

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**LISSA CUNHA DE ALMEIDA**

**CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA DE UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS EM  
UMA PORÇÃO DO MUNICÍPIO DE SANTANA DO LIVRAMENTO – RS**

**Caçapava do Sul**

**2017**



**LISSA CUNHA DE ALMEIDA**

**CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA DE UNIDADES HIDROGEOOLÓGICAS EM  
UMA PORÇÃO DO MUNICÍPIO DE SANTANA DO LIVRAMENTO – RS**

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

Orientador: Msc. Hasan Lopes Shihadeh

**Caçapava do Sul**

**2017**

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) .

A447c Almeida, Lissa

CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA DE UNIDADES  
HIDROGEOLÓGICAS EM UMA PORÇÃO DO MUNICÍPIO DE SANTANA  
DO LIVRAMENTO - RS / Lissa Almeida.

57 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2017.

"Orientação: Hasan Shihadeh".

1. Bacia do Paraná. 2. Sondagem Elétrica Vertical.  
3. Sistema Aquífero Guarani. 4. Hidrogeologia. I.  
Título.

**LISSA CUNHA DE ALMEIDA**

**CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA DE UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS EM  
UMA PORÇÃO DO MUNICÍPIO DE SANTANA DO LIVRAMENTO – RS.**

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

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 29 de Novembro de 2017.  
Banca examinadora:

---

Prof. Msc. Hasan Lopes Shihadeh  
UNIPAMPA

---

Msc. Marcelo Lusa  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Mario Jesus Tomas Rosales  
UNIPAMPA

Dedico essa dissertação aos meus amados pais, Cláudia e Elson.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço de todo o coração a minha mãe e à memória do meu pai, os meus maiores exemplos de perseverança e amor, que me apoiaram e me deram todo o suporte no começo, meio e fim desta jornada.

Agradeço também:

À minha família e amigos que por mais distante que estivessem se fizeram presentes de coração, com acalento e mensagens positivas. Em especial meus irmãos Carlo e Luara e meus amigos Herbert, Walisson, Layane, Luana e Vanessa.

Aos meus, mais que amigos, “friends”, Jéssica, Larissa, Catarine, Juliana, Rodrigo, Adriano e Pedro pelo convívio, momentos de amizade ao longo da minha graduação, e vai embora...

Aos colegas de turma, Alane, Andréia, Eduardo, Felipe, Rodrigo, Lucas e Marieli, pelo suporte em momentos de dúvidas e parceria nos momentos de confraternização.

À Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, que me proporcionou a oportunidade de estudar em tão prestigiosa instituição e me colocou à disposição de toda sua estrutura, para a finalização desse trabalho de conclusão de curso.

Ao Prof. Dr. Evérton Frigo, pelo assessoramento em questões referentes ao curso e incentivo no prosseguimento dos meus estudos.

Ao Prof. Dr. Osmar Giuliani, por acreditar em meu potencial como aluna e, não menos importante, como pessoa.

Ao Prof. Msc. Hasan Lopes Shihadeh, meu orientador, presente em todas as fases do trabalho, grande incentivador e indagador, sem o qual teria sido impossível a concretização deste trabalho de conclusão de curso.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma na realização desta pesquisa.

“Como dizem os construtores, pedras maiores não se ajeitam sem as menores”

(Platão)

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo a caracterização geofísica de unidades hidrogeológicas das formações Guará e Botucatu pertencentes ao Sistema Aquífero Guarani, maior fonte de abastecimento de água subterrânea do Estado do Rio Grande do Sul. Para aquisição dos dados foi empregado o método de Eletroresistividade com a técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e arranjo Schlumberger. Os estudos foram realizados na zona rural do município de Santana do Livramento. O processo de inversão nos dados de SEV ocorreu através do software IPI2win e possibilitou a obtenção de informações dos valores resistividade em profundidade para cada SEV. Os resultados foram integrados a informações litológicas de poços tubulares de água subterrânea catalogados no SIAGAS-CPRM com o intuito de diminuir possíveis ambiguidades na interpretação dos dados geoeletricos. Três seções geoeletricas foram geradas permitindo correlacionar as unidades de acordo com os patamares de resistividade. Para a seção geoeletrica da linha principal (LP) a zona saturada foi definida e a resistividade nesta camada variou de 38 a 44 (*Ohm.m*). Muito similar ocorreu nas seções geoeletricas das linhas transversais (LT-01 e 02) onde a zona saturada apresenta valores de resistividade que varia de 39 a 87 (*Ohm.m*). Com as informações de resistividade e cota das SEV's presentes neste trabalho construiu-se um mapa de superfície potenciométrica que apresentou um fluxo de água subterrânea orientado a partir das cotas baixas (noroeste) para as cotas baixas (sudeste) já que, de um modo geral, este fluxo está diretamente relacionado com a topografia local. Deste modo, os resultados provenientes desta pesquisa servirão para contribuir com o desenvolvimento de futuras pesquisas hidrogeológicas na porção da área de estudo e adjacências.

**Palavras-chave:** Bacia do Paraná, Sistema Aquífero Guarani, Sondagem Elétrica Vertical, Hidrogeologia.

## ABSTRACT

The present work aims at the geophysical characterization of hydrogeological units of the Guará and Botucatu formations belonging to the Guarani Aquifer System, the largest source of groundwater supply in the State of Rio Grande do Sul. Data acquisition was performed using the Eletroresistivity method with the Vertical Electrical Survey (VES) and Schlumberger arrangement. The studies were carried out in the rural area of the municipality of Santana do Livramento. The inversion process in the VES data occurred through the IPI2win software and made it possible to obtain information of the depth resistivity values for each VES. The results were integrated to lithological information of tubular wells of underground water cataloged in SIAGAS-CPRM in order to reduce possible ambiguities in the interpretation of the geoelectrical data. Three geoelectric sections were generated allowing to correlate the units according to the resistivity levels. For the geoelectric section of the main line (LP) the saturated zone was defined and the resistivity in this layer varied from 38 to 44 (*Ohm.m*). Very similar occurred in the geoelectric sections of the transverse lines (LT-01 and 02) where the saturated zone presents values of resistivity ranging from 39 to 87 (*Ohm.m*). With the information of resistivity and quota of the VES present in this work was constructed a potentiometric surface map that presented a flow of underground water oriented from the high (northwest) quotas for the low (southeast) quotas since, in a general way, this flow is directly related to the local topography. Thus, the results from this research will contribute to the development of future hydrogeological research in the portion of the study area and its surroundings

**Keywords:** Parana Basin, Guarani Aquifer System, Vertical Electrical Sounding, Hydrogeology.

## LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo inserida na zona rural do Município de Santana do Livramento-----	20
Figura 2 - Mapa do contexto geológico da área de estudo. -----	22
Figura 3 - a) Localização da Bacia do Paraná no contexto nacional e b) localização da faixa aflorante do SAG às proximidades da área de estudo. -----	24
Figura 4 - Esquema de eletrodos de corrente (A e B) e eletrodos de medida (M e N) dispostos linearmente e simétricos.-----	27
Figura 5 - Cilindro condutor. -----	28
Figura 6 - Ponto de corrente representando o espalhamento radial das linhas equipotenciais (meio homogêneo). -----	29
Figura 7 - Esquema de disposição dos eletrodos no terreno para execução de Sondagem Elétrica Vertical.-----	31
Figura 8 - Configuração de eletrodos Schlumberger. -----	32
Figura 9 – Distribuição das SEV's (Sistema Universal Transverso de Mercator – UTM – WGS84). -----	36
Figura 10 - Ilustração da etapa de refinamento dos dados adquiridos em campo (a) para os dados refinados (b). -----	37
Figura 11 - Plataforma do software IPI2win (Geoscan-M) onde é apresentado o gráfico bi-logaritmico (a), a tabela de informações do modelo de inversão (b) e circulado em vermelho o valor do RMS. -----	38
Figura 12 - Inversão SEV-01. -----	39
Figura 13 - Inversão SEV-02. -----	40
Figura 14 - Inversão SEV-03. -----	40
Figura 15 - Inversão SEV-04. -----	41
Figura 16 - Inversão SEV-05. -----	41
Figura 17 - Inversão SEV-06. -----	42
Figura 18 – Inversão SEV-07. -----	42
Figura 19 - Seção Geoelétrica elaborada a partir da correlação das SEV's da LP. -	45
Figura 20 - Seção Geoelétrica elaborada a partir das SEV's da LT-01. -----	46
Figura 21 - Seção geoelétrica elaborada a partir das SEV's da LT-02. -----	47
Figura 22 - Mapa Potenciométrico da área de estudo. -----	48
Figura 23 - Perfil Litológico do Poço Cerro da Vigia. -----	55

Figura 24 - Perfil Litológico do Poço Rincão da Roça.-----	56
Figura 25 - Perfil Litológico do Poço Rincão da Vechia.-----	57
Tabela 1 - Parâmetros dos poços próximos a área de estudo.-----	26
Tabela 2 - Valores de resistividade elétrica dos principais tipos de litologias. -----	34
Tabela 3 - Caracterização das curvas de resistividade-----	43
Tabela 4 - Informações de coordenadas e cota dos centros das SEV's (Sistema Universal Transverso de Mercator – UTM – WGS84)-----	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ed. – edição

Fig. – figura

Fm. – Formação

Lat. – Latitude

Long. - Longitude

n. – número

p. – página

v./vol. – volume

BR – Brasil

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

CV – Cerro da Vigia

IP – Polarização induzida

NA – Nível de água

NE – Nível estático

RMS – Erro médio quadrático

RR – Rincão da Roça

RS – Rio Grande do Sul

RV – Rincão da Vechia

SAG – Sistema Aquífero Guarani

SEV – Sondagem Elétrica Vertical

SI – Sistema Internacional

SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

UTM – Sistema Universal Transverso de Mercator

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Omega$  – Ohm

S – Siemens

$\rho$  – Resistividade elétrica

$\sigma$  – Condutividade elétrica

r – Raio da semicircunferência

$\pi$  – Pi

$\Delta V$  – Diferença de Potencial

k – Coeficiente geométrico

$\phi$  – Porosidade da rocha

I – Corrente elétrica

V – Potencial elétrico

w - Água

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
2.1	Geral.....	18
2.2	Específicos.....	19
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>GEOLOGIA .....</b>	<b>21</b>
5.1	Bacia do Paraná .....	21
5.1.1	Formação Botucatu .....	22
5.1.2	Formação Guará.....	23
5.2	Hidrogeologia.....	23
5.2.1	Unidade Hidroestratigráfica Botucatu .....	24
5.2.2	Unidade Hidroestratigráfica Guará .....	25
5.3	Poços tubulares .....	25
<b>6</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>26</b>
6.1	Método da Eletrorresistividade .....	26
6.1.1	Princípios físicos do método .....	26
6.1.2	A técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) .....	30
6.1.3	Arranjo Schlumberger .....	31
6.1.4	Resistividade elétrica das rochas .....	33
6.2	Inversão Geofísica .....	34
<b>7</b>	<b>AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS .....</b>	<b>35</b>
7.1	Aquisição de dados.....	35
7.2	Tratamento dos dados .....	37
<b>8</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>39</b>
8.1	Inversão SEV .....	39
8.2	Seções Geométricas.....	44
8.3	Superfície Potencioétrica .....	48
<b>9</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>49</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>50</b>

<b>APÊNDICE A – Informações do centro das SEV's .....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO A – Perfil Litológico dos Poços Tubulares do SIAGAS.....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os arenitos predominantemente eólicos do Mesozóico da Bacia do Paraná adquiriram notoriedade e importância econômica e social em virtude da definição do Sistema Aquífero Guarani (SAG). Estes arenitos estendem-se por mais de um milhão de quilômetros quadrados, alcançando espessuras próximas de 800 metros, dentro de um arcabouço estrutural muito apropriado para a formação de aquíferos (SOARES *et.al*, 2009).

Em um sistema geológico, a natureza e a distribuição de aquíferos e aquíferos são controladas pela litologia, estratigrafia e estrutura das formações geológicas (CPRM, 2000). Em razão disso, a geofísica é utilizada em estudos hidrogeológicos como um método auxiliar capaz de fornecer informações quanto as propriedades físicas das formações rochosas em subsuperfície. Desta maneira, é possível caracterizar unidades geológicas e estruturas favoráveis ao acúmulo e circulação do bem procurado.

A caracterização hidrogeológica de uma determinada área é de relevante importância, pois atua como instrumento capaz de prover soluções para os problemas de suprimento hídrico e de controle de poluição, inerentes às atividades humanas, além de contribuir com a estimativa das reservas de um aquífero e dinâmica dos fluxos da água subterrânea.

Nessas condições qualquer método geofísico capaz de informar satisfatoriamente sobre os aspectos supracitados pode ser útil na pesquisa hidrogeológica (CPRM, 2000). Em função de suas composições mineralógicas, textura e disposições, as rochas apresentam propriedades elétricas características (resistividade, constante dielétrica, etc.) que variam de acordo com parâmetros, como porosidade e saturação das rochas em subsuperfície. Portanto, os métodos elétricos destacam-se por apresentar um maior contraste de propriedade física para este tipo de estudo.

O método de resistividade elétrica encontrou grande sucesso na hidrogeologia, por possuir boa resolução na definição das geometrias estruturais dos aquíferos e qualidade de suas águas, além de possibilitar a determinação da quantidade de argilas e a variabilidade espacial de propriedades hidráulicas dos recursos subterrâneos (WARD, 1990; LIMA & SIRI NIWAS, 2000).

Estes métodos vêm apresentando cada vez mais aplicabilidade no cenário de exploração dos recursos hídricos, buscando entender os fatores que influenciam o comportamento de diferentes aquíferos em diferentes contextos geológicos. Tal método mostrou-se satisfatório em diversos estudos de caso, tais como, delimitação de topo e espessura de unidades hidrogeológicas (CUTRIM *et al.*, 2005), locação de poços tubulares para captação de água subterrânea (CUTRIM *et al.*, 2014), distribuição espacial de salinidade da água subterrânea (SAINATO *et al.*, 2006) e até mesmo a influência de estruturas no fluxo da água subterrânea (ELIS *et al.*, 2004).

A grande problemática relacionada ao desenvolvimento e ampliação da captação e uso de recursos hídricos subterrâneos no Estado do Rio Grande do Sul para diversos fins, reside no desconhecimento da estruturação dos sistemas aquíferos e de suas potencialidades (MACHADO, 2005). Sendo assim, este trabalho propõe a caracterização geofísica de unidades hidrogeológicas pertencentes às formações Guará e Botucatu (inseridas na Bacia do Paraná), situadas em uma área rural do Município de Santana do Livramento – RS. Para isso, a técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) foi aplicada com o intuito de integrar os modelos geoeletricos obtidos às informações geológicas de poços tubulares existentes na região, de domínio do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS/CPRM), a fim de corroborar com o conhecimento hidrogeológico da região.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Este trabalho tem como objetivo a caracterização geofísica das unidades hidrogeológicas das formações Guará e Botucatu, em uma área rural do Município de Santana do Livramento – RS, através da técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e correlacionar com dados de perfis litológicos de poços tubulares da região, a fim de subsidiar pesquisas hidrogeológicas na área.

