadas de quartzo, feldspato alcalino e plagioclásio, com biotita presente nas diversas fácies como mineral varietal e hornblenda identificada apenas nos tipos tonalíticos. Os minerais acessórios mais comuns estão representados por zircão, allanita, apatita e minerais opacos, além de titanita e rutilo como acessórios. Clorita, epidoto, muscovita, carbonato e opacos secundários constituem a mineralogia resultante do metamorfismo associado à fase de deformação transcorrente (PORSCHÉ & LOPES, 2000).

Figura 11 - Mapa contextualizando a geologia local.

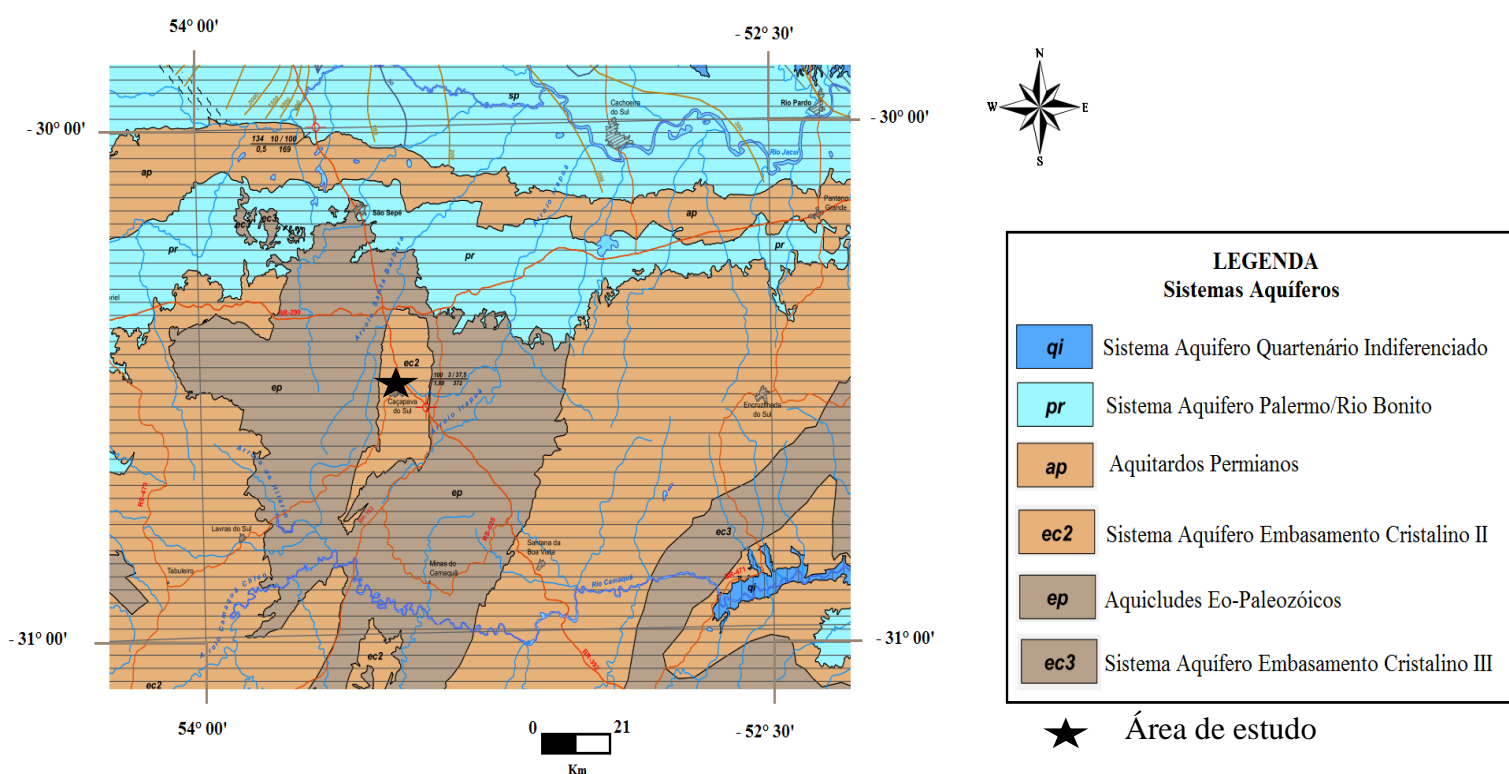


Fonte: Extraído de UFRGS (1990).

7 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

A situação hidrogeológica do Estado do Rio Grande do Sul desperta grande interesse dos órgãos de pesquisa geológica, com o intuito de levantar a situação dos recursos hídricos do estado foi realizado um mapeamento hidrogeológico das potencialidades, qualidade das águas e aspectos construtivos dos poços, para permitir construção e elaboração de políticas públicas adequadas ao aproveitamento sustentável das águas subterrâneas, e neste foi determinado que o município de Caçapava do Sul está inserido no Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II (Figura 12).

Figura 12 - Mapa dos sistemas aquíferos de Caçapava e regiões próximas.



