

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE GEOLOGIA

LUCAS REIS

Orientador(a): Profa. Dra. Christie Helouise Engelmann de Oliveira

LOCALIZAÇÃO DE RESERVATÓRIO HÍDRICO EM ROCHA BASÁLTICA - SÃO
FRANCISCO DE PAULA/RS
Aplicação de Eletrorresistividade

São Leopoldo
2021

LUCAS REIS

**TÍTULO: LOCALIZAÇÃO DE RESERVATÓRIO HÍDRICO EM ROCHA BASÁLTICA
- SÃO FRANCISCO DE PAULA/RS
Aplicação de Eletrorresistividade**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Geologia, pelo Curso de Geologia da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -
UNISINOS

Orientador(a): Profa. Dra. Christie Helouise Engelmann de Oliveira

Banca examinadora: Prof. Dr. Francisco Manoel Wohnrath Tognoli
Prof. Dr. Giuseppe Betino de Toni

São Leopoldo

2021

Dedico esta monografia à minha família, a quem devo tudo, à minha esposa Carol que tanto me apoiou e em especial à minha avó Horaida que sempre orou por mim. Esta dedicatória se estende ao Jackson, que infelizmente não está mais conosco, mas sem dúvidas deixou sua marca pela inteligência ímpar e amizade verdadeira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por mais uma conquista, e sei que isso não seria possível sem o esforço da minha mãe Naira, do meu pai João, da minha avó Horaida e minha irmã Daniela, sempre auxiliando em toda e qualquer hora. Da mesma forma sou grato pela paciência sem precedentes da minha parceira Carol, que deixou momentos de lazer de lado para estar comigo em finais de semana dedicados aos livros.

Ao Prof. Dr. Henrique P. Kern pelos conselhos iniciais e à Prof. Dra. Christie H. Engelmann de Oliveira, pela orientação e todo o suporte necessário, sem medir esforços.

Ao meu irmão e chefe João Fernando, que além de incentivar, sempre compreendeu meus horários complicados, assim como todos os meus colegas de serviço e amigos pela compreensão e apoio.

Ao geólogo e amigo Eduardo Serpa, que não só no trabalho de conclusão, mas no decorrer do curso cedeu seu tempo e experiência para me auxiliar, influenciando nos resultados que alcancei.

Ao colega Saulo pelas leituras do trabalho além dos incontáveis momentos de descontração, apoio, conselhos e até discussões, que tanto sentirei falta.

Ao geólogo Adolpho Herbert Augustin, pelo conhecimento e tempo disponibilizados para a ajuda na coleta dos dados em campo. Ao Centro de Excelência em Pesquisa e Inovação em Petróleo, Recursos Minerais e Armazenamento de Carbono (CEPAC) da PUC-RS, pelo empréstimo do eletrorresistivímetro.

Finalmente, ao amigo Moisés de Oliveira Daros proprietário da área de estudo, por permitir o desenvolvimento desse trabalho.

RESUMO

O estudo prévio dos locais de perfuração de poços artesianos é uma importante ferramenta para evitar altos gastos com perfurações de poços secos. Quando a geologia do local é composta por rochas cristalinas, esse levantamento prévio torna-se mais importante, pois muitas vezes o recurso hídrico só é encontrado em estruturas geológicas que são mais propensas à percolação de água ou à ligação com outras estruturas formando um aquífero. Neste trabalho foi utilizado sensoriamento remoto e eletrorresistividade, com a técnica do caminhamento elétrico, para identificar a ocorrência de lineamentos tectônicos em uma propriedade rural de 14 hectares no distrito de Cazuza Ferreira, município de São Francisco de Paula-RS. O método aplicado dispôs de duas linhas de caminhamento elétrico com parâmetros de trabalho que visaram descobrir a resistividade do subsolo e a variação desta frente à heterogeneidade do meio. Os resultados obtidos comprovaram a existência da estrutura geológica com potencial capacidade de abastecimento hídrico, dentro de um embasamento basáltico e presença de possíveis alterações ou lentes areníticas. O estudo ainda buscou a identificação de fontes de vulnerabilidade dos recursos hídricos presentes no potencial aquífero da área. A utilização da eletrorresistividade se mostrou eficiente em relação à investigação de rochas cristalinas, facilitando o reconhecimento e acesso aos recursos naturais presentes no subsolo, evitando gastos desnecessários de pessoas que precisam de tais bens, seja no meio rural ou meio urbano, sempre respeitando a aplicabilidade da ferramenta.