## **2.2 Específicos**

- Caracterizar a partir de métodos geofísicos os parâmetros geométricos (profundidade e espessura) de unidades hidrogeológicas das formações Guará e Botucatu, em uma região do município de Santana do Livramento – RS.
- Estimar a direção de fluxo subterrâneo através da elaboração do mapa potenciométrico da área de estudo.

## **3 JUSTIFICATIVA**

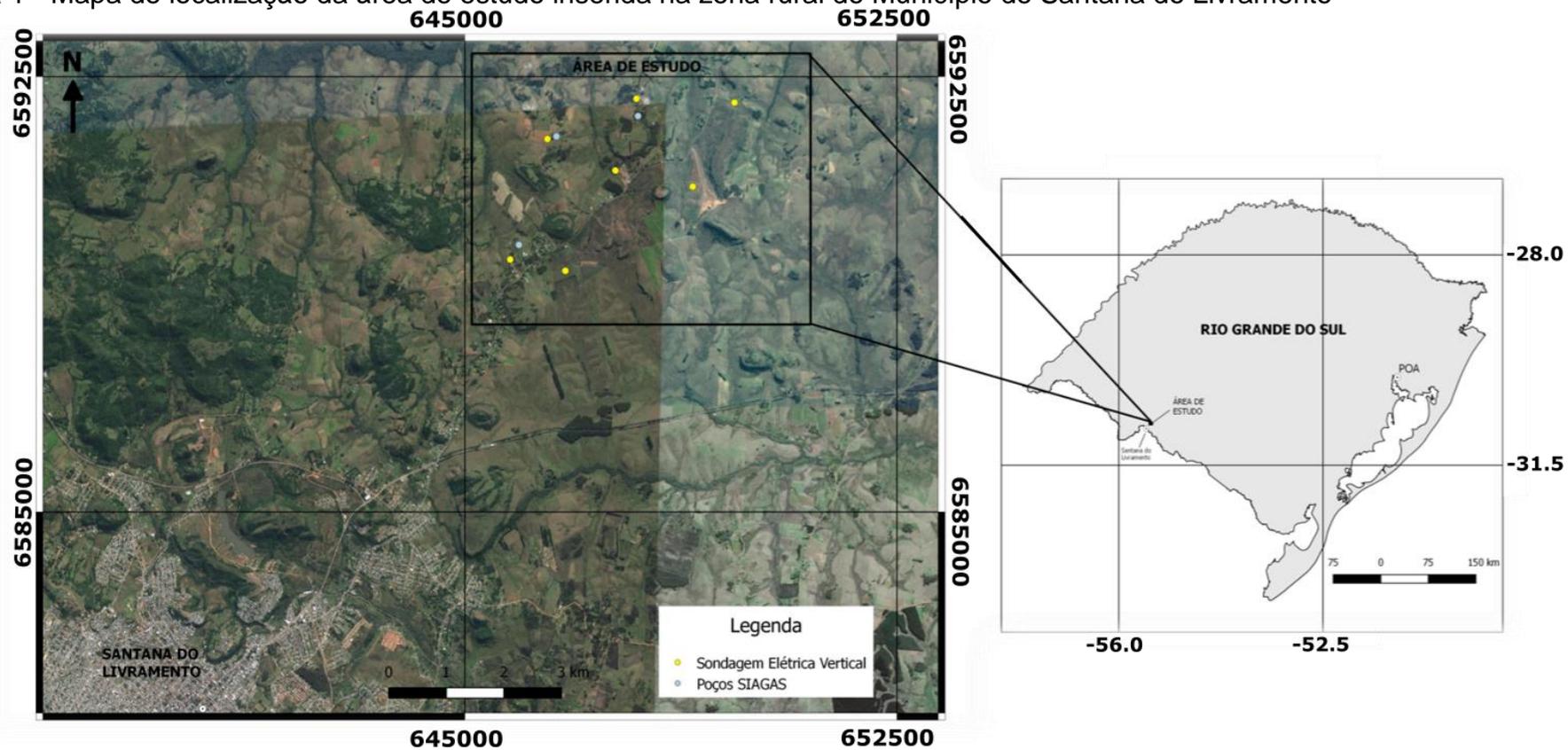
A pesquisa hidrogeológica envolvendo a estimativa de parâmetros geométricos (profundidade e espessura) é fundamental para diversos tipos de estudos hidrogeológicos, tais como: estimativa de reservas de água, avaliação de vulnerabilidade de aquíferos, formulação de modelos hidrogeológicos e elaboração de projeto de construção de poços tubulares. Como ferramenta para este tipo de pesquisa, os métodos geofísicos contribuem de maneira indireta na detecção, quantificação e também na determinação de parâmetros hidrogeológicos.

Devido à importância das águas subterrâneas (abastecimento da população, indústrias e propriedades rurais), o contexto geológico e a ausência de levantamentos geofísicos na área de estudo, verificou-se a necessidade da estimativa dos parâmetros geométricos (profundidade e espessura) e elaboração do mapa potenciométrico e direção de fluxo da água subterrânea a fim de corroborar com o conhecimento hidrogeológico da região.

## **4 ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo está localizada na região sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, inserida nas imediações do Município de Santana do Livramento (Fig. 1). A sede municipal tem coordenadas geográficas zona 21J UTM 6581574 de latitude sul e 640237 de longitude leste. O Município de Santana do Livramento está a 493 km sudoeste de Porto Alegre, e tem acesso através das rodovias federais: BR 116, BR 290 e BR 158, respectivamente.

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo inserida na zona rural do Município de Santana do Livramento



Fonte: Adaptado de Google Earth /CPRM, 2000.

## 5 GEOLOGIA

### 5.1 Bacia do Paraná

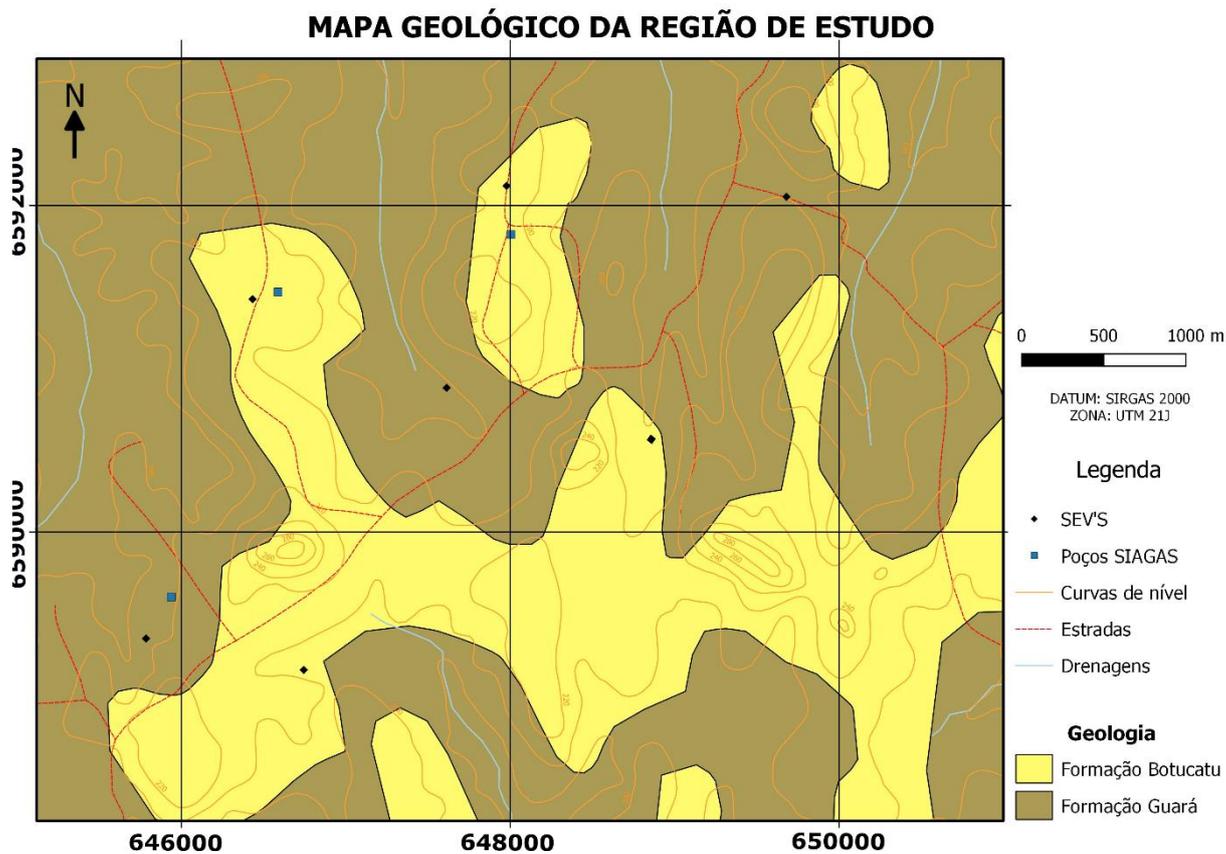
A Bacia do Paraná compreende uma extensa e espessa sucessão sedimentar-magmática depositada na placa sul-americana durante o Neo-ordoviciano ao Neocretáceo, sob condição intracontinental, em ambiente cratônico (MILANI *et al.*, 2007). E hoje abrange uma área total que ultrapassa 1.500.000 quilômetros quadrados, englobando porções do Brasil meridional, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai.

A Bacia do Paraná apresenta uma vasta gama de recursos naturais (água subterrânea, carvão mineral, petróleo, entre outros) explorados desde o tempo do Brasil Império. A importância econômica culminou em uma série de estudos científicos desde os trabalhos pioneiros de Derby (1895) e White (1908).

Estratigraficamente, a Bacia do Paraná é subdividida por Milani (1997) em seis Supersequências: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo), separadas entre si por discordâncias interregionais.

Na área de estudo, ocorrem rochas pertencentes à Supersequência Gondwana III, reunidas litoestratigraficamente na Formação Guará, composta por arenitos finos, subordinadamente conglomeráticos, de sistema fluvio-eólico e a Formação Botucatu (Fig. 2), composta por arenitos eólicos, registro do extenso “deserto Botucatu”.

Figura 2 - Mapa do contexto geológico da área de estudo.



Fonte: Adaptado de CPRM (2000).

### 5.1.1 Formação Botucatu

Os arenitos eólicos da Formação Botucatu, assim como as formações Guarani (Fig. 4), Caturrita e Pirambóia sotopostas, configuram depósitos essencialmente continentais, incluindo sistemas fluviais e eólicos (SOARES *et al.*, 2009). Esta formação é constituída principalmente por arenitos quartzosos de granulação fina a média, de coloração vermelha, rósea ou amarelo-clara, bem selecionados.

A Formação Botucatu apresenta espessura bastante variada no Rio Grande do Sul, chegando até 100 m, dada uma sequência de derrames de lava que conserva a duna previamente ativa, por vezes preservando sua morfologia (SCHERER, 1998; SCHERER, 2000; HOLZ *et al.*, 2008), caracterizando o final da deposição da Formação Botucatu como contemporânea ao início do vulcanismo da Formação Serra Geral, em cerca de 139 Ma (RENNE *et al.*, 1992).

### 5.1.2 Formação Guará

É descrita por Scherer & Lavina (1997) como uma sucessão de arenitos finos a conglomeráticos, de cores esbranquiçadas a avermelhadas, com estratificações cruzadas de pequeno a grande porte e laminação plano paralela, intercalados ocasionalmente com níveis centimétricos de pelitos, representando ambientes eólicos e fluviais.

Especificamente na região de Santana do Livramento a granulometria dos sedimentos desta formação tende a diminuir, predominando, portanto, arenitos finos com estratificação cruzada de grande porte. A unidade é interpretada como depósito de um sistema eólico úmido, com dunas e lençóis de areia (SOARES, *et.al*, 2009).

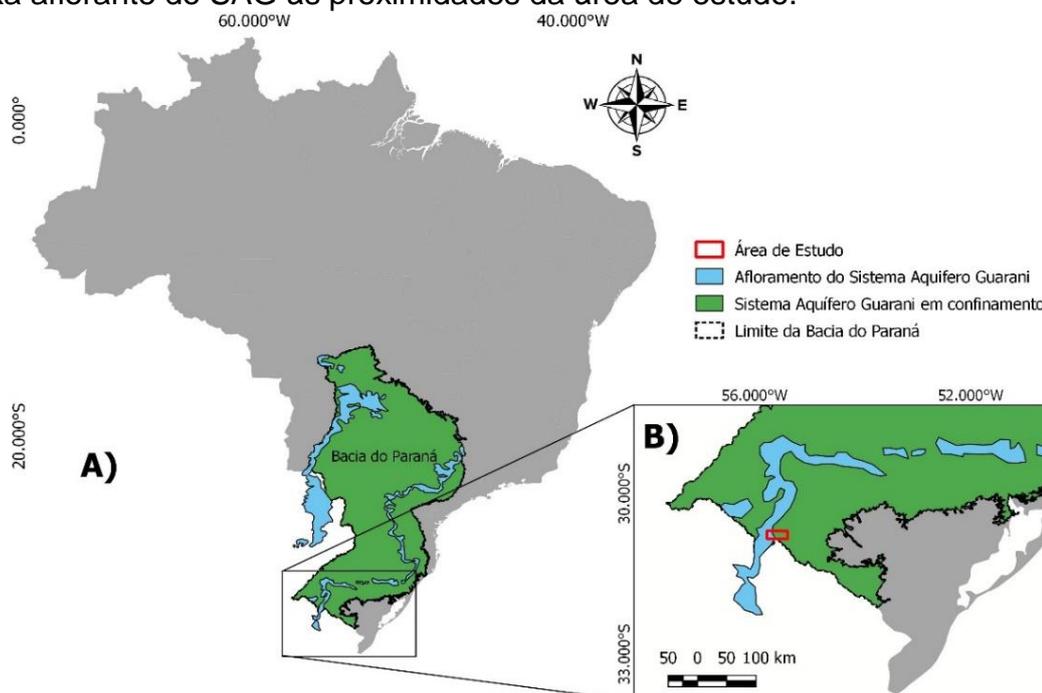
## 5.2 Hidrogeologia

A hidrogeologia da área de estudo compreende o Sistema Aquífero Guarani (SAG). O mesmo engloba litologias arenosas representativas do final da deposição permiana na Bacia do Paraná, culminando com a sedimentação eólica eocretácea (MACHADO, 2005).

Segundo CPRM (2012), o SAG ocupa aproximadamente 55% da área do Rio Grande do Sul sendo a principal reserva de água subterrânea do estado. Esse sistema aquífero é constituído por arenitos eólicos bem selecionados, com espessura média de 100 m. A área aflorante do sistema é menor que 10% (Fig. 3), estando o restante confinado por espessos derrames vulcânicos.

No Rio Grande do Sul o Sistema Aquífero Guarani – SAG reúne as unidades hidroestratigráficas Botucatu, Guará, Arenito Mata, Caturrita, Alemoa, Passo das Tropas, Sanga do Cabral e Pirambóia (CPRM, 2012). A caracterização das unidades hidroestratigráficas, essencialmente Guará e Botucatu que incorporam o SAG na área de estudo, constitui o propósito principal deste trabalho.