Fonte: Extraído do Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul, Machado & Freitas (2005).

Este sistema compreende basicamente as áreas correspondentes aos limites do embasamento cristalino, e abrange todas as rochas graníticas, gnáissicas, andesíticas, xistos, filitos e calcários metamorfizados que estão localmente afetados por fraturamentos e falhas. Geralmente apresentam capacidades específicas inferiores a 0,5 m³/h/m, ocorrendo também poços secos. As salinidades nas áreas não cobertas por sedimentos de origem marinha, são inferiores a 300 mg/l. Poços nas rochas graníticas podem apresentar enriquecimento em flúor (MACHADO & FREITAS, 2005).

8 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizadas as seguintes etapas para alcançar os objetivos propostos no trabalho.

8.1 Análise de campo

Para esta etapa foi analisada as características da área de estudo para realizar a integração com os dados coletados na seguinte etapa e a geologia conhecida pela bibliografia. Nesta etapa constatou-se a inexistência de afloramento propicio a coleta de dados estruturais, uma vez que as rochas existentes estavam na forma de matacões (Figura 13).

Figura 13 – Campo de matacões encontrado na área de estudo.

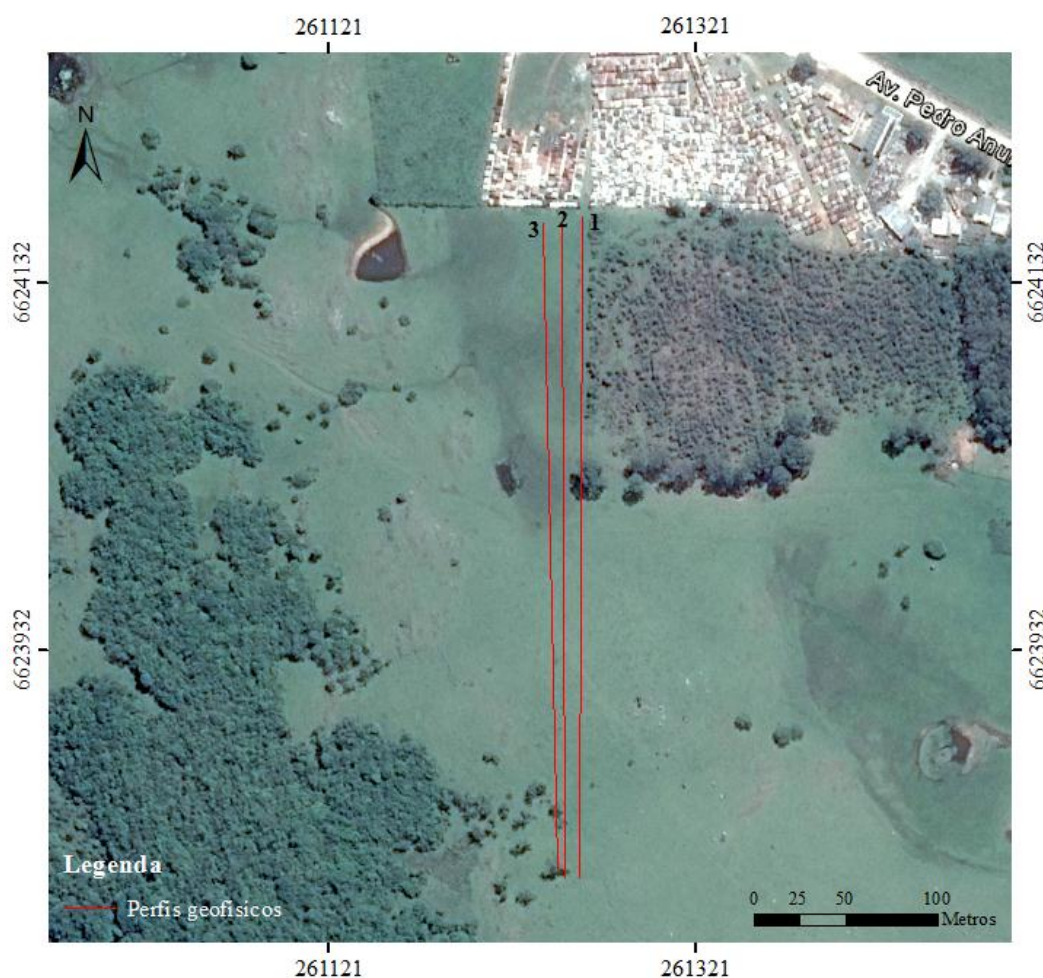


Fonte: Fotos tiradas em campo.

8.2 Levantamento geofísico

Foram realizados levantamentos de dados de resistividade ao longo de 3 perfis com espaçamento entre eles de 10 metros e de direção N-S (Figura 14). Para esta coleta foi utilizado o eletrorresistivímetro da Iris Instruments, de fabricação francesa, modelo SYSCAL Pro com operação em 10 canais de saída e potência de 250 watts (Figura 15). Utilizou-se a técnica do Caminhamento Elétrico, e o arranjo de campo empregado para execução desta foi o dipolo-dipolo, no qual, após o mesmo ser previamente montado com espaçamento entre as estacas de 5 metros, o equipamento, que fica instalado no centro, recebe uma programação prévia e assim realiza as medidas de profundidade teórica e lateralmente.