Palavras-chave: Eletrorresistividade. Poços artesianos. Embasamento cristalino. Água. Aquífero.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.....	13
Figura 2 - Mapa das bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul.	14
Figura 3 - Mapa da fase inicial da abertura do Atlântico Sul.	17
Figura 4 - Localização da Bacia do Paraná e do SASG.	19
Figura 5 - Litoestratigrafia do Permo-Cretáceo da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul.	19
Figura 6 - Lineamentos tectônicos principais do sul da Bacia do Paraná: Arco de Rio Grande (1); Sinclinal de Torres (2); Leão (3); Lancinha-Cubatão (4); Perimbó (5); Torres-Posadas (6); Rio Uruguai (7) e Taquara Verde (8).	21
Figura 7 - Estruturas presentes no SASG.	22
Figura 8 - Fraturas sub-horizontais com percolação de água em basalto.	23
Figura 9 - Variação do nível do aquífero fraturado.	25
Figura 10 - Principais estruturas entre os aquíferos de Caxias do Sul-RS e Santa Rosa-RS.	26
Figura 11 - Método da eletrorresistividade com técnica de caminhamento elétrico.	33
Figura 12 - Arranjo dipolo-dipolo.	34
Figura 13 - Mapa da área com as linhas de CE aplicadas.	41
Figura 14 – Linha um (LaP1-LaP2). Figura 15 - Linha dois (LbP1-LbP2).	42
Figura 16 – Eletroresistímetro modelo X5xtal Control e multímetros Minipa ET-2550.	43
Figura 17 – Levantamento sendo realizado.	44
Figura 18 – Cabos de cobre revestidos.	44
Figura 19 – Eletrodos fincados no solo com conector inserido.	45
Figura 20 - Mapa da área com prováveis lineamentos tectônicos.	47
Figura 21 - Mapa de lineamentos tectônicos.	48
Figura 22 - Área escolhida previamente para o levantamento geofísico com os lineamentos tectônicos.	49
Figura 23 – Dados obtidos da linha LaP1-LaP2.	50
Figura 24 - Dados obtidos da linha LbP1-LbP2 com espaçamento de 10 metros.	51
Figura 25 – Dados obtidos da linha LbP1-LbP2 com espaçamento de 5 metros.	52
Figura 26 - Imagem 2d: perfil LaP1-LaP2, sem suavização das linhas.	53

Figura 27 – Imagem 2d: perfil LaP1-LaP2, com suavização das linhas e localização do lineamento tectônico.	53
Figura 28 – Imagem 2d: perfil LbP1-LbP2, 10m - sem suavização das linhas.....	55
Figura 29 - Imagem 2d: perfil LbP1-LbP2, 10m - com suavização das linhas e localização do lineamento tectônico.....	55
Figura 30 – Imagem 2d: perfil LbP1-LbP2, 5m - sem suavização nas linhas.....	56
Figura 31 – Imagem 2d: perfil LbP1-LbP2, 5m - com suavização das linhas e localização do lineamento tectônico.....	57
Figura 32 – Linha de localização do lineamento tectônico.....	58
Figura 33 – Levantamento de lavouras locais.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de qualidade das águas subterrâneas do SASG - 2001-2003.....	27
Tabela 2 - Dados de qualidade das águas subterrâneas do SASG - 2004-2006.....	28
Tabela 3 - Resistividade aparente dos tipos litológicos.....	33
Tabela 4 - Coordenadas de referência do estudo <i>in loco</i>	49

LISTA DE SIGLAS

CE	Caminhamento Elétrico
ER	Eletrorresistividade
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IE	Imageamento Elétrico
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LIPs	<i>Large Igneous Provinces</i>
ROI	<i>Region Of Interesting</i>
SAG	Sistema Aquífero Guarani
SASG	Sistema Aquífero Serra Geral
SEV	Sondagem Elétrica Vertical
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SR	Sensoriamento Remoto