Figura 3 - a) Localização da Bacia do Paraná no contexto nacional e b) localização da faixa aflorante do SAG às proximidades da área de estudo.



Fonte: Adaptado de CPRM (2000).

### 5.2.1 Unidade Hidroestratigráfica Botucatu

Esta unidade hidroestratigráfica engloba o que Hausman (1995) denomina de Sub-Província Botucatu, compreendendo todos os afloramentos contínuos de Arenito Botucatu ao longo do contato com o Grupo Rosário do Sul, estendendo-se abaixo dos derrames da Formação Serra Geral.

A ocorrência da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu no estado está longe de ser homogênea quanto à litologia e dimensões, pois desde a região da fronteira oeste até o litoral, ela por vezes mantém espessuras que variam entre 50 e 100 m, que logo chegam à completa ausência como na região entre Venâncio Aires e Estrela (MACHADO, 2005).

A litologia nas regiões em que o aquífero está confinado, como na *cuesta* basáltica da fronteira uruguaio-argentina, apresenta-se muito porosa e com grande homogeneidade granulométrica. Os poços para a utilização na irrigação apresentam capacidades específicas que variam de 5,14 a 10,55 m<sup>3</sup>/h/m, para um tempo de bombeamento de 24 horas, quando bem construídos e completados (MACHADO, 2005).

### 5.2.2 Unidade Hidroestratigráfica Guará

É possivelmente uma das mais importantes unidades hidroestratigráficas que compoem o SAG, estando inserida nas Sub-Províncias da *Cuesta* e Botucatu (HAUSMAN, 1995), na região da fronteira oeste do Rio Grande do Sul. Permanece ainda com lacunas de conhecimento de suas características litológicas, pois somente nos últimos anos foi reconhecida como uma nova unidade litoestratigráfica (SCHERER & LAVINA, 1997).

Trata-se de um espesso pacote sedimentar flvio-eólico, que ocorre na base dos arenitos eólicos da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu, atingindo valores máximos de 200 m de espessura. Nas áreas aflorantes, onde está afetada por intensa erosão, sua espessura varia em média 100 m (MACHADO, 2005).

O contato discordante com a Formao Botucatu, sua equivalência  Formao Tacuarembó no Uruguai e a inversão no sentido das paleocorrentes dos depósitos fluviais, indicam que provavelmente sua sedimentao tenha ocorrido no final do Jurássico (SCHULTZ *et al.*, 2002). A sua área de ocorrência começa no município de Jaguari e finaliza em Santana do Livramento (na porão brasileira).

No município de Santana do Livramento, essa unidade hidroestratigráfica é captada por poços tubulares. De modo geral, os poços da área urbana captam quase exclusivamente a Unidade Hidroestratigráfica Guará e, apenas em raros casos, perfuram a base dos arenitos eólicos da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu. As capacidades específicas nos poços variam entre 0,90 e 6,23 m<sup>3</sup>/h/m e as vazões de captao alcançam a 100 m<sup>3</sup>/h (MACHADO, 2005).

### 5.3 Poços tubulares

Informaes de poços representam um importante registro da litologia do município de Santana do Livramento. Ao todo, três poços foram identificados na região de estudo. Para tanto o processo de identificao destes poços foi realizado através do projeto SIAGAS (<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>). Informaes como coordenadas, cota, nível esttico (NE) e descrio litológica são disponibilizadas em fichas técnicas na plataforma do SIAGAS. Estas informaes estão apresentadas na Tabela 1 e serão implementadas na integrao dos dados.

Tabela 1 - Parâmetros dos poços próximos a área de estudo.

Poço	Lat. (UTM)	Long. (UTM)	Cota (m)	NE (m)	Perfil Litológico (m)
Cerro da Vigia (CV)	645937	6589444	216	25	0 a 100 m - Arenito médio quartzoso (Fm. Botucatu)
Rincão da Roça (RR)	648000	6592000	203	10	0 a 8 m – Arenito médio (Fm. Botucatu)
Rincão da Vechia (RV)	646588	6591470	236	Não definido	0 a 1 m - Solo arenoso 1 a 9 m – Arenito médio 9 a 20 m – Areia Siltosa 20 a 31 m – Arenito Siltoso (Fm. Guará)

Fonte: Retirado de SIAGAS (2008) - (<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>).

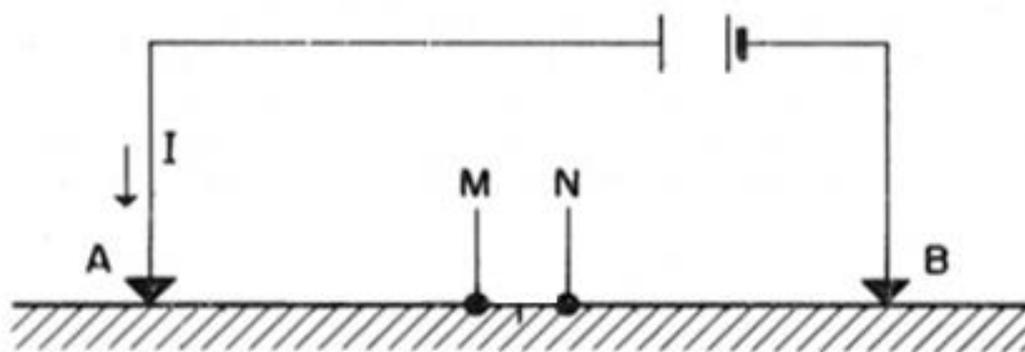
## 6 METODOLOGIA

### 6.1 Método da Eletrorresistividade

#### 6.1.1 Princípios físicos do método

Este método tem como objetivo mapear a distribuição da resistividade elétrica nas camadas em subsuperfície. Para tanto o método da eletrorresistividade implica na aplicação de corrente elétrica (Fig. 4) gerada por uma fonte artificial, que é introduzida ao solo através de eletrodos pontuais (A e B) com o intuito de medir em superfície (M e N) a diferença de potencial gerada na vizinhança em que a corrente flui. De acordo com o potencial medido é possível determinar valores de resistividade elétrica em subsuperfície e associá-los à geologia ou variações na composição litológicas como presença de água, fraturas, mineralogia, etc.

Figura 4 - Esquema de eletrodos de corrente (A e B) e eletrodos de medida (M e N) dispostos linearmente e simétricos.



Fonte: Modificado de Orellana, 1972.

O cientista alemão Georg Simon Ohm estabeleceu em 1827 que a corrente elétrica  $I$  em um fio condutor é proporcional a diferença de potencial  $V$  através dele. A relação linear é expressa pela equação

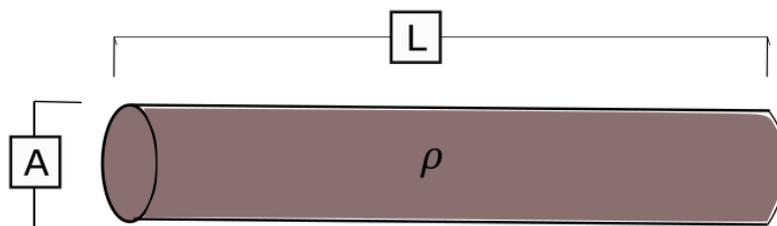
$$V = RI \quad (1)$$

Onde  $R$  é a resistência do condutor. A unidade de resistência é o Ohm ( $\Omega$ ). O inverso da resistência é condutância de um circuito; sua unidade é o inverso do ohm, variadamente chamada de mho ou Siemens ( $S$ ).

Observações experimentais em diferentes fios do mesmo material mostraram que fios longos tem maiores resistências em relação a fios curtos, e fios finos possuem maiores resistências em relações a fios mais espessos. Formulando mais precisamente, para um dado material a resistência é proporcional ao comprimento  $L$  do material e inversamente proporcional à área seccionada  $A$  do condutor (Fig. 5). Essas relações são expressas na equação

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2)$$

Figura 5 - Cilindro condutor.



Fonte: Adaptado de Lowrie, 2007.

A constante proporcional  $\rho$  é a resistividade elétrica de um condutor. A resistividade elétrica é uma característica intrínseca do material que expressa a dificuldade que um determinado material impõe à passagem de uma dada corrente elétrica.

Se substituirmos o  $R$  da Eq. (2) na Eq. (1) e rearranjarmos os termos chegaremos a seguinte expressão

$$\rho = \frac{V}{I} \left( \frac{A}{L} \right) \quad (3)$$

A resistividade elétrica é designada por ( $\rho$ ) e sua unidade no Sistema Internacional (SI) é ( $\Omega\text{m}$ ). Em contrapartida a esta propriedade resulta o conceito da condutividade elétrica, que é a facilidade com que a corrente elétrica atravessa determinados materiais. A condutividade ( $\sigma$ ) dada em S/m, é matematicamente expressa como o inverso da resistividade, sendo a relação entre elas

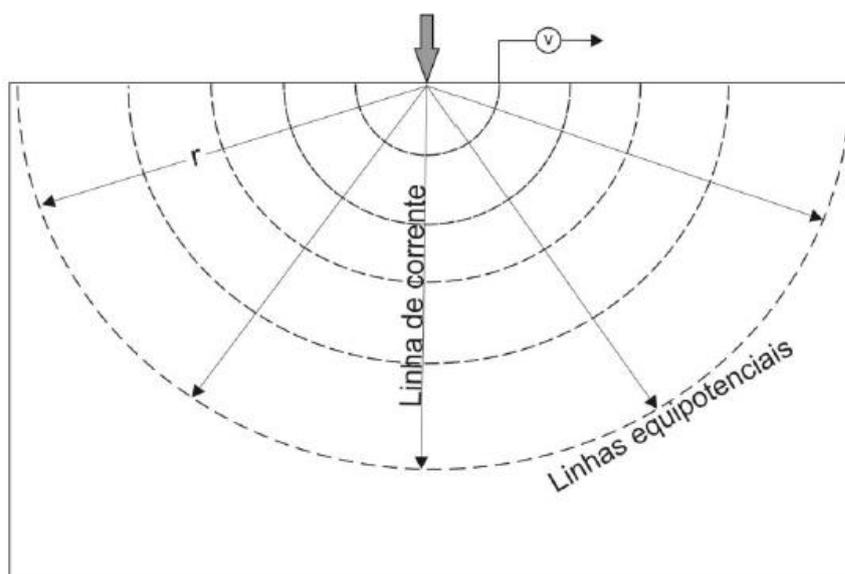
$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

A Eq. (3) expressa o caso linear, ou seja, a corrente é analisada em apenas uma direção. No entanto, quando se fixa um eletrodo no solo para a injeção de corrente ela se espalha de modo radial (Fig 6). Sendo assim, a expressão que relaciona a resistividade ( $\rho$ ) com o potencial elétrico é deduzida, assumindo-se o modelo de um semiespaço condutor com a fonte na superfície (TELFORD &

SHERIFF, 1990). Sendo representada pela Eq. (5), onde  $r$  é a distância da fonte ao ponto de medida do potencial

$$V(r) = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (5)$$

Figura 6 - Ponto de corrente representando o espalhamento radial das linhas equipotenciais (meio homogêneo).



Fonte: Modificado de Parasnis (1986).

Deste modo, mede-se a diferença de potencial ( $\Delta V_{MN}$ ) entre dois pontos M e N, sendo adotada para A (entrada) um sinal positivo e B (saída) um sinal negativo, conforme ilustra a Fig. 9. Os potenciais em M e N podem ser representados pelas expressões (6) e (7).

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi AM} - \frac{\rho I}{2\pi BM} = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (6)$$

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi AN} - \frac{\rho I}{2\pi BN} = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (7)$$

A diferença de potencial entre os pontos M e N resulta,

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N \quad (8)$$

$$\Delta V_{MN} = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (9)$$

Esta expressão pode ser rearranjada para obtermos o valor da resistividade em função dos demais parâmetros.

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V_{MN}}{I} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (10)$$

$$\rho = k \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (11)$$

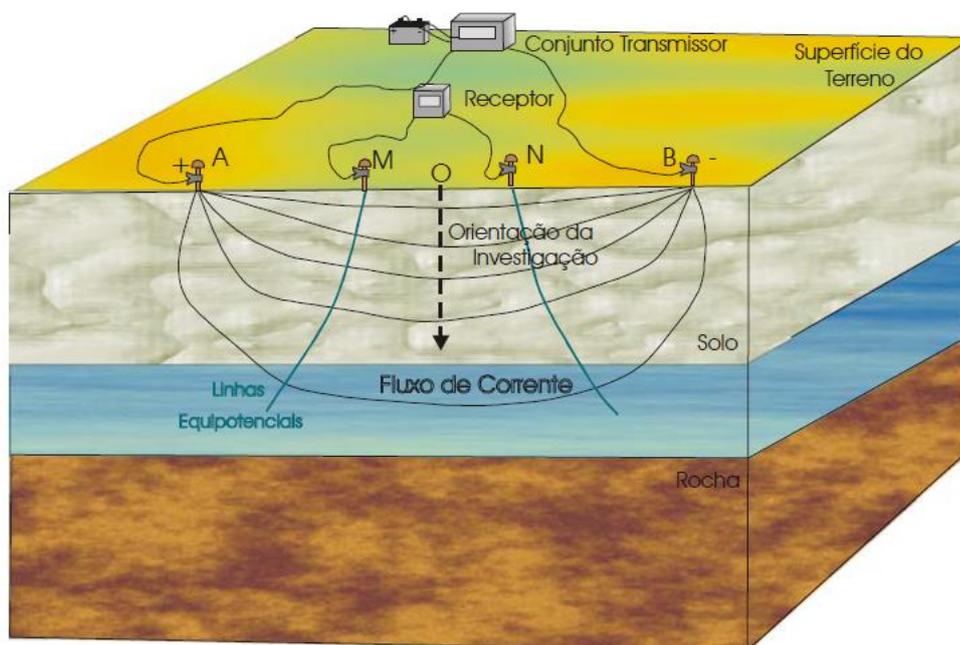
Onde k é conhecido como fator geométrico e é determinado de acordo com a arranjo escolhido no momento da aplicação do método.

### 6.1.2 A técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

A Sondagem Elétrica Vertical (SEV), é uma técnica que permite identificar a variação vertical de resistividade. Esta técnica foi escolhida levando em consideração a estrutura geral da área representada por sequências litológicas sedimentares que variam em porosidade e saturação à medida que a profundidade aumenta. Portanto, adotou-se a hipótese de que dentro da extensão de uma única SEV as variações de resistividade seriam, em geral, predominantemente verticais.

A técnica de SEV é usada principalmente em estudos de interfaces horizontais ou sub-horizontais (KEAREY, 2009). Os eletrodos de corrente (A e B) e de potencial (M e N) são mantidos em um mesmo espaçamento relativo enquanto o todo o arranjo é progressivamente expandido ao redor de um ponto fixo central (Fig. 7). Consequentemente, leituras são tomadas à medida que a corrente atinge maiores profundidades.