Figura 14 - Mapa de localização dos perfis realizados.



Fonte: Adaptado do Google Earth.

Figura 15 - Eletrorresistivímetro utilizado em campo.



Fonte: Foto retirada em campo.

8.3 Processamento dos dados

O processamento dos dados medidos em campo ocorreu por meio do software RES2DINV (Geotomo Software, 2004). Ao modelo de profundidade de investigação (que é diretamente relacionado à geometria do arranjo adotado e também aos contrastes de resistividade das litologias em subsuperfície) *versus* resistividade dos materiais/rochas e fluidos presentes é integrado a topografia da seção investigada e realizada a inversão.

O método da inversão consiste na determinação de um modelo bi-dimensional (2D) de resistividade a partir do conhecimento da geologia local e dos dados obtidos nos levantamentos elétricos de campo. O modelo 2D usado no software RES2DINV divide a subsuperfície num número de blocos retangulares, sendo o arranjo dos blocos definido pela distribuição dos dados na pseudo-seção (Figura 16). O programa determina a resistividade dos blocos retangulares que apresentarão uma pseudo-seção de resistividade aparente que ajusta as medidas realizadas (Madrucci *et al.*, 2005). As pseudo-seções são representações úteis para a interpretação dos dados, porém não devem ser consideradas imagens verdadeiras da subsuperfície, pois a profundidade de investigação depende de fatores citados acima (Gandolfo, 2007).

Figura 16 - Exemplo de arranjo de blocos utilizado no modelo, juntamente com a posição dos pontos de medida da correspondente pseudo-seção.



Fonte: Extraído de Gandolfo (2007)

A rotina de inversão utiliza uma técnica de otimização denominada de “smoothness-constrained least-squares” (Groot-Hedlin & Constable, 1990). Esta otimização procura reduzir a diferença entre os valores de resistividade aparente calculados e os medidos em campo, ajustando a resistividade do modelo de blocos.

A interpretação de anomalias é geralmente feita de forma qualitativa ou semi-qualitativa, com a geração de um modelo geoeletrico integrado das feições geológicas, estruturais e anomalias condutivas locais que será mostrado mais adiante.

8.4 Modelo digital de terreno

Para uma melhor compreensão da área na qual se aplicou o método elétrico foi gerado um modelo digital de terreno, utilizando uma malha pseudo regular (Figura 17) com aproximadamente 20 metros entre as linhas. Os dados de altimetria foram inseridos no software Surfer versão 10, e aplicou-se o interpolador vizinho mais próximo, que segundo Franke (1982), é considerado o método mais simples, e tem como principal característica, assegurar que o valor interpolado seja um dos valores originais, ou seja, não gera novos valores. O produto final deste interpolador é caracterizado por um efeito de degrau.

Figura 17 - Grid regular para geração do MDT.



9 RESULTADOS

Os resultados obtidos por meio das medidas de eletrorresistividade são apresentados na forma de seções de direções N-S (perfis) com comprimentos atingindo até 350 metros. As interpretações foram efetuadas na forma de modelos geoeletricos, a partir dos contrastes de resistividade observados nas seções.

9.1 Seções de eletrorresistividade

A figura 18 mostra os perfis de resistividade gerados pelo modelo inversão no qual foram baseadas as interpretações geoeletricas. As seções alcançaram até aproximadamente 20 metros de profundidade.

As interpretações foram baseadas nos valores de resistividade estabelecidos na literatura, demonstrados na graduação colorífica com gradiente variando entre cores frias que representam os baixos resistivos e quentes para resistividades intermediárias a alta.