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	12
1.1.1 Objetivo Geral	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
1.2 Justificativa	12
1.3 Área de Estudo	12
1.3.1 Clima	13
1.3.2 Bacia Hidrográfica	14
1.3.3 Geomorfologia	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 Geologia	16
2.1.1 Província Paraná-Etendeka.....	16
2.1.2 Grupo São Bento.....	18
2.1.3 Formação Botucatu	20
2.1.4 Formação Serra Geral.....	20
2.1.5 Reservatório Fraturado SASG.....	22
2.3 Vulnerabilidade	24
2.4 Geofísica de Prospecção	29
2.4.1 Eletrorresistividade (ER).....	29
2.4.2 Arranjo dipolo-dipolo.....	34
2.4.3 Resistividade em lineamentos tectônicos	35
2.5 Sensoriamento Remoto	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1 Obtenção das Imagens de Satélite	38
3.2 Tratamento da Imagem	38
3.3 Identificação das linhas de levantamento geofísico	39
3.4 Levantamento de campo	40
3.4.1 Obtenção de dados	42
3.5 Processamento de dados	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1 Estudo prévio	47
4.2 Estudo aplicado	49

	10
4.2.1 Linha LaP1-LaP2.....	52
4.2.2 Linha LbP1-LbP2.....	54
4.3 Convergência de Perfis.....	57
4.4 Avaliações complementares	58
5 CONCLUSÕES	60
REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

Os métodos geofísicos implicam na medida de propriedades físicas do subsolo, sendo possível identificar anomalias através de cálculos e modelos, permitindo a interpretação de grandezas de interesse. Entre suas contribuições, as técnicas geofísicas são reconhecidas pelos excelentes resultados na identificação de água subterrânea dentro de lineamentos tectônicos, através do uso de caminhamento elétrico identificando descontinuidades laterais em subsuperfície. Tudo isso é possível mediante estudo prévio com sensoriamento remoto, que consiste na avaliação à distância das imagens da superfície da Terra em diferentes escalas de aproximação (BRAGA, 2006; IAG-USP, 2021).

O interior do distrito de Cazuza Ferreira, localidade de Campestre do Tigre no município de São Francisco de Paula, não tem abastecimento público de água tratada e encanada. Deste modo, as propriedades rurais utilizam nascentes ou poços tubulares profundos como fonte do recurso, e em alguns casos uma propriedade pode ainda abastecer áreas adjacentes. O estudo aqui proposto pode facilitar o abastecimento hídrico para a comunidade local e/ou irrigação agrícola. O trabalho visa suprir a demanda de abastecimento hídrico de uma propriedade rural localizada no distrito de Cazuza Ferreira, com a identificação de aquíferos em rochas fraturadas e locação de um poço.

Primeiramente foi realizado o tratamento de imagens de satélite e identificação dos lineamentos tectônicos ideais para a exploração de águas subterrâneas, em área pré-determinada de predominância basáltica. A coleta destes dados e informações gerais sobre o tema foi realizada nos sites do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Após esta etapa, foi testado *in loco* a existência e eficiência do possível reservatório através de levantamento geofísico. O método de eletrorresistividade (ER) e técnica de caminhamento elétrico (CE) foi aplicado em uma área rural de aproximadamente 14 hectares, em linhas transversais aos lineamentos tectônicos identificados.

Além do consumo doméstico, o proprietário pretende utilizar a água para complementar a atividade econômica local no cultivo de parreiras, que apresenta demanda de irrigação. Dependendo da capacidade do aquífero, a água explorada também poderá ser fonte para o abastecimento de atividades agrícolas nas

propriedades vizinhas. Compreende-se então, que este trabalho pode auxiliar a propriedade estudada assim como suas limítrofes.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é a identificação de zonas potencialmente produtoras em rochas basálticas fraturas na região rural de São Francisco de Paula, Rio Grande do Sul, parte do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG).

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Localizar a rede de lineamentos tectônicos locais;
- b) Identificar estruturas com potencial reservatório hídrico;
- c) Locação de um poço tubular profundo.