Figura 7 - Esquema de disposição dos eletrodos no terreno para execução de Sondagem Elétrica Vertical.



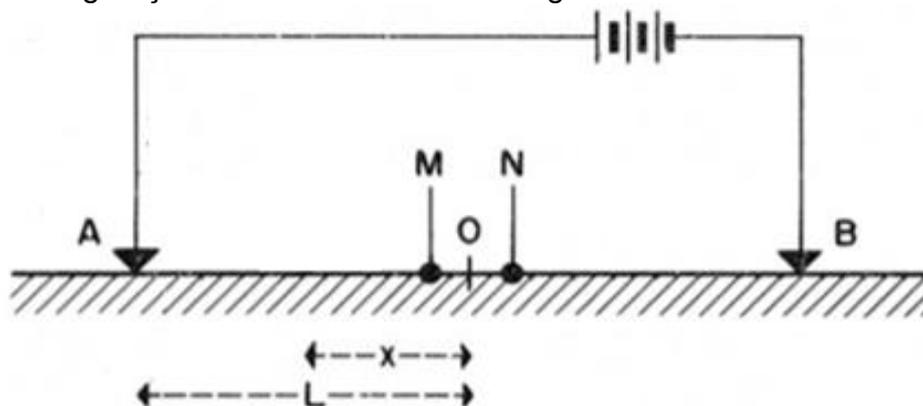
Fonte: Modificado de Oliva (2002).

### 6.1.3 Arranjo Schlumberger

Nesta configuração os quatro eletrodos estão dispostos em linha, sendo que apenas os eletrodos de corrente são movidos ao longo do levantamento. Neste arranjo os eletrodos de potencial (M e N) são posicionados entre os eletrodos de corrente (A e B) e distribuídos simetricamente em relação a um ponto central (Fig. 8), sendo que a distância de MN deve ser menor que a distância  $AB/2$ .

A configuração Schlumberger é comumente empregada em Sondagens Elétricas Verticais (SEV's). Dentre as vantagens deste arranjo estão a boa resolução vertical, a praticidade em campo e a grande quantidade de aplicativos para inversões disponíveis. Estas características tornam o arranjo Schlumberger ideal para SEVs (FILHO, 2003).

Figura 8 - Configuração de eletrodos Schlumberger.



Fonte: Modificado de Orellana (1972).

Com as informações de valores da corrente injetada, a diferença de potencial entre os eletrodos M e N, e o fator geométrico (função da distância entre os pontos de injeção de corrente e de medida de potencial) determina-se a resistividade aparente do meio ( $\rho_a$ ), através da Eq. (12) apresentada em Bhattacharya & Patra (1986):

$$\rho_a = \left( \frac{\Delta V_{MN}}{I} \right) k \quad (12)$$

Onde k é expresso, para esta configuração, pela Eq. (13)

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{BM}} - \frac{1}{\overline{AN}} + \frac{1}{\overline{BN}}} \quad (13)$$

$\overline{AM}$  = distância entre os eletrodos A e M;

$\overline{BM}$  = distância entre os eletrodos B e M;

$\overline{AN}$  = distância entre os eletrodos A e N;

$\overline{BN}$  = distância entre os eletrodos B e N.

Quanto maior for a distância dos eletrodos de corrente (A e B) maior será a profundidade investigada, consequência do comportamento radial da corrente. Entretanto para grandes afastamentos dos eletrodos de corrente (A e B) pode ser necessário o aumento entre a distância dos eletrodos de potencial (M e N) para que seja mantido um potencial mensurável.

#### 6.1.4 Resistividade elétrica das rochas

A resistividade elétrica aparente é a propriedade física da rocha medida nos métodos elétricos. Ela leva em consideração a heterogeneidade do meio estudado, já que os valores de área e comprimento já não podem ser definidos *a priori* porque dependem da geometria do arranjo dos eletrodos no terreno. A resistividade medida desta forma não será mais a resistividade de uma rocha ou de uma camada e sim uma resistividade média do pacote de rochas (incluído o solo). Esta reflete apenas as propriedades médias do meio pela qual a corrente passou.

Os valores de resistividade elétrica na rocha além de influenciados pela proporção de minerais metálicos, permeabilidade, são basicamente controlados pela condução da corrente elétrica em meio aquoso (condução eletrolítica), através dos poros das rochas, falhas, fraturas ou zonas de cisalhamento. Neste processo de condução eletrolítica os agentes de transporte das cargas elétricas são íons oriundos da dissociação de sais. A salinidade da água de formação é então um fator que influencia a resistividade da rocha. Uma maior quantidade de íons dissolvidos representa uma maior capacidade de conduzir a corrente elétrica (condutividade).

Existem ainda outros fatores importantes no que diz respeito as propriedades elétricas do meio, com destaque para a porosidade, argilosidade e saturação. À exemplo os sedimentos saturados apresentam resistividades elétricas menores em relação aos sedimentos não saturados, ou seja, a condução eletrolítica facilita a passagem da corrente elétrica nestas rochas. Enquanto as argilas são menos resistivas do que areia e cascalhos, o que é resultado dos minerais constituintes das argilas que são mais condutivos.

O efeito da porosidade na resistividade das rochas foi bastante estudado por Archie na primeira metade do século passado, resultando em uma fórmula bastante conhecida que relaciona as resistividades das rochas ( $\rho_r$ ) com a da água de formação ( $\rho_w$ ), a saturação em água ( $S_w$ ) e a porosidade ( $\phi$ ) da seguinte forma:

$$\rho_r = a\rho_w\phi^{-m}S_w^{-n} \quad (14)$$

Onde  $a$ ,  $m$  e  $n$  são constantes. A partir da Eq. (14) é possível observar que a porosidade e resistividade da rocha são inversamente proporcionais. O mesmo acontece com saturação e resistividade da rocha (ARCHIE, 1942).

As variações mais frequentes, nos valores de resistividade para alguns tipos de rochas e sedimentos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de resistividade elétrica dos principais tipos de litologias.

TIPO LITOLÓGICO	RESISTIVIDADE ( $\Omega m$ )
<b>Rochas:</b>	
Quartzito	$10^3$ a $10^5$
Basalto	$10$ a $10^5$
Basalto fraturado	$1$ a $10^2$
Granito	$500$ a $5 \times 10^4$
Granito alterado	$1$ a $10^2$
Calcário	$10$ a $10^4$
Arenito	$1$ a $10^3$
Grafita Xisto	$10^{-1}$ a $50$
<b>Solos:</b>	
Cascalho	$10^2$ a $10^4$
Aluvião	$1$ a $10^3$
Argila	$1$ a $10^2$

Fonte: Modificado de Lowrie (2007).

O comportamento elétrico e o contraste entre as resistividades das rochas, dos sedimentos e dos minerais, viabilizam a utilização dos métodos elétricos como forma de investigação geológica, geotécnica, prospecção mineral, hidrogeológica e ambiental.

## 6.2 Inversão Geofísica

A inversão de dados geofísicos é uma ferramenta fundamental para a interpretação e compreensão da estrutura da Terra. Esta técnica permite que hipóteses sobre as características geológicas de subsuperfície sejam inferidas e então comparadas com os dados observados, com isso é possível gerar modelos mais próximos da realidade, mesmo que mais de um modelo possa se adequar aos dados observados.

A inversão de dados geofísicos é a técnica mais utilizada para a interpretação dos dados de campo e para a simulação da resposta que determinado método apresenta sobre uma área. Ao contrário do modelo direto, na inversão há um processo computacional iterativo, no qual só é necessário modificar os parâmetros de inversão para conseguir o melhor resultado.

O modelo inverso parte dos dados observados e estima-se o modelo de Terra, empregando-se uma relação teórica que varia o modelo de camadas que melhor se ajusta aos dados de campo. No caso dos métodos elétricos o objetivo é estimar a estrutura geoeletricas de subsuperfície (distribuição da resistividade em função da profundidade).

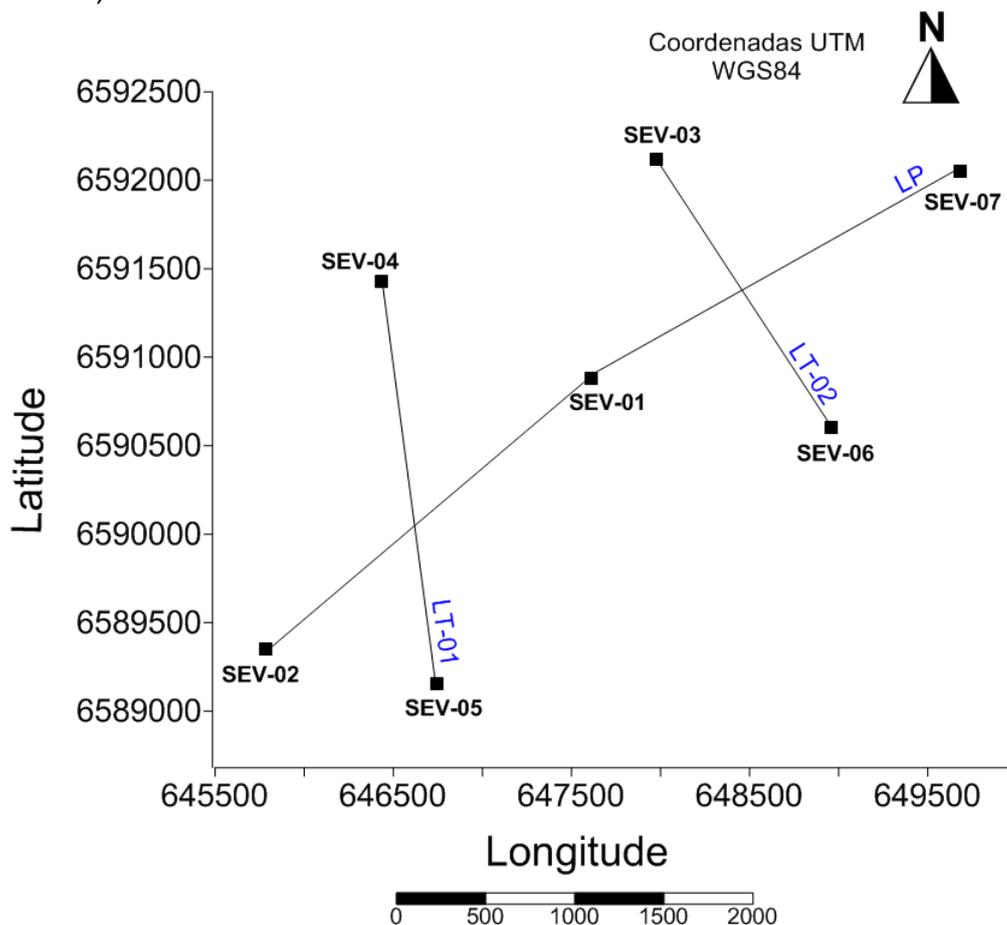
A inversão propriamente dita, consiste em obter um conjunto de parâmetros que propiciam o ajuste aos dados medidos e, ao mesmo tempo, satisfaz vínculos geológicos eventualmente disponíveis. Na inversão de um modelo 1D, os parâmetros desconhecidos a serem obtidos são: número de camadas, espessura das camadas, e resistividade elétrica das camadas e do embasamento geoeletrico (BORTOLOZO, 2011).

## **7 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS**

### **7.1 Aquisição de dados**

Foram realizadas sete SEV's utilizando o arranjo de eletrodos Schlumberger expandido a um espaçamento máximo de  $AB/2$  igual a 350 metros. Os centros das sondagens foram selecionados ao longo de uma linha principal (LP) e duas transversais (LT-01/02), distribuídos de forma mais ou menos regular sobre a área de estudo (Fig. 9).

Figura 9 – Distribuição das SEV's (Sistema Universal Transverso de Mercator – UTM – WGS84).



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

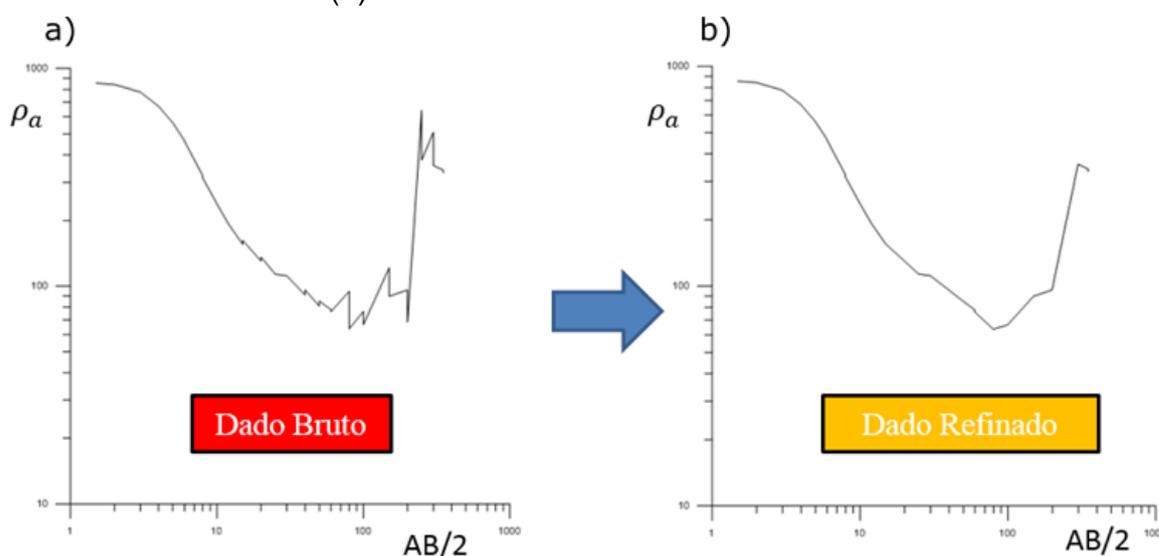
O equipamento utilizado para a aquisição de dados foi o eletrorresistivímetro SYSCAL PRO fabricado pela *IRIS Instrument Inc.* pertencente ao laboratório de geociências da UNIPAMPA. Este sistema possui uma fonte de 250W de energia elétrica e é alimentado por uma bateria de 12 V acoplados a conversores DC-DC capazes de produzir uma tensão de saída máxima de 800 V.

Os valores de coordenadas e informações de cota altimétrica de cada centro da SEV que foram medidas com auxílio do GPS Etrex 30 e são apresentadas no **APÊNDICE A**.

## 7.2 Tratamento dos dados

O tratamento de dados ocorreu em duas etapas: a análise dos dados brutos (refinamento) e o processamento dos dados (inversão/interpolação). Na primeira etapa o dado adquirido é transferido, de forma manual à uma planilha para que assim possa ser plotado. Então, constrói-se um gráfico (log-log) de resistividade aparente por  $AB/2$  para a visualização dos dados (Fig. 10a). Através desse gráfico é possível observar a tendência dos dados e corrigir os valores anômalos (Fig. 10b).

Figura 10 - Ilustração da etapa de refinamento dos dados adquiridos em campo (a) para os dados refinados (b).