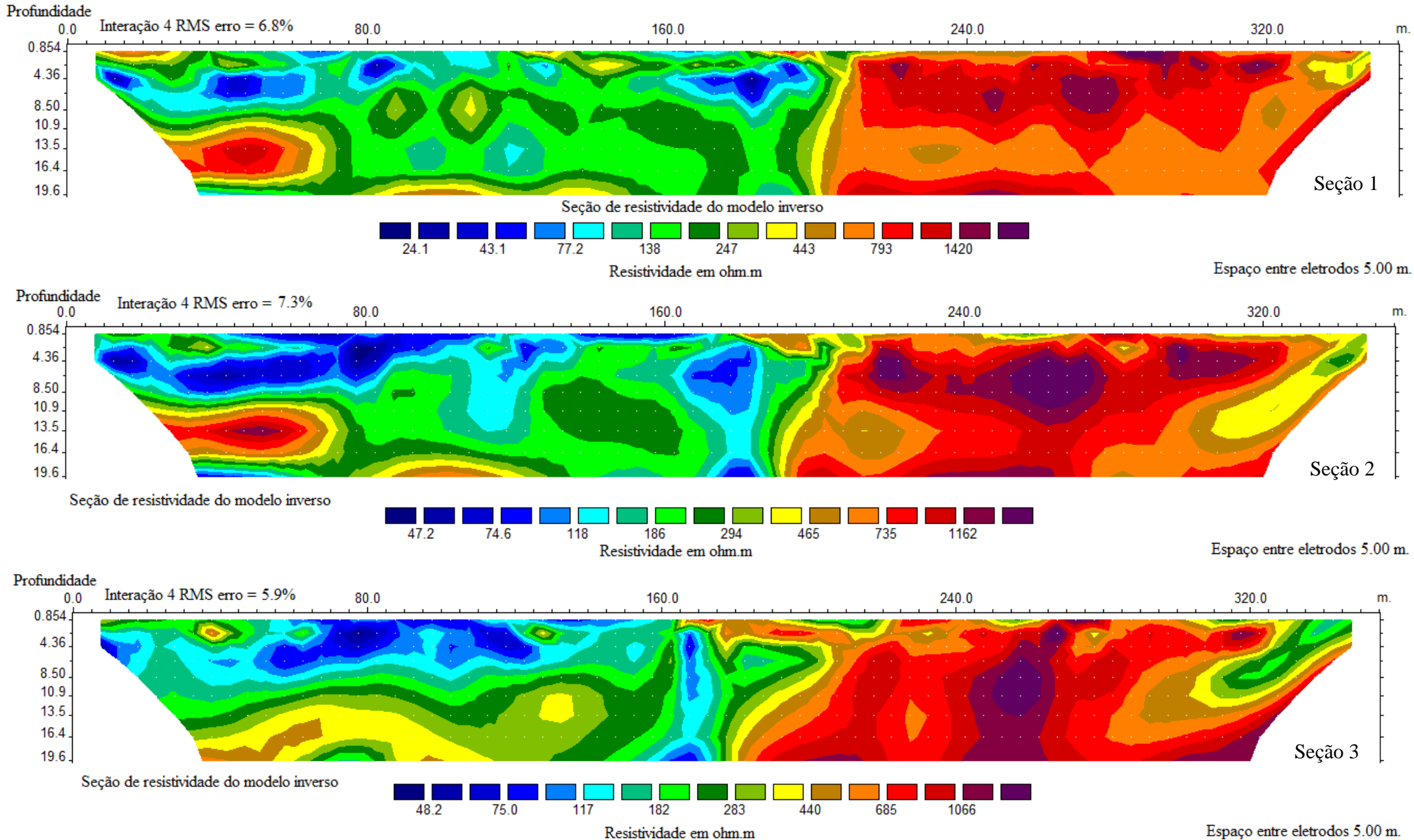
Tabela 1 - Valores de resistividade no qual foram baseadas as interpretações geológicas.

| Material | Resistividade (ohm.m) |
|--------------------------|-----------------------------------|
| Águas doces superficiais | 10-10 ³ |
| Águas subterrâneas | 0,5 - 300 |
| Águas marinhas | 0,2 |
| Solos | 1 - 10 |
| Argilas | 10 – 10 ² |
| Areias | 10 ² - 10 ⁴ |
| Areia saturada | 10 ⁻¹ – 10 |
| Calcário | 10 ² - 10 ⁴ |
| Basaltos | 10 ² - 10 ⁵ |
| Granitos | 10 ² - 10 ⁵ |
| Xistos | 10 – 10 ³ |
| Gnaisses | 10 ² - 10 ⁴ |

Fonte: Extraído de Gandolfo (2007)

Foram determinados quatro domínios de resistividade. As zonas de baixa resistividade possivelmente descrevem zona saturada (solo saturado). As regiões intermediárias foram definidos como o material inconsolidados (solo/regolito), além de apresentar uma zona de alteração saprolítica. A rocha não alterada é representada por seções de alta resistividade, em cores avermelhadas, representando o granito que ocorre na região. Além dos valores foi levado em conta também as características conhecidas da rocha, como padrão de intemperismo do granito que apresenta esfoliação esferoidal, que forma camada concêntricas como pode ser visto nos blocos e matacões encontrados no campo (Figura 13).

Figura 18 – Seções geolétricas dos perfis 1, 2 e 3.



Fonte: Imagens geradas no software RES2DINV.