1.2 Justificativa

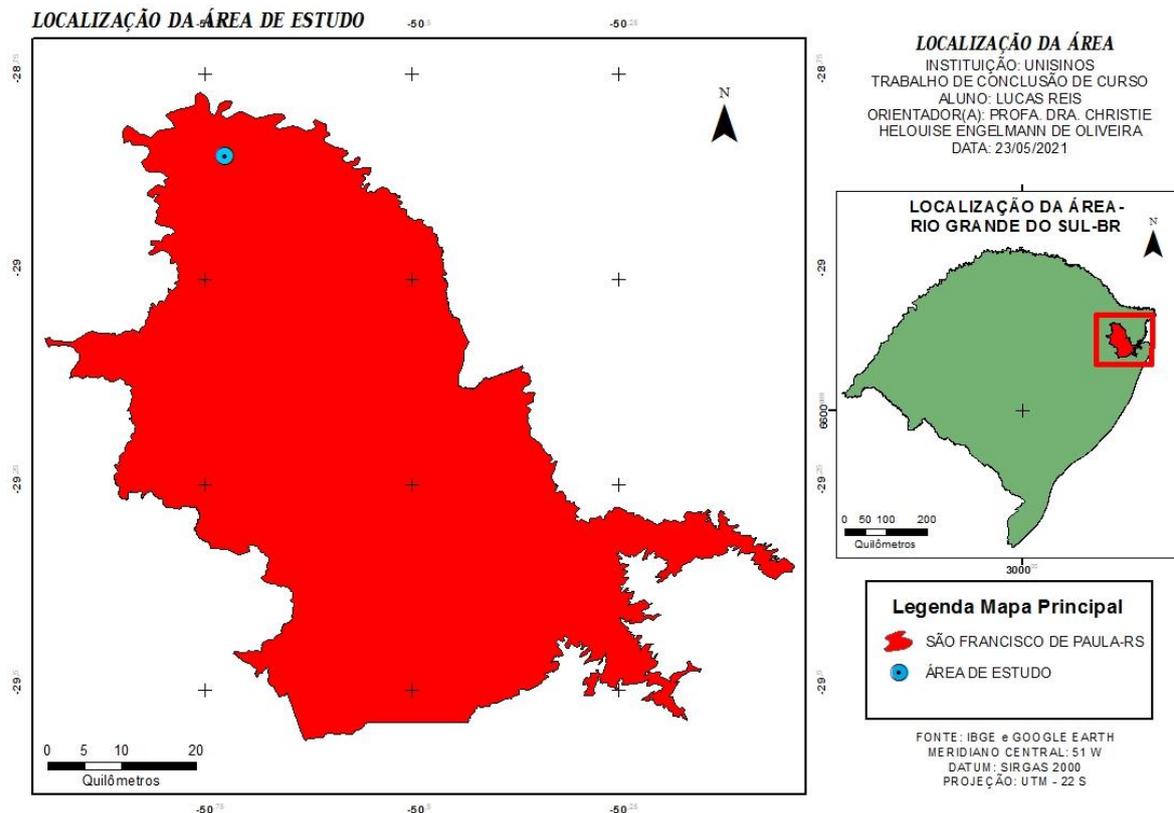
Hoje em dia a falta de água vem sendo uma das maiores preocupações do ser humano, os recursos hídricos superficiais estão cada vez mais contaminados, enquanto a maioria dos aquíferos ainda apresentam águas puras e intocadas. Aquíferos basálticos acumulam água por meio da percolação em fraturas, esses reservatórios de água limpa garantem qualidade de vida para a população de uma determinada região. No interior do distrito de Cazuza Ferreira, localidade de Campestre do Tigre, não há abastecimento público de água tratada e encanada, desta forma, as propriedades rurais utilizam nascentes ou poços tubulares profundos como fonte do recurso, e em alguns casos uma propriedade pode ainda abastecer áreas limítrofes.

1.3 Área de Estudo

A área de estudo está localizada no planalto do estado do Rio Grande do Sul, município de São Francisco de Paula. O município dista aproximadamente 120 quilômetros da capital Porto Alegre e tem uma população de aproximadamente

21.800 pessoas conforme informações retiradas do site do IBGE (2017). Destaca-se que a principal atividade econômica da região é a agricultura, na maioria das vezes com culturas irrigáveis. Na figura 1 é possível ver o mapa de localização da área na porção nordeste do estado.

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Dentro do município, a área estudada fica no distrito de Cazuza Ferreira e tem a coordenada média de referência: 22J 526796.34 mE 6808830.93 mS. Sua área é de 144.000,00 m² ou 14,40 hectares, utilizados para a cultura de parreirais de uva.

1.3.1 Clima