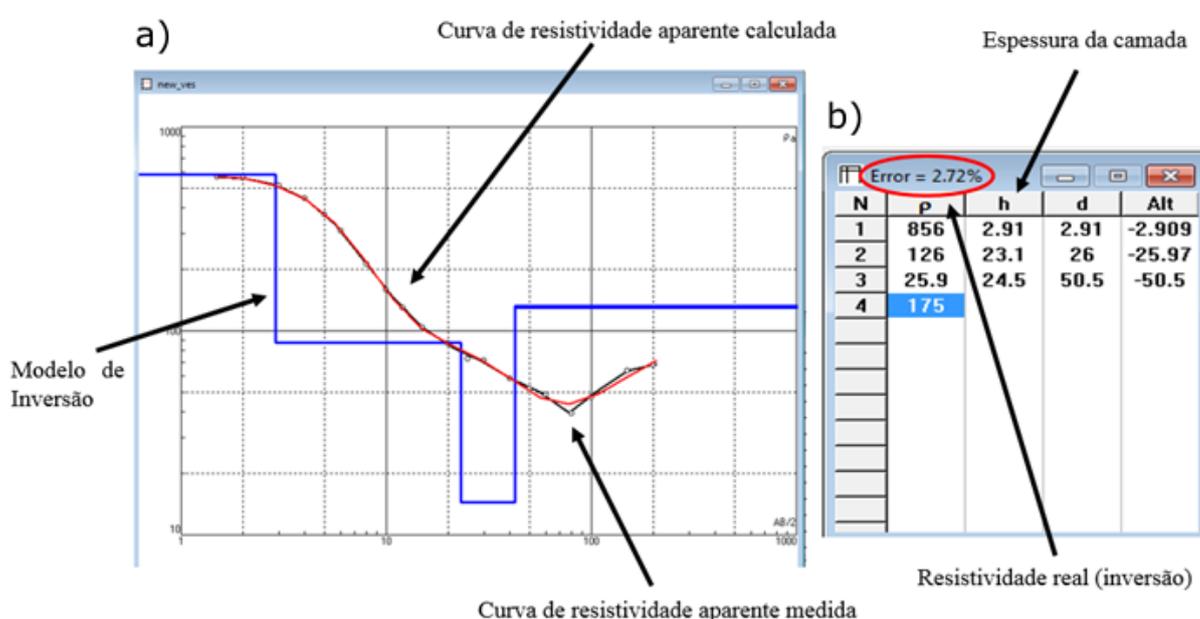
Fonte: Elaborado pela autora (2017).

A segunda etapa consiste no processamento dos dados por meio da inversão. A planilha gerada após o refinamento dos dados é inserida no software de inversão. O software utilizado na inversão dos dados é o IPI2win (Geoscan-M Ltda). O IPI2Win é projetado para realizar inversões 1D automáticas em dados de SEVs e/ou polarização induzida (IP), e as curvas de dados geradas (Fig. 11a) são interpretadas ao longo de um único perfil sem a necessidade de introdução de um modelo inicial. É preciso apenas discriminar o número mínimo de camadas de acordo com os valores de resistividade apresentados (Fig. 11b).

A curva em preto representa a interpolação dos dados observados, a curva em vermelho representa a interpolação dos dados calculados, e a linha retangular em azul representa o modelo de inversão.

O método de otimização, basicamente, tenta reduzir a diferença entre os dados de resistividade medidos em campo, dos calculados, ajustando a resistividade nos blocos retangulares do modelo. A medida desta diferença é dada pelo erro médio quadrático (*Root Mean Square* – RMS). Quanto melhor for o ajuste entre a curva de resistividade calculada da curva de resistividade medida em campo, menor será o valor do RMS.

Figura 11 - Plataforma do software IPI2win (Geoscan-M) onde é apresentado o gráfico bi-logaritmico (a), a tabela de informações do modelo de inversão (b) e circulado em vermelho o valor do RMS.



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

A partir das informações fornecidas no processo de inversão de cada SEV individual foi possível construir colunas geoeletricas para os centros das sondagens. A correlação entre as colunas geoeletricas fornece prováveis modelos de distribuição de resistividade em subsuperfície, que quando equiparados as informações geológicas da área pode indicar modelos de estruturas geológicas em subsuperfície.

Quando discriminadas, as seções geoeletricas servirão de referência para a determinação de profundidade ao topo e espessura das unidades geológicas. No processo de interpretação das sondagens elétricas verticais as informações de estratigrafia do perfil geológico do poço serão levadas em consideração para auxiliar a identificação das camadas nas curvas das SEVs. O que permitirá determinar com mais segurança a relação espaçamento máximo ( $AB/2$ ) e espessura da unidade geológica, na determinação do modelo interpretativo geofísico-geológico. Além disso,

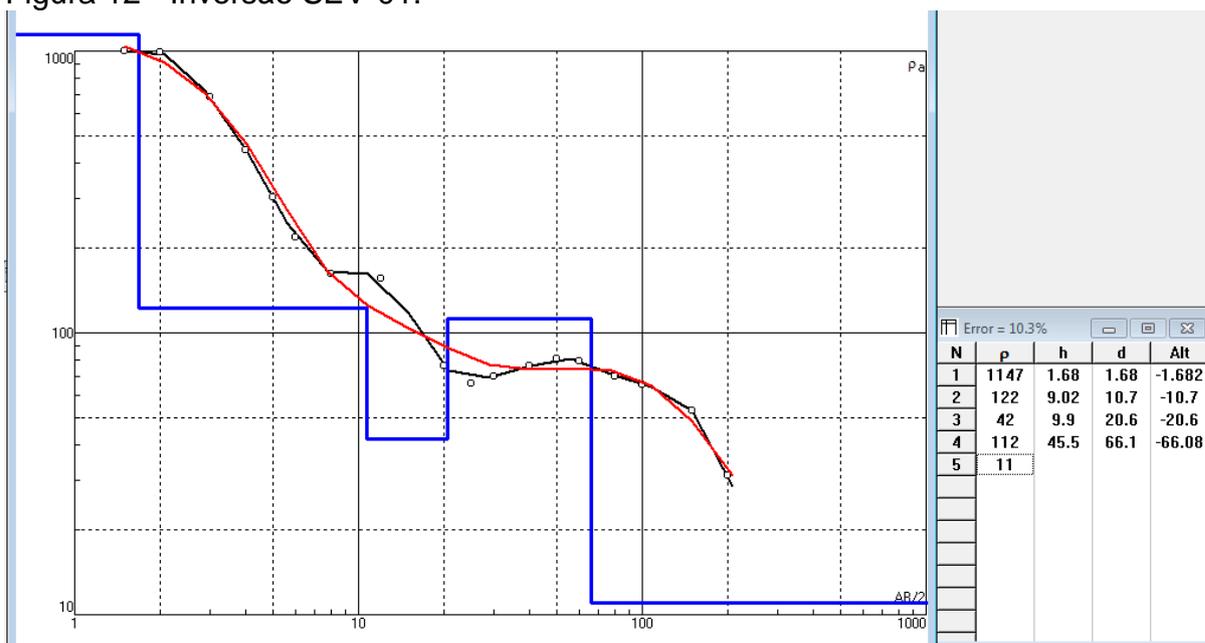
a relação da espessura da unidade geológica estará vinculada ao intervalo de profundidade de investigação que varia de  $AB/6$  a  $AB/4$ .

## 8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 8.1 Inversão SEV

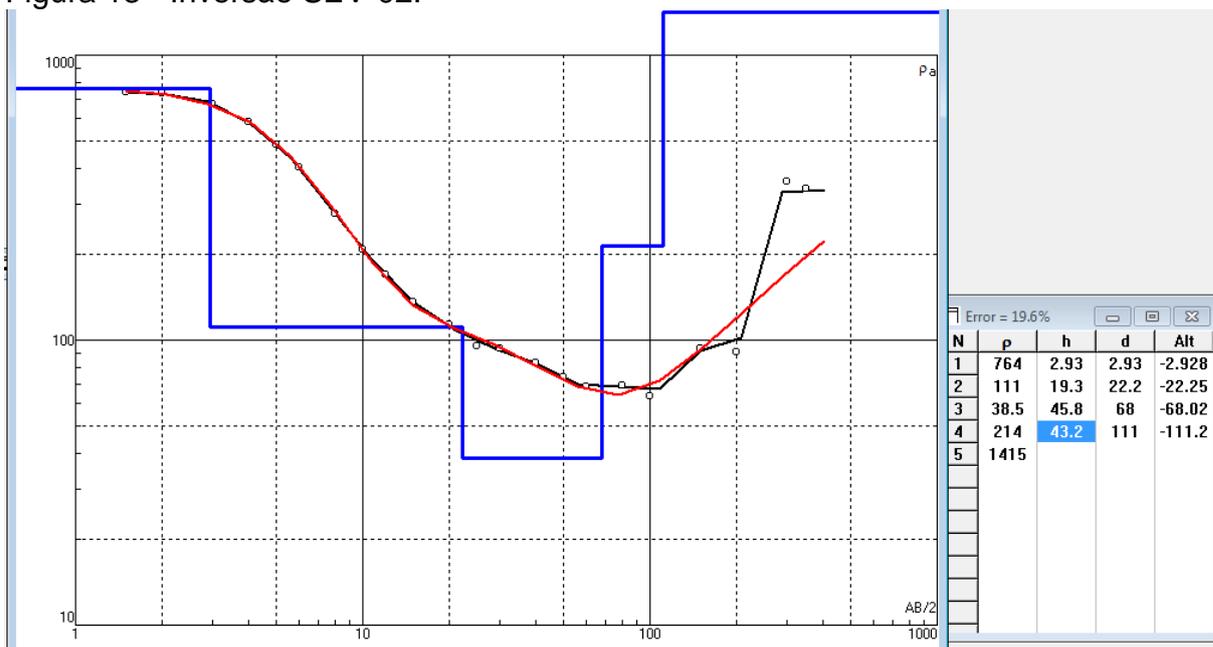
Os dados de resistividade aparente foram invertidos utilizando o software IPI2win. Através de um sistema semi-automático de ajuste para a modelagem nas formas de camadas planas e horizontais, este software realiza inversões unidimensionais dos dados de resistividade aparente e polarização induzida (ANDRADE, 2013). A seguir estão apresentadas as curvas de resistividade aparente e suas respectivas inversões 1D (Fig.12-18).

Figura 12 - Inversão SEV-01.



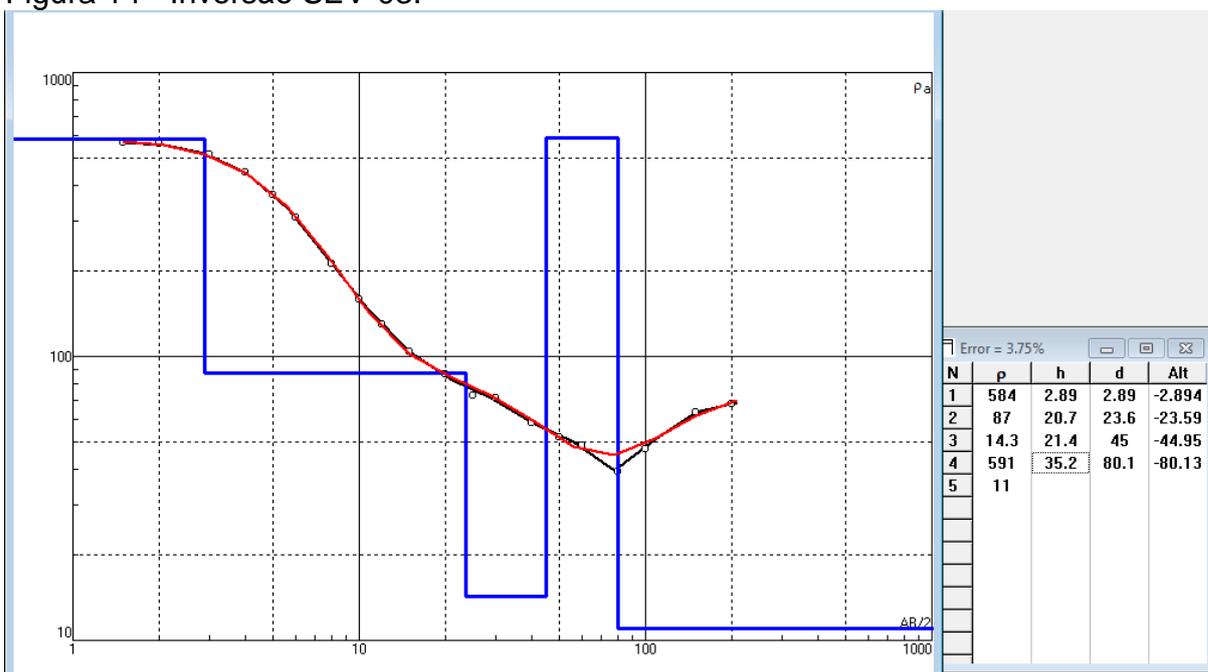
Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 13 - Inversão SEV-02.



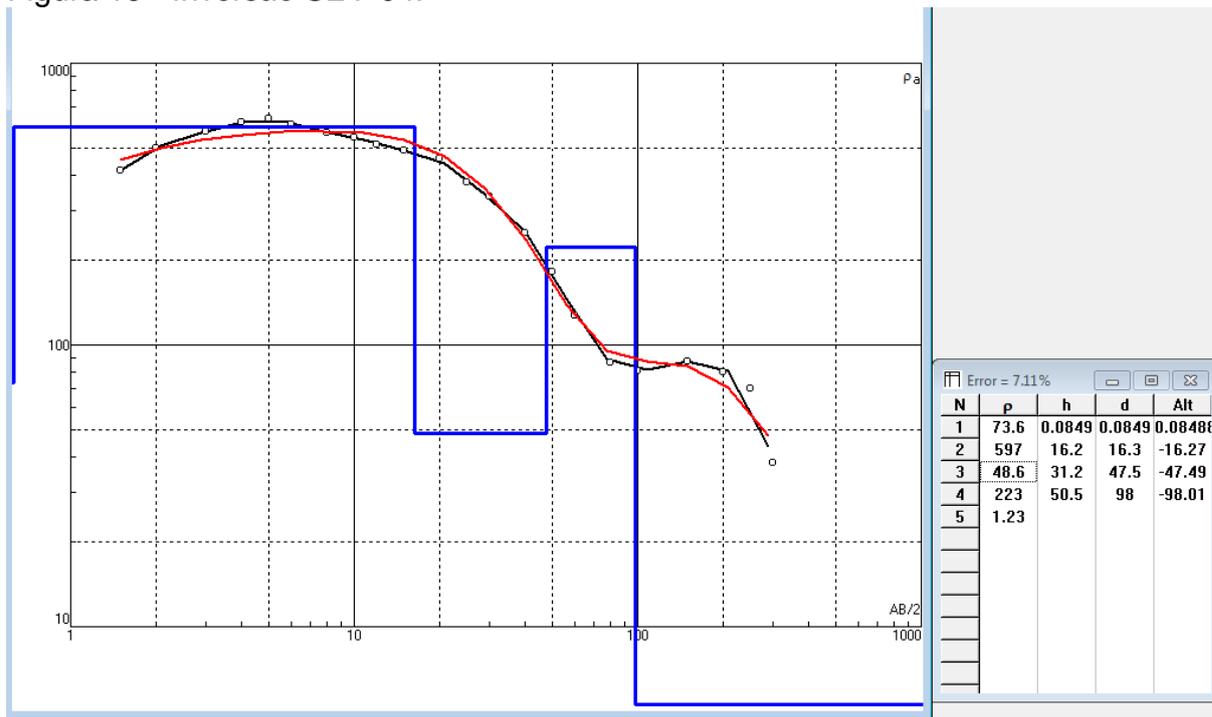
Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 14 - Inversão SEV-03.