9.2 Seções de eletrorresistividade interpretadas – Modelos geoeletricos

Como dito anteriormente os modelos geoeletricos gerados foram baseados na interpretação dos valores de resistividade integrada às características geológicas da área. Foram definidos os seguintes valores para cada material encontrado:

Tabela 2 - Limites dos valores de resistividade encontrados na área correspondente aos domínios.

| Material/Rocha | Resistividade | | |
|---|---------------|-----------|-----------|
| | Seção 1 | Seção 2 | Seção 3 |
| Zona saturada | 0 – 138 | 0 – 186 | 0 – 182 |
| Material inconsolidado (solo/ regolito) | 138 – 443 | 186 – 465 | 182 – 440 |
| Saprólito | 443 – 793 | 465 – 735 | 440 – 685 |
| Rocha sã | > 793 | > 735 | > 685 |

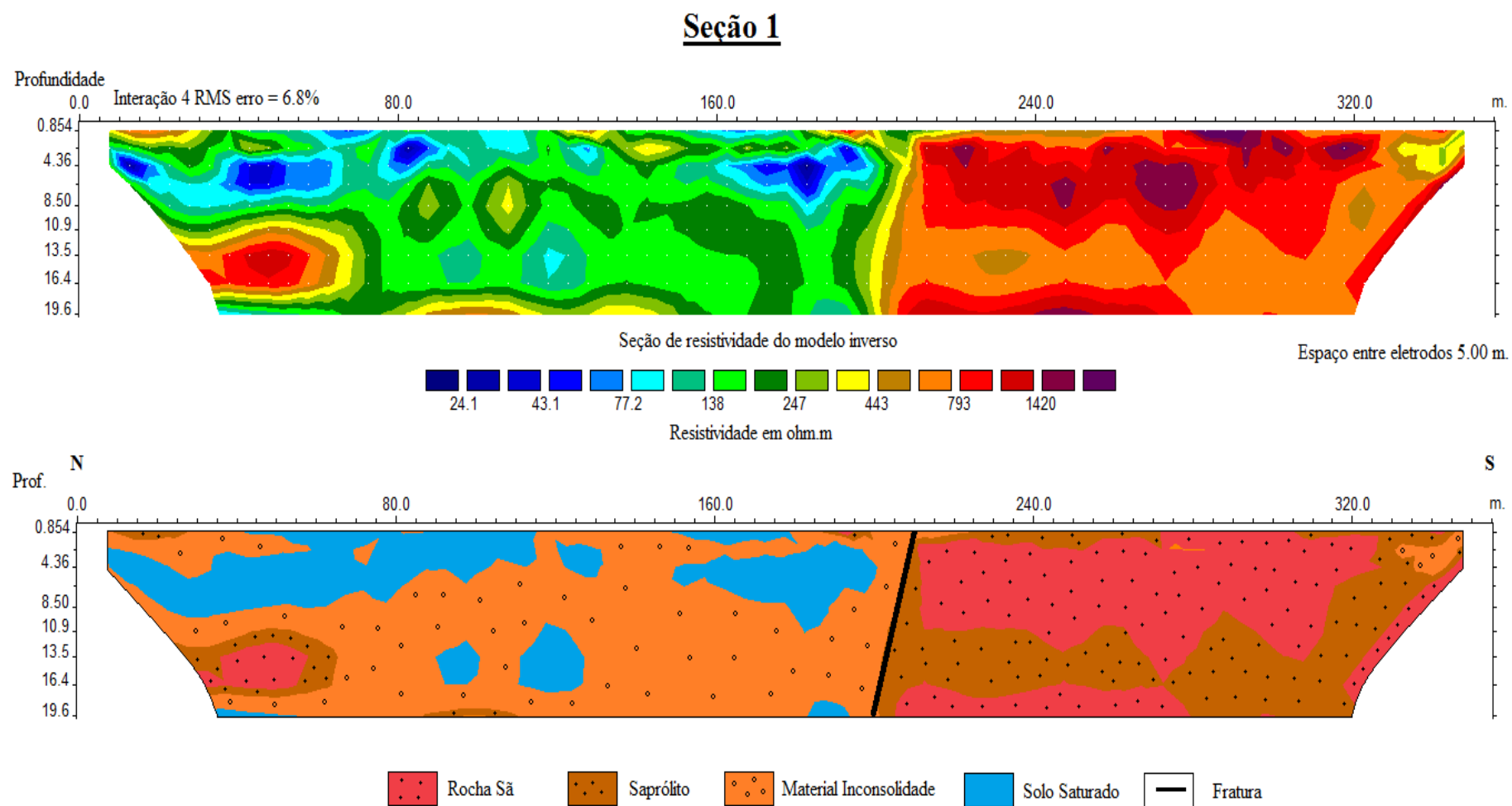
Fonte: Autora

A seção 1 (Figura 19) apresentou até 200 metros ao longo do perfil uma camada de aproximadamente 18 metros solo/regolito (definido na figura como material inconsolidado) com uma camada superficial saturada, além de ser possível visualizar matações a uma profundidade de 10 metros e o topo do que pode ser uma zona de alteração saprolítica na base do perfil, ao longo dos 140 metros finais apresentou-se rocha sã e saprólito, isto pode indicar a existência de zona de deslocamento (possivelmente uma falha) que separou os dois blocos.

Na seção 2 (Figura 20) ainda é possível visualizar a possível falha separando a rocha sã do solo/ regolito lateralmente. Nesta seção a zona saturada (solo saturado) é maior, chegando a até 10 metros no início do perfil e no contato lateral entre o solo e a rocha existe uma zona saturada que compreende toda a espessura levantada e que pode indicar uma possível zona fraturada onde existe um fluxo preferencial de infiltração.