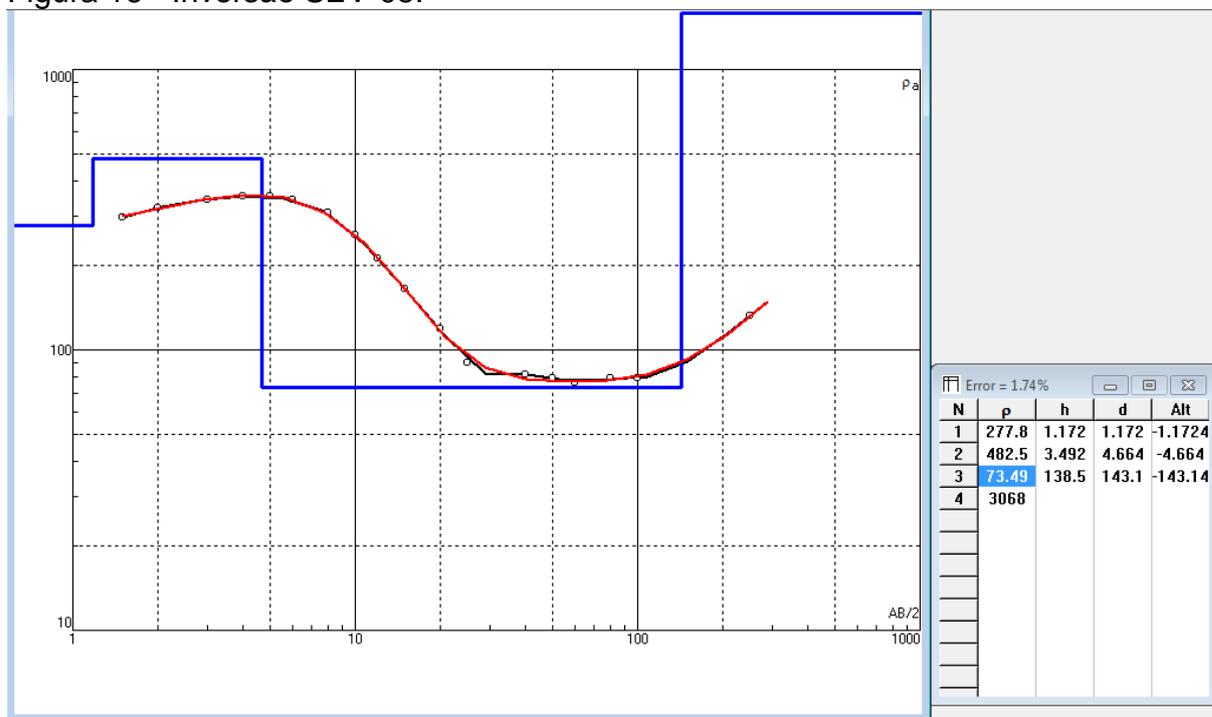
Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 15 - Inversão SEV-04.



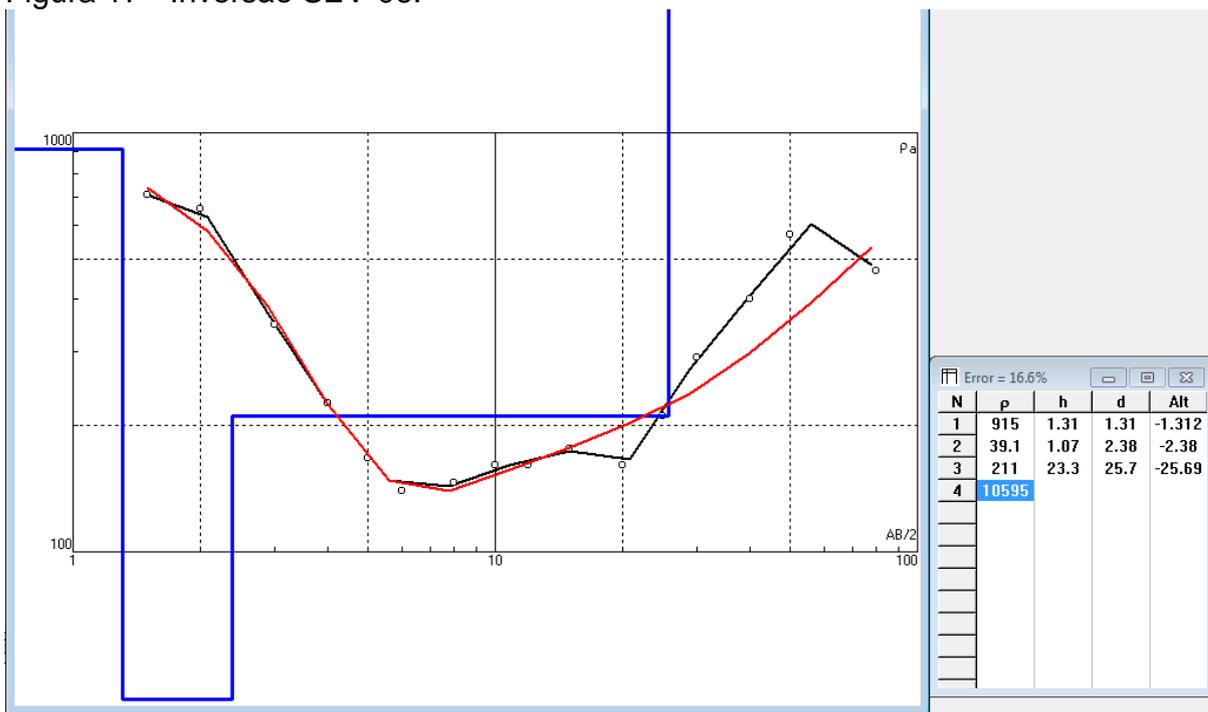
Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 16 - Inversão SEV-05.



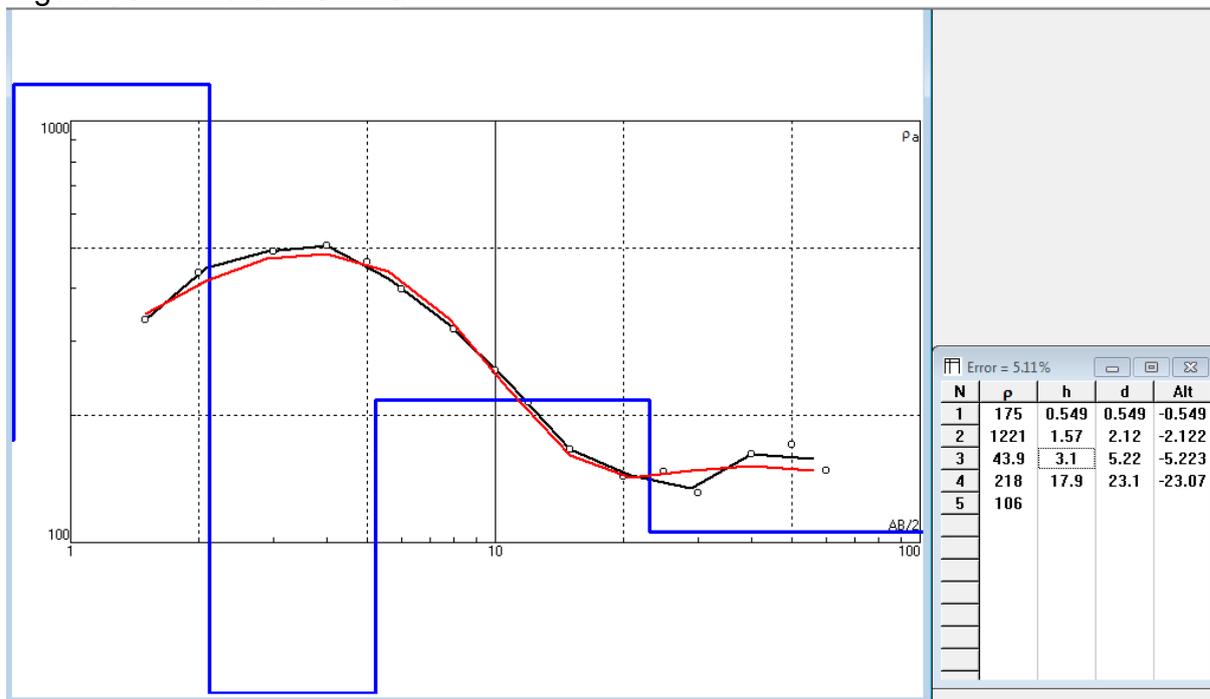
Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 17 - Inversão SEV-06.



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 18 – Inversão SEV-07.



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Segundo Sato (2002), as curvas de resistividade aparente de três camadas ainda podem ser tipificadas de acordo com a relação entre as resistividades das três camadas. Assim,

- se  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ , a curva é dita do tipo H,
- se  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ , a curva é dita do tipo K,
- se  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ , a curva é dita do tipo A, e
- se  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ , a curva é dita do tipo Q.

Deste modo a classificação das curvas de resistividade aparente das sondagens realizadas é,

Tabela 3 - Caracterização das curvas de resistividade

SEV	RELAÇÃO DAS RESISTIVIDADES	TIPO
SEV-1	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4 > \rho_5$	KHK
SEV-2	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4 < \rho_5$	KHA
SEV-3	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4 > \rho_5$	KHK
SEV-4	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4 > \rho_5$	KHK
SEV-5	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$	KH
SEV-6	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$	HA
SEV-7	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4 > \rho_5$	KHK

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

As inversões das SEV's apresentaram geralmente 5 camadas geolétricas. A primeira camada possui profundidade que varia de 0,5 a 3 metros e apresenta valores variados de resistividade, atribuiu-se a estas camadas a interpretação de solo, e seu caráter resistivo e variado está relacionado a sua composição que pode ser diferente em cada caso.

Entre a segunda e terceira camada as SEV's apresentaram baixos valores de resistividade entre 14 e 87 (*Ohm.m*). Valores estes que, quando correlacionados à informação dos poços do SIAGAS (2008), foram determinantes para caracterização geolétrica da superfície freática referente a cada centro de sondagem.

Em todas as sete SEV's a quarta camada apresentou valores elevados de resistividade variando, aproximadamente, de 112 a 591 (*Ohm.m*). A quinta camada presente nas SEV's 01, 02, 03, 04 e 07, assim como a quarta camada nas SEV's 05 e 06, apresentam a tendência da curva de resistividade para cada centro de

sondagem. Estas camadas não serão consideradas na elaboração das seções geoeletricas das SEV's por não conter a informação da espessura.

## 8.2 Seções Geoeletricas

As informações litológicas e hidrogeológicas (nível estático) dos Poços tubulares do SIAGAS, próximos as SEVs, foram levadas em consideração para a discriminação das unidades geológicas e construção das seções geoeletricas presentes nesta seção.

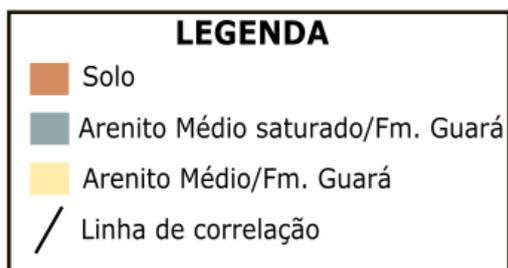
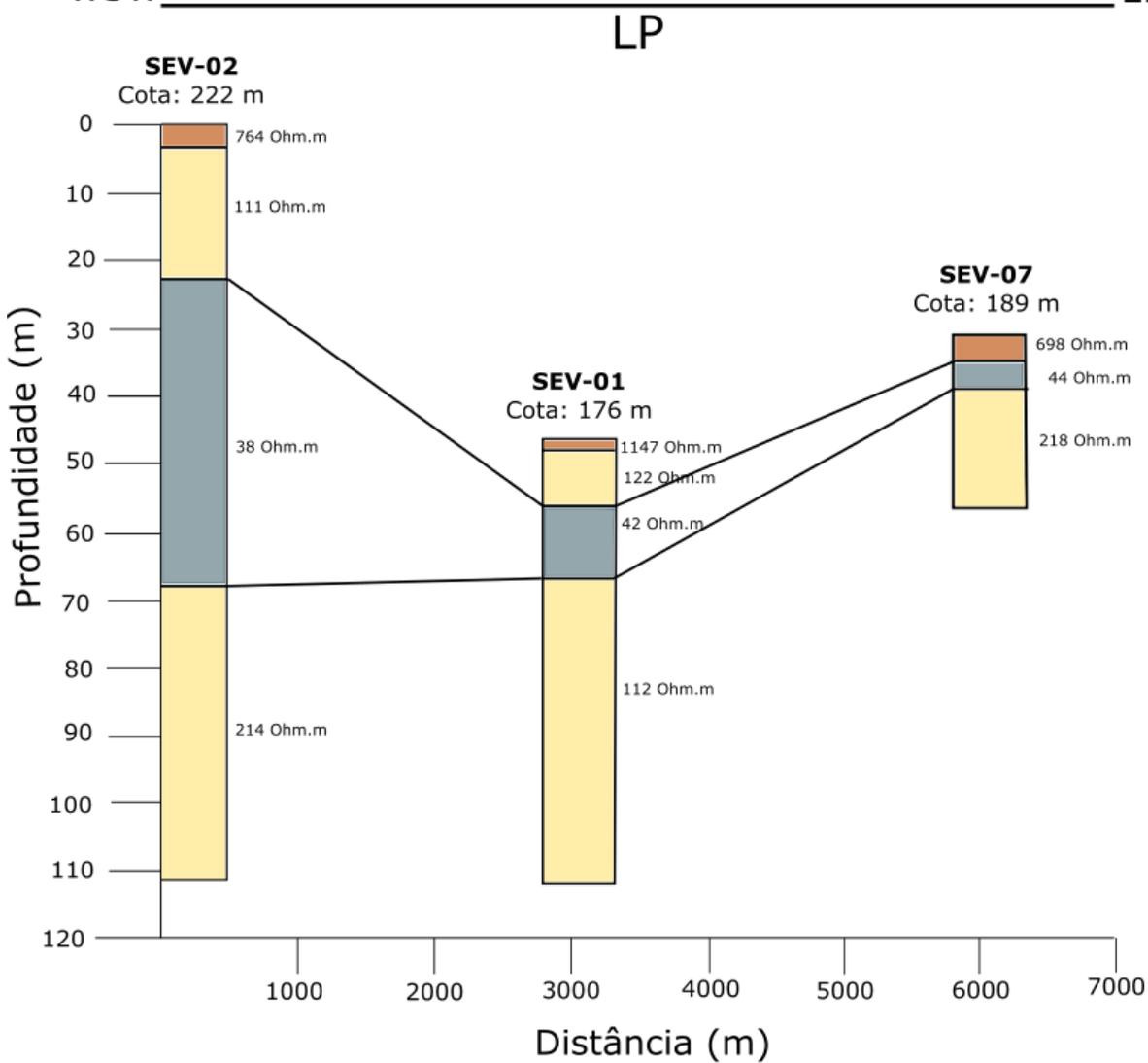
Para a Formação Guará presente na seção LP (Fig.19) foram inferidas duas camadas geoeletricas relevantes:

- A primeira é definida como arenito médio saturado, possui baixos valores de resistividade e indica a profundidade do nível d'água que varia entre 2 e 22 metros;
- E a segunda, definida como arenito médio, apresenta valores de resistividade entre 111 a 218 (*Ohm.m*) e limita o topo e a base da primeira unidade, exceto na SEV-07, onde o nível freático praticamente aflora.

Para a Formação Botucatu presente nas seções LT-01 e LT-02 (Fig. 20-21) foram inferidas duas camadas geoeletricas relevantes:

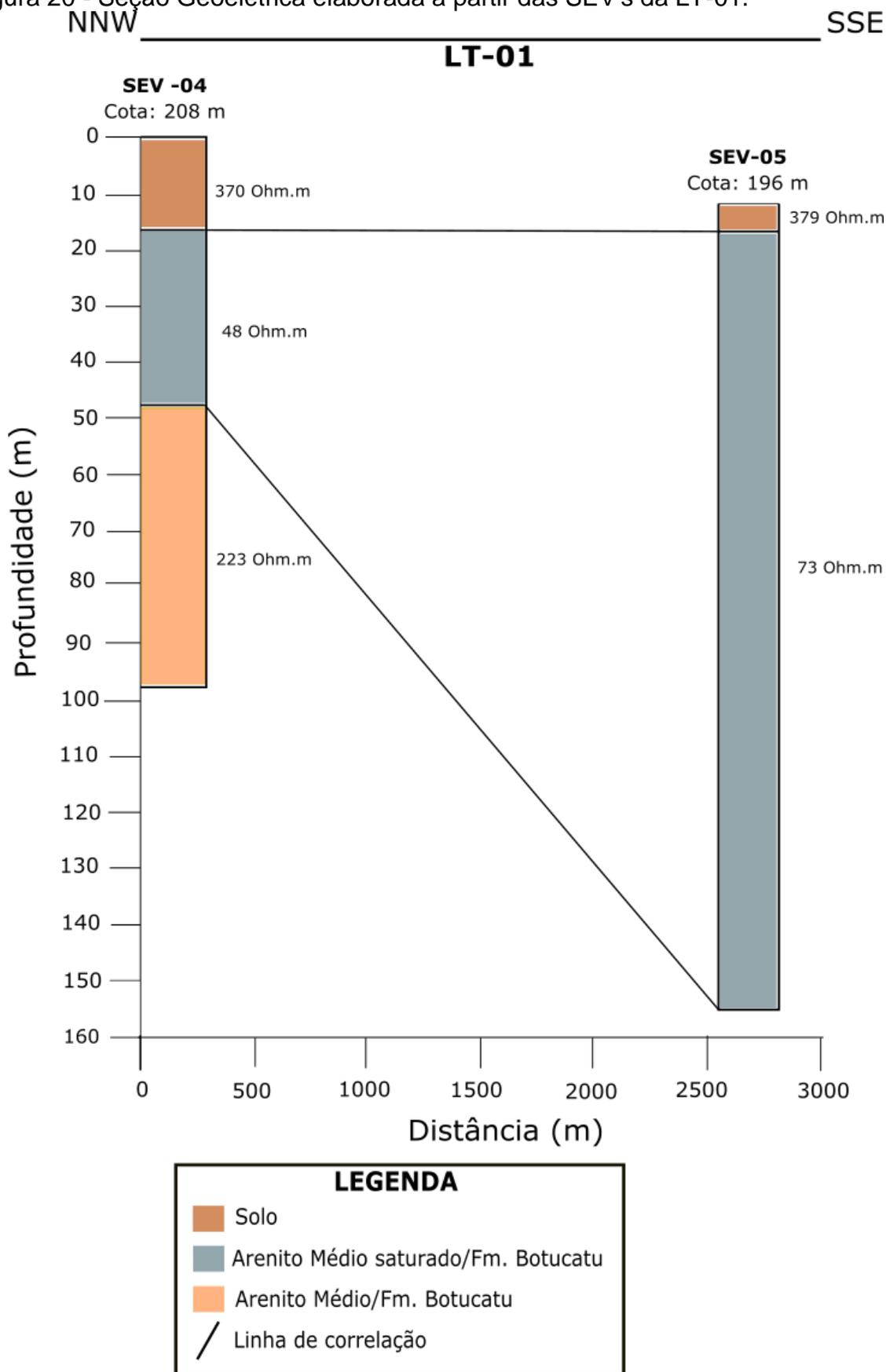
- A primeira com valores de resistividade entre 39 e 87 (*Ohm.m*), é definida como arenito médio saturado e indica a profundidade do nível d'água para cada coluna geoeletrica (SEV-03,04,05 e 06);
- E a segunda é representada por arenitos de granulometria média, apresentando valores de resistividade que variam de 211 a 591 (*Ohm.m*).

Figura 19 - Seção Geolétrica elaborada a partir da correlação das SEV's da LP.  
WSW \_\_\_\_\_ ENE



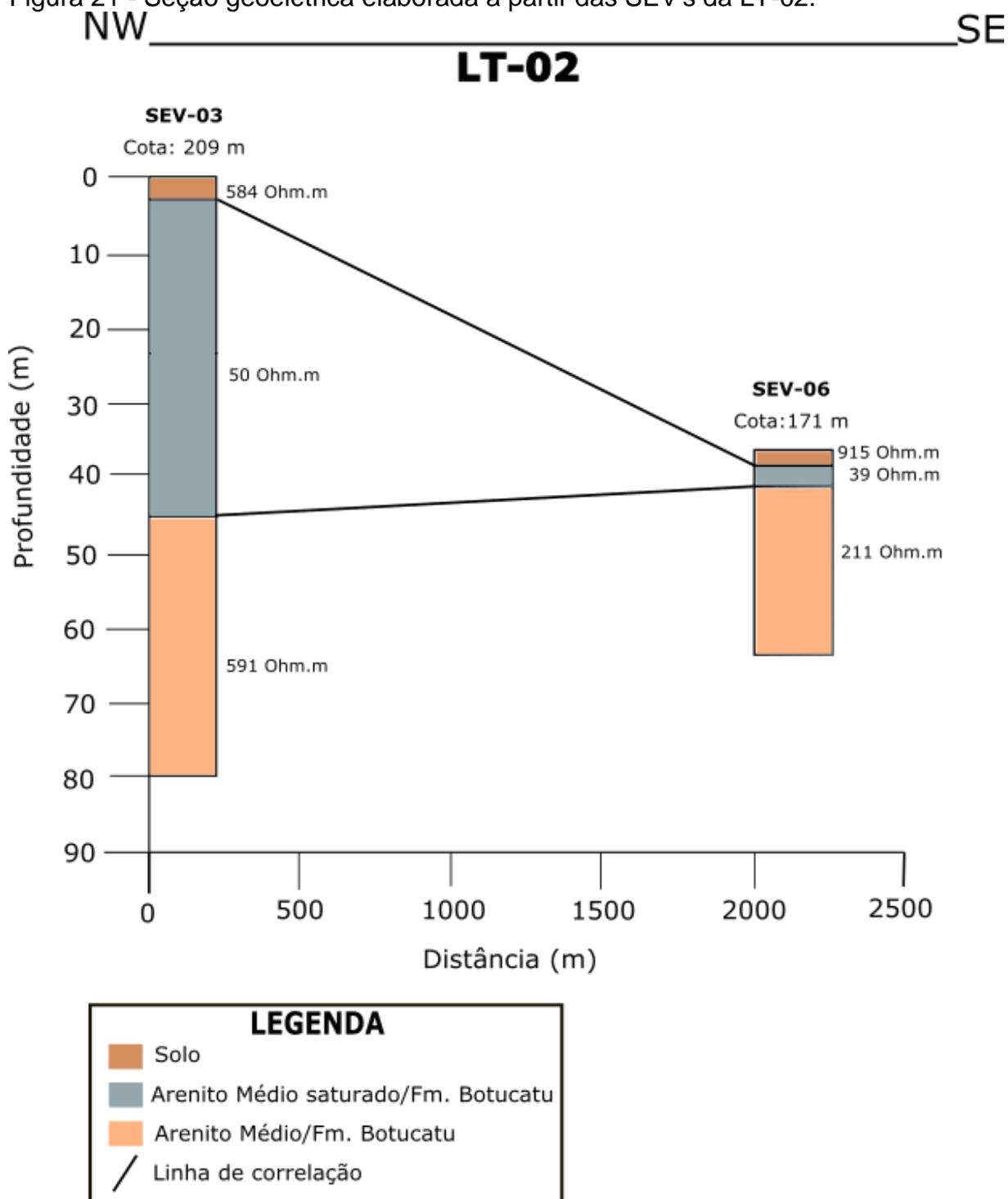
Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 20 - Seção Geométrica elaborada a partir das SEV's da LT-01.



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 21 - Seção geoeletrica elaborada a partir das SEV's da LT-02.

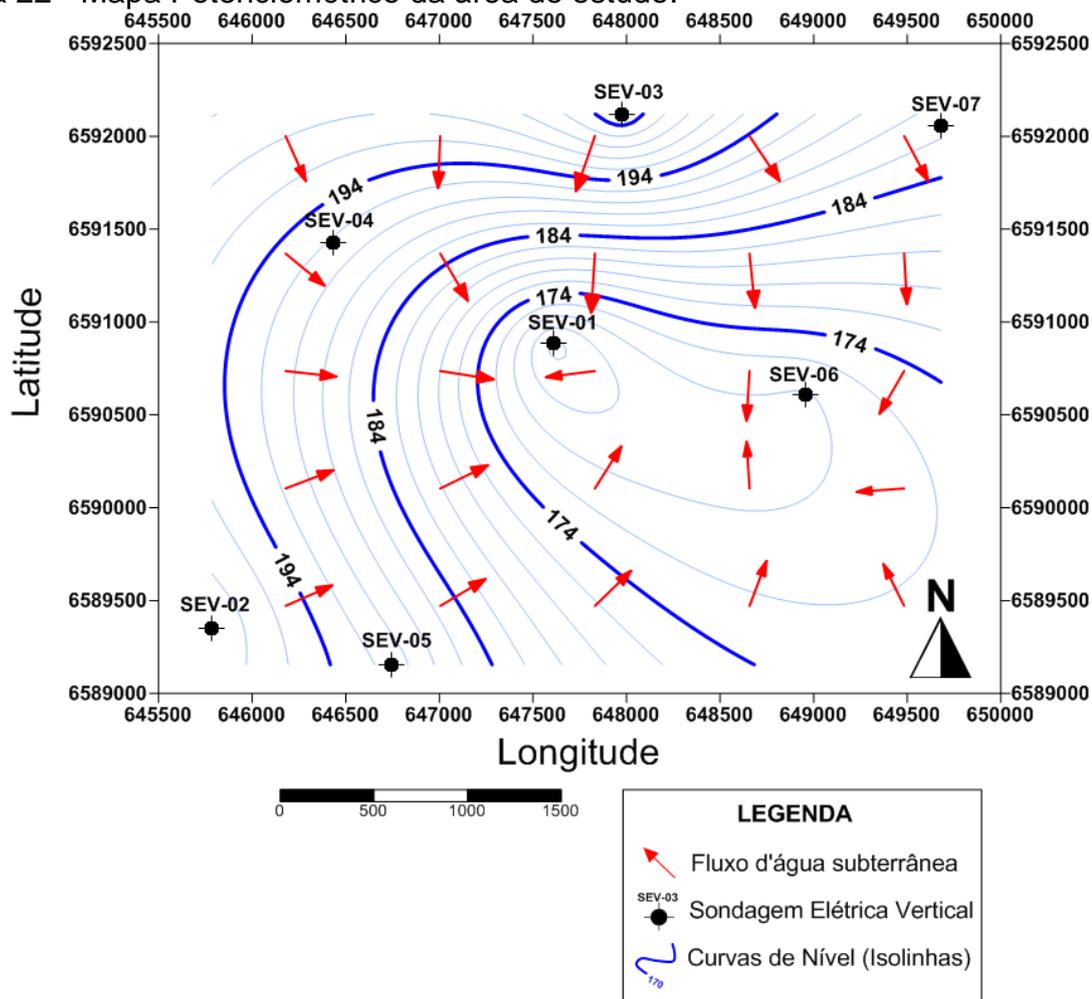


Fonte: Elaborada pela autora (2017).

### 8.3 Superfície Potencioétrica

A partir das informações de cota altimétrica do centro das SEV's juntamente aos valores de nível d'água observadas nos modelos geolétricos fez-se possível a confecção do mapa de superfície potenciométrica da área de estudo (Fig. 22).

Figura 22 - Mapa Potenciométrico da área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

A diferença do nível d'água em relação à cota de cada centro de SEV é o que determina a cota do lençol freático referente a cada ponto estudado. Os valores de cota do lençol freático foram interpolados por meio do método de Krigagem para a geração do mapa de isolinhas. Por fim, as isolinhas indicam os valores de NA (cota do nível d'água) e potencial direção de fluxo da água subterrânea.

De um modo geral, observa-se que o fluxo subterrâneo correlaciona-se com a topografia local. A superfície do lençol freático está situada entre as cotas 165 m (SEV-

01) e 206 m (SEV-03), com o fluxo das águas subterrâneas orientado a partir das cotas altas (região noroeste) para as cotas baixas (região sudeste).

## **9 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A metodologia empregada na caracterização hidrogeológica deste trabalho, mostrou-se importante na determinação de diversos aspectos relacionados ao arcabouço local. De acordo com as informações de resistividade elétrica em profundidade e perfis litológicos de poços foi possível inferir duas camadas geoeletricas para a Formação Botucatu na LT-01 e 02, e duas camadas geoeletricas para a Formação Guará baseado nos patamares de resistividade presentes nas colunas geoeletricas de cada SEV.

A estimativa da zona saturada e cota do nível freático de cada SEV foi evidenciada e apresenta valores de resistividade na faixa de 38 a 87 (*Ohm.m*). A partir destas informaes foi possível definir o principal sentido de fluxo da água subterrânea, apresentado no mapa de superfície potenciométrica, que segue das cotas mais altas (noroeste) para as cotas mais baixas (sudeste), entre 165 e 206 metros.

A caracterizao geoeletrica do contexto geológico do qual as unidades hidroestratigráficas da área estão inseridas permitiu identificar a unidade aquífera existente na área de estudo. Esta unidade  constituída pelos sedimentos das formaes Guará e Botucatu, e na região não há presença de camadas de confinamento do recurso hídrico, apresentando característica de aquífero livre.