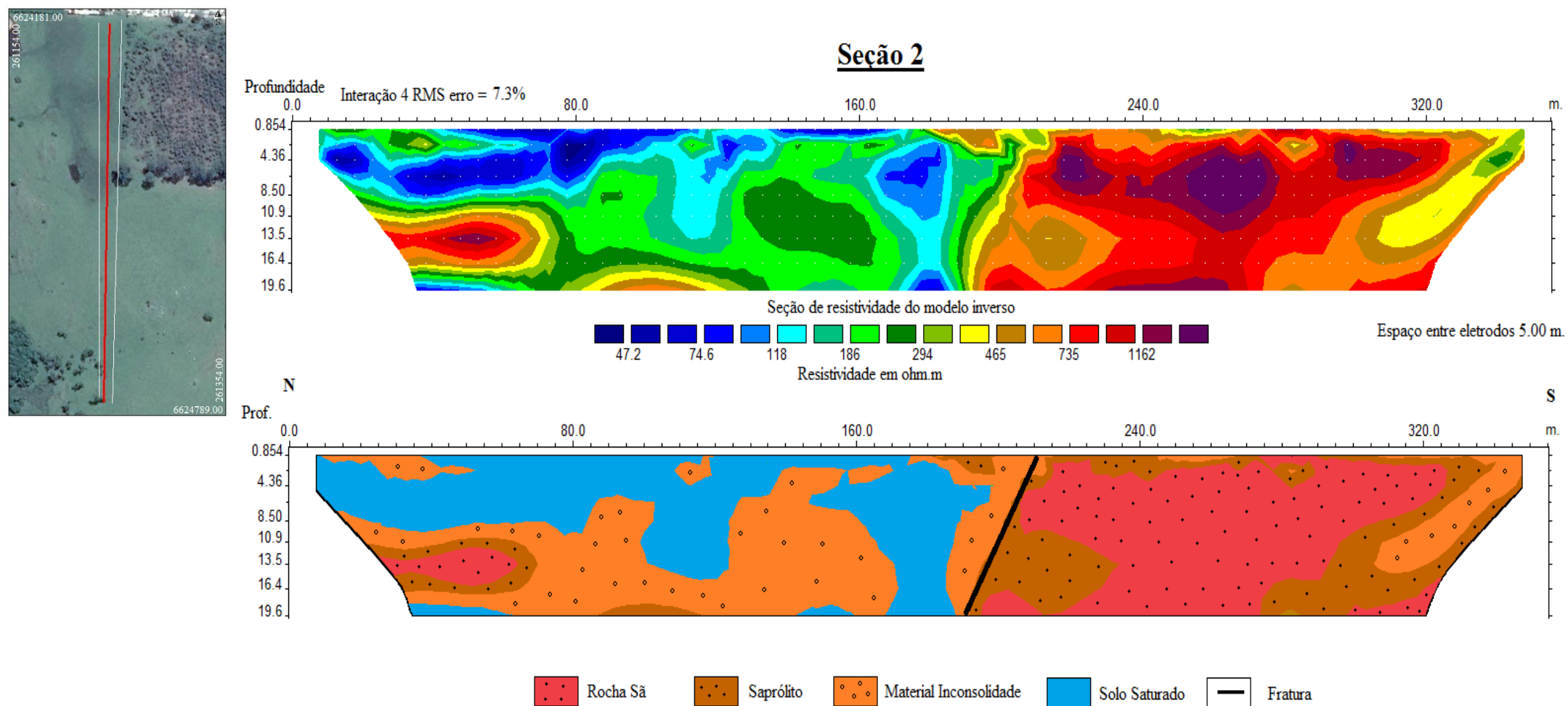
Já na seção 3 (Figura 21) a zona saturada está localizada mais na superfície chegando a até 13 metros ao longo dos 160 metros de perfil, há presença da mesma zona saturada no contato lateral com a rocha como pode ser visto na seção 2.

Figura 19 - Seção de resistividade 1 e respectivo modelo geológico.



Fonte: Autora.

Figura 20 - Seção de resistividade 2 e respectivo modelo geológico.

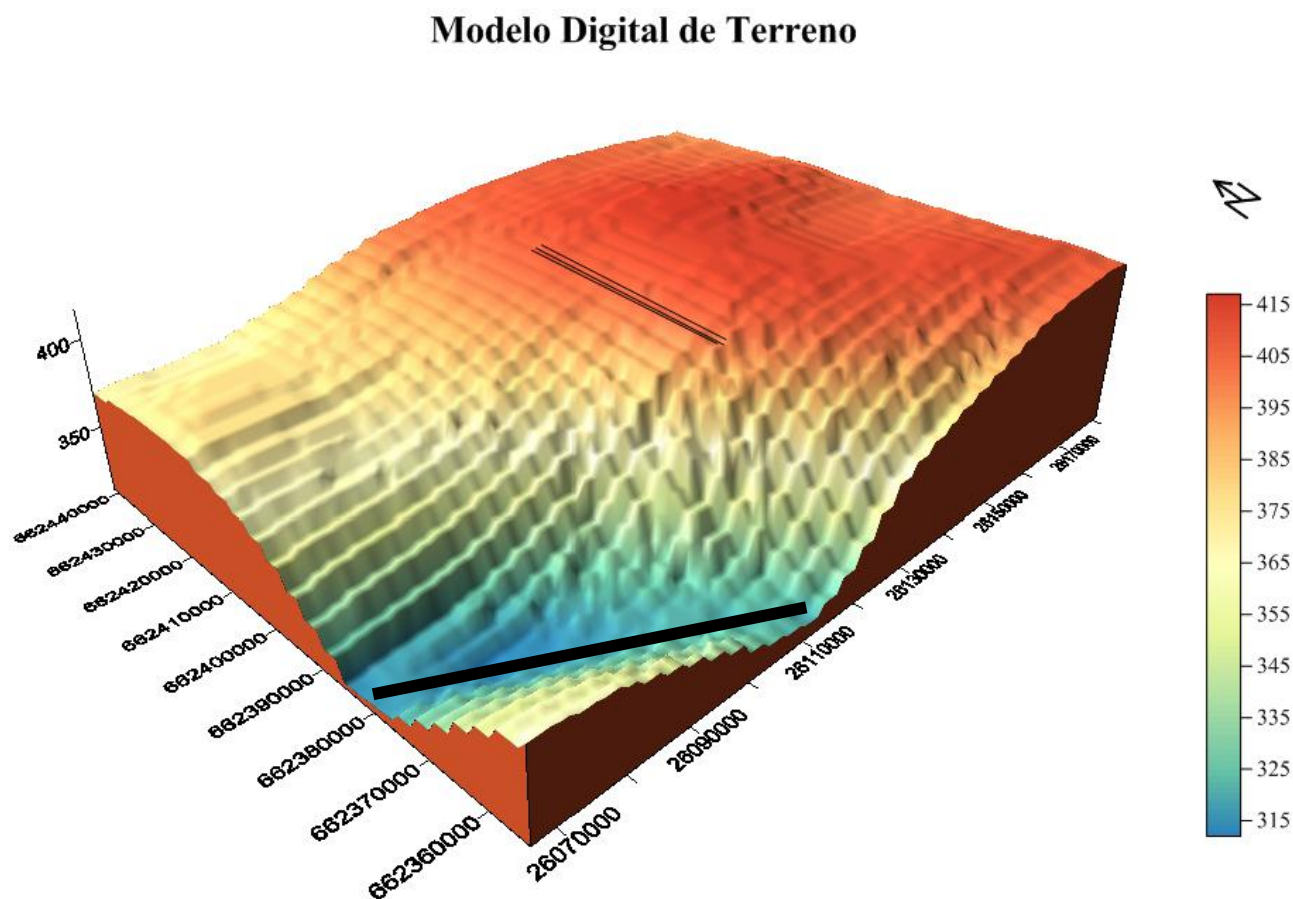


Fonte: Autora.

9.3 Modelo Digital de Terreno (MDT)

No modelo digital de terreno da área observa-se que os perfis de resistividade encontram-se em um alto topográfico plano (Figura 22), localizado nos limites de um baixo topográfico caracterizado na literatura como sendo uma paleofalha de grande extensão que corta a Suíte Granítica Caçapava do Sul (SGCS) que comporta um córrego encaixado na mesma. A estrutura aferida possui uma grande representatividade na influência dos padrões de fraturamento secundários encontrados nas zonas próximas, o que pode ser observado nas seções, onde há um contato lateral entre rocha sã e solo/regolito com presença de uma zona de fraturas saturada.

Figura 22 - Modelo digital de terreno da área com localização dos perfis realizados e falha aferida.



Fonte: Modelo gerado no software Surfer 10.

10 DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A zona saturada na superfície pode ser explicado pelo período no qual ocorreu as aquisições, que foi em julho, que é caracterizado um período chuvoso no município de Caçapava do Sul, ou podendo ser anomalias de contaminantes oriundos do cemitério (SANTOS, 2015). Contudo a zona saturada que alcança 20 metros de profundidade está provavelmente relacionada a zona de fraturas subordinada a falha principal localizada a sudoeste da área de estudo (Figura 22). Pode-se indicar estas áreas de contato entre solo e rocha (aproximadamente 160 metros nas seções 2 e 3) como possíveis locais para locação de poço condicionada ao isolamento da pluma de contaminação constatado em trabalhos anteriores.

O levantamento se apresentou como uma ferramenta eficaz na caracterização da área, devido ao contraste observado nas seções, contudo as seções geradas apresentaram uma melhor resolução para as futuras construções que serão realizadas na área, pois foi possível identificar a espessura de solo da área assim como localização do topo rochoso e matacões em meio ao solo/regolito.