Os dados apresentados neste trabalho poderão servir de auxílio na elaborao de um possível modelo hidrogeológico conceitual, além de contribuir com o estudo da estimativa de reservas e avaliao de vulnerabilidade  contaminao das unidades hidrogeológicas da área de estudo, abrindo um leque para futuras pesquisas mais abrangentes na região.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, C. J. J. 2013. **Processamento 1D, 2D e interpretação e dados geofísicos elétricos no semi-árido da Bahia, município de Capim Grosso**. 2013. Trabalho de Graduação – Departamento de Geofísica do Instituto de Geociências, UFBA – Bahia.

ARCHIE, G. E. (1942) **The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics**, *Petroleum Transactions of AIME*, n. 146: 5462.

BHATTACHARYA, P. K. & PATRA, H. P. 1986. **Direct Current Geoelectric Sounding**. Elsevier Publishing Company, New York, 134 p.

BORTOLOZO, A.C. 2011. **Inversão conjunta 1D de dados de SEV e TDEM: Aplicações em hidrogeologia**. Dissertação de Mestrado – IAG/Universidade de São Paulo – SP.

CPRM - Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. **Folha Cachoeira do Sul, RS**. Escala 1:250.000. Brasília/DF. 2000.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil - **Hidrogeologia – Conceitos e aplicações 2ª edição**. (2000) FEITOSA, A. C. F. & MANOEL FILHO, J. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 391 p il.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil, “**SIAGAS, 2008**”. Disponível em <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>. Acesso em: 30 de Abril, 2017.

CPRM. WREGGE, M. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Relatório Diagnóstico Sistema Aquífero Guarani no Estado do Rio Grande do Sul: Bacia Sedimentar do Paraná**. Belo Horizonte: CPRM, 2012. 16 v.

CUTRIM, A. O.; SHIRAIWA, S.; CASARIN, J. C. & REBOUÇAS A.C. 2005. **Localização de poços tubulares profundos na Bacia do Paraná, no município de Rondonópolis-MT, usando Sondagem Elétrica Vertical**. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. ABAS- SP. 2002.

CUTRIM, A. O. & REBOUÇAS, A.C. 2005. **Estimativa das reservas de água do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis-MT**. 1º Simpósio de Recursos Hídricos do Sul e 1º Simpósio de Águas da AUGM. Santa Maria-RS, CD-ROM.

CUTRIM, A. O. & DIAS, F. S. 2014. **Estimativa de profundidade e espessura de unidades geológicas da Bacia do Paraná, usando Sondagem Elétrica Vertical, no município de Poxoreo (MT)**. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 33, n. 3, p. 393-402, 2014.

DERBY, O. A. 1895. **As investigações geológicas do Brasil**. In: Lapparent, A. de. 1898. *Resumo de Geologia*, [trad, por R. Galvão]. Rio de Janeiro, H. Garnier. p. 312-333, U.

ELIS, R. V.; BARROSO, C. M. R & KIANG, C. H. 2004. **Aplicação de ensaios de resistividade na caracterização do Sistema Aquífero Barreiras / Marituba em Maceió – AL**. SBGF: Brazilian Journal of Geophysics, vol. 22(2), 2004.

FILHO, C. E. B. L. 2003. **Avaliação Hidrológica dos Aquíferos na Região Sudeste do Complexo Industrial de Camaçari Utilizando Geofísica Elétrica**. Trabalho final de graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, Brasil.

HAUSMAN, A. 1995. **Províncias Hidrogeológicas do Rio Grande do Sul**. *Acta Geologica Leopoldensia*. Série Mapas, 2.

HOLZ, M.; SOARES, A. P. & SOARES, P.C. 2008 **Preservation of aeolian dunes by pahoehoe lava: an example of Botucatu Formation (Jurassic) in Mato Grosso do Sul state, western margin of the Paraná Basin in South America**. *Journal of South American Earth Sciences*, 25 (3): 398-404.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. 2009. Tradução Maria Cristina Moreira Coelho. **Geofísica de Exploração** – São Paulo : Oficina de Texto, 2009.

LIMA OAL & SIRI NIWAS. 2000. **Estimation of hydraulic parameters of shaly sandstones from geoelectrical measurements**. *Journal of hydrology*, 235: 12-26.

LOWRIE, W. 2007. **Fundamentals of Geophysics**. 2. Ed. United States of America: Cambrigde, 2007.

MACHADO, J. L. F. 2005. **Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul**. – Porto Alegre: UNISINOS, 2005.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A. & FRANÇA, A. B.; SCHNEIDER, R. L. 2007. **Bacia do Paraná**. Boletim de Geociências da PETROBRÁS, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, maio/nov.

MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental**. 1997. 255 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

OLIVA, A. 2002. **Estudo Hidrogeológico da Formação Rio Claro no Município de Rio Claro – SP**. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências e Ciências Exatas /Unesp- Rio Claro, 71 p.

ORELLANA, E. 1972. **Prospeccion geoelectrica: en corriente continua**. 2. Ed. Espanha: Paraninfo, 1972.

PARASNIS, D. S. 1986. **Principles of Applied Geophysics**. Chapman and Hall. 4ª edição.

RENNE, P.R.; ERNESTO, M.; PACCA, I.G.; COE, R.S.; Glen, M.J.; Prévot, M. & Perrin, M. 1992. **The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassiccretaceous boundary**. Science, 258: 975-979.

SAINATO, C. M. & LOSINNO, B. N. 2006. **Spatial distribution of groundwater salinity at Pergamino – arrecifes zones (Buenos Aires Province, Argentina)**. SBGF: Brazilian Journal of Geophysics, Vol. 24(3): 307-318, 2006.

SATO, H. K. (2002) **Métodos Elétricos**.

SCHERER, C. M. S. & LAVINA, E. L. 1997. **Aloformação Guará: uma nova unidade estratigráfica mesozóica na porção meridional da Bacia do Paraná**. In: SBG, Simp. Cronoestr. Bacia do Paraná, 3, Boletim de Resumos, p. 36- 37.

SCHERER, C.M.S. 1998. **Análise estratigráfica e litológica da Formação Botucatu (Eocretáceo da Bacia do Paraná) no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre. 230p. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade federal do Rio Grande do Sul.

SCHERER, C.M.S. 2000. **Eolian dunes of the Botucatu Formation (Cretaceous) in southernmost Brazil: morphology and origin.** *Sedimentary Geology*, 137 (3/4): 63-84.

SCHULTZ, C. L., Scherer C. M.S., Lavina E. L. 2002. **Dinosaur´s footprints from the Guará Formation (Upper Jurassic ?), Paraná Basin, Southern Brazil.** *In: VIII Congreso Argentino de Paleontologia y Bioestratigrafia.* Corrientes. p. 64

SOARES, A. P.; SOARES, P. C.; HOLZ, M. 2009. **Correlaes Estratigráficas Conflitantes no Limite Permo-Triássico no Sul da Bacia do Paraná: O Contato Entre Duas Seqncias e Implicaes na Configurao Espacial do Aquífero Guarani.** *Revista Pesquisa em Geociências.* Porto Alegre: UFRG. p. 1-8.

TELFORD, W. M., G. L. P, & SHERIFF, R. E. 1990. **Applied Geophysics,** Cambridge Un. Press, Cambridge.

WARD, S. H., 1990, **Resistivity and induced polarization methods,** *In: S. H. Ward, ed., Geotechnical and Environmental Geophysics, vol. 5, pp. 147-189, Society of Exploration Geophysicists.*

WHITE, I.C. 1908. **Relatório sobre as “coal measures” e rochas associadas do Sul do Brasil.** *Relatório Final da Comissão de estudos das minas de carvão de pedra do Brasil,* Rio de Janeiro, Imprensa Nacional, Rio de Janeiro, 28., 617 f.

**APÊNDICE A – Informações do centro das SEV's**

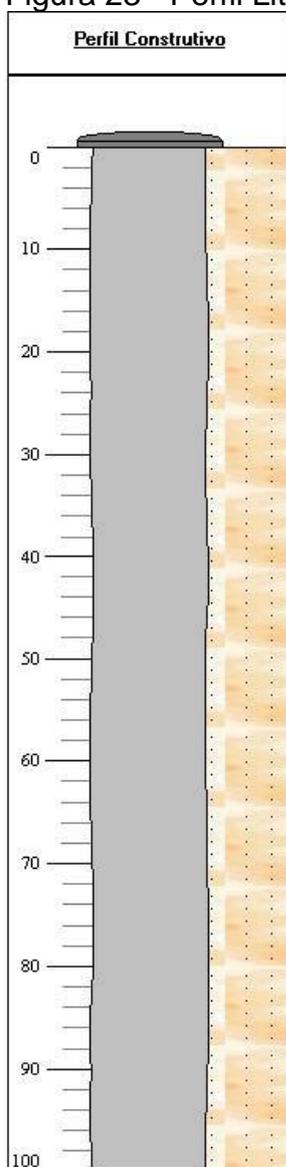
Tabela 4 - Informações de coordenadas e cota dos centros das SEV's (Sistema Universal Transverso de Mercator – UTM – WGS84)

<b>SEV's</b>	<b>Lat (UTM)</b>	<b>Long (UTM)</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>AB/2 (m)</b>
SEV-01	6590883	647613	176	250
SEV-02	6589348	645785	222	350
SEV-03	6592120	647978	209	350
SEV-04	6591426	646433	208	300
SEV-05	6589155	646744	196	250
SEV-06	6590605	648955	171	200
SEV-07	6592053	649680	189	300

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

**ANEXO A – Perfil Litológico dos Poços Tubulares do SIAGAS**

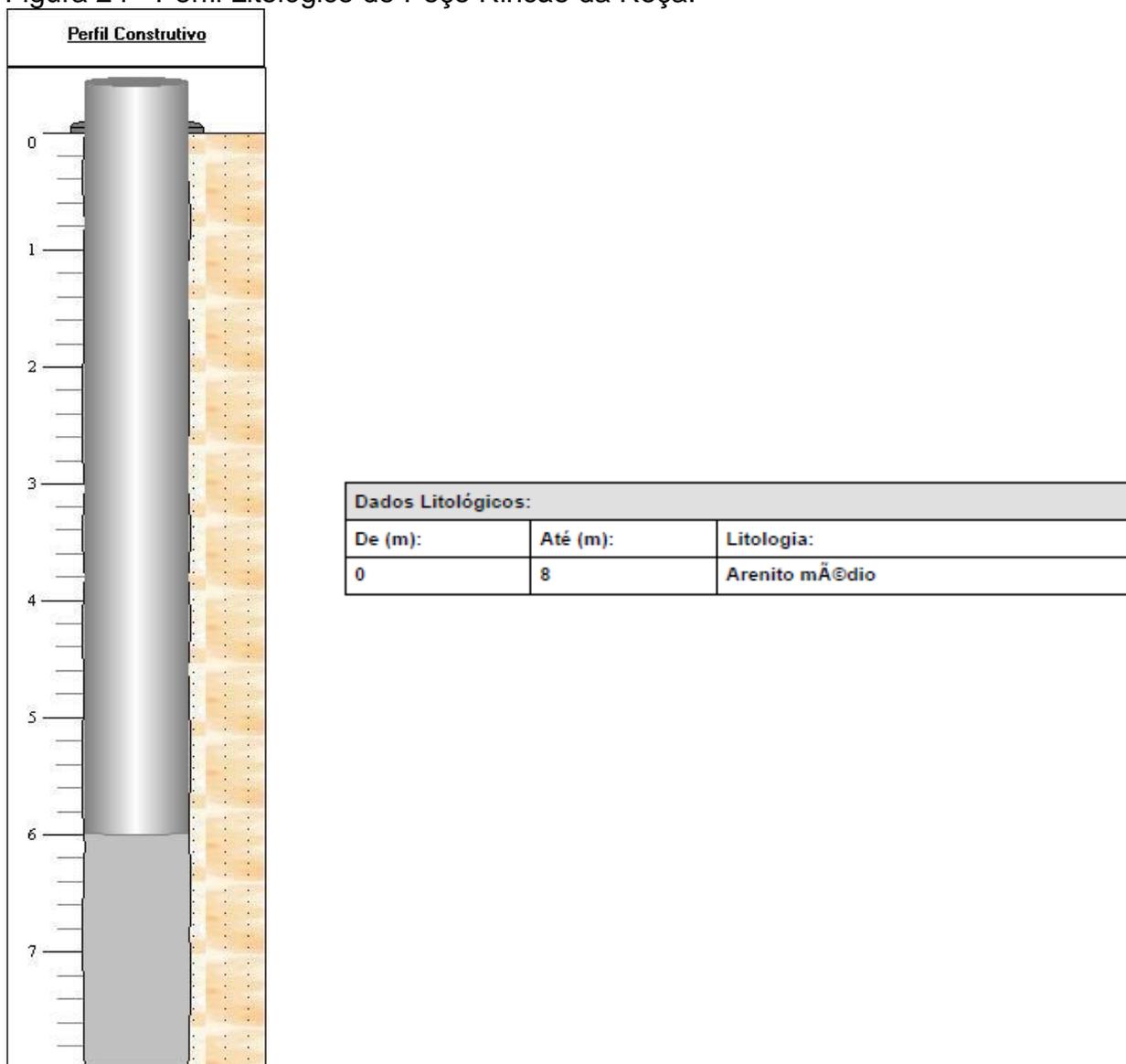
Figura 23 - Perfil Litológico do Poço Cerro da Vigia.



Dados Litológicos:		
De (m):	Até (m):	Litologia:
0	100	Arenito médio

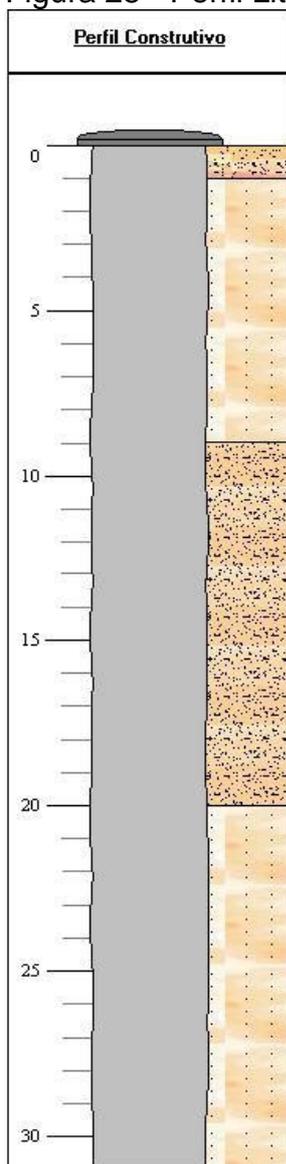
Fonte: Retirado de SIAGAS (2017) - (<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>).

Figura 24 - Perfil Litológico do Poço Rincão da Roça.



Fonte: Retirado de SIAGAS (2017) (<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>).

Figura 25 - Perfil Litológico do Poço Rincão da Vechia.



Dados Litológicos:		
De (m):	Até (m):	Litologia:
0	1	Solo arenoso
1	9	Arenito médio
9	20	Areia siltosa
20	31	Arenito médio

Fonte: Retirado de SIAGAS (2017) - (<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>).