Para trabalhos futuros na área sugere-se a aplicação de métodos diretos, como sondagens a trado, para confirmação da espessura de camada de solo obtida pelo método geofísico, assim calibrando as interpretações realizadas, bem como se sugere realizar coleta de dados geofísicos nas áreas adjacentes para obter uma maior informação sobre as zonas de fratura observada nos modelos geoeletricos gerados, e sobre a extensão da possível pluma de contaminação presente na área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAGA, Antonio Celso de Oliveira. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática.** Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2006.

CARVALHO, Dayvson Cerqueira. **Aplicação do método da eletrorresistividade na caracterização de um aquífero fraturado – Caçapava do Sul/RS.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pampa – Campus Caçapava do Sul, RS. 34 p. 2015.

DO BRASIL, CPRM-Serviço Geológico. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul.** 2008.

DE RECURSOS, CPRM-Companhia de Pesquisa. Minerais. Ministério de Minas e Energia. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Cachoeira do Sul, Folha SH. 22-YA.** PORCHER, CA LOPES, RC (Org.). Estado do Rio de Grande do Sul. Brasília, 2000.

DEGROOT-HEDLIN, Constable; CONSTABLE, S. **Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data.** Geophysics, v. 55, n. 12, p. 1613-1624, 1990.

FERNANDES, Amélia João. **Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação.** Revista do Instituto Geológico, v. 29, n. 1-2, p. 49-72, 2008.

FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. 2008. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações.** 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM – LABHID. 812 p.

FRANKE, R. **Scattered Data Interpolation: Test of Some Methods.** Mathematics of Computations, v. 33, n. 157, p. 181-200. 1982.

GALLAS, João Domingos Faraco. **Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental.** 174 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

GALLAS, João Domingos Faraco. **Prospecção de água subterrânea em aquíferos cristalinos com o emprego de métodos indiretos**. Revista do Instituto Geológico, 24(1/2): 43–51, 2003.

GANDOLFO, Otávio Coaracy Brasil. **Um estudo do imageamento geoeétrico na investigação rasa**. 2007. Tese de Doutorado. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS USP.

GEOTOMO SOFTWARE. **RES2DINV: Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method**, vers. 3.4. 2003.

GOLDEN SOFTWARE. Surfer version 8.0: Surface Mapping System. Colorado, USA: Golden Software, 2002. 1 CD-ROM.

GONÇALVES, Válder Galdiano; GIAMPÁ, Carlos Eduardo Quaglia. **Águas subterrâneas e poços tubulares profundos**. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 14, n. 3, p. IV-IV, 2009.

HAZELL, J. R. T.; CRATCHLEY, C. R.; JONES, C. R. C. **The hydrogeology of crystalline aquifers in northern Nigeria and geophysical techniques used in their exploration**. Geological Society, London, Special Publications, v. 66, n. 1, p. 155-182, 1992.

IBGE. 2014. Mapa Regional de Recursos Hídricos. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/recursos_hidricos/regionais/sul_hidrogeologico.pdf>. Acesso em: 27 de abril de 2016.

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; HILL, Ian. **Geofísica de exploração**. Oficina de Textos, 2009.

KIRSCH, Reinhard (Ed.). **Groundwater geophysics. A tool for Hydrogeology**. 2. Ed. Springer, v. 3, p. 105-108, 2006.

KIRSCH, Reinhard; YARAMANCI, Ugur. **Geoelectrical methods**. 2. Ed. Springer Berlin Heidelberg, 2009.

MACHADO, José Luiz Flores; FREITAS, MA de. **Projeto mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul: relatório final**. Porto Alegre: CPRM, v. 1, 2005.

MADRUCCI, Vanessa; TAIOLI, Fabio; ARAÚJO, Carlos César de. **Análise integrada de dados de sensoriamento remoto, geologia e geofísica no estudo de aquífero fraturado, Lindóia-SP.** Revista Brasileira de Geofísica, v. 23, n. 4, p. 437-451, 2005.

MOREIRA, Cesar Augusto et al. **Análise das relações entre parâmetros geofísicos e vazões para o aquífero livre de Caçapava do Sul (RS).** Águas Subterrâneas, v. 27, n. 3, 2013.

NARDI, Lauro Valentim Stoll; BITENCOURT, Maria de Fátima Aparecida Saraiva. **Geologia, petrologia e geoquímica do Complexo Granítico de Caçapava do Sul, RS.** Revista Brasileira de Geociências, v. 19, n. 2, p. 153-169, 1989.

PORCHER, Carlos Alfredo; LOPES, Ricardo da Cunha. **Relatório folha Cachoeira do Sul SH. 22-Y-A.** 2000.

REMUS, M. V. D. et al. **The link between hydrothermal epigenetic copper mineralization and the Caçapava Granite of the Brasiliano Cycle in southern Brazil.** Journal of South American Earth Sciences, v. 13, n. 3, p. 191-216, 2000.

TELFORD, W.M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics.** 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 770 p.

UFRGS. **Projeto Caçapava do Sul - Mapa Geológico escala 1:50000.** Trabalho de Graduação, UFRGS. 1998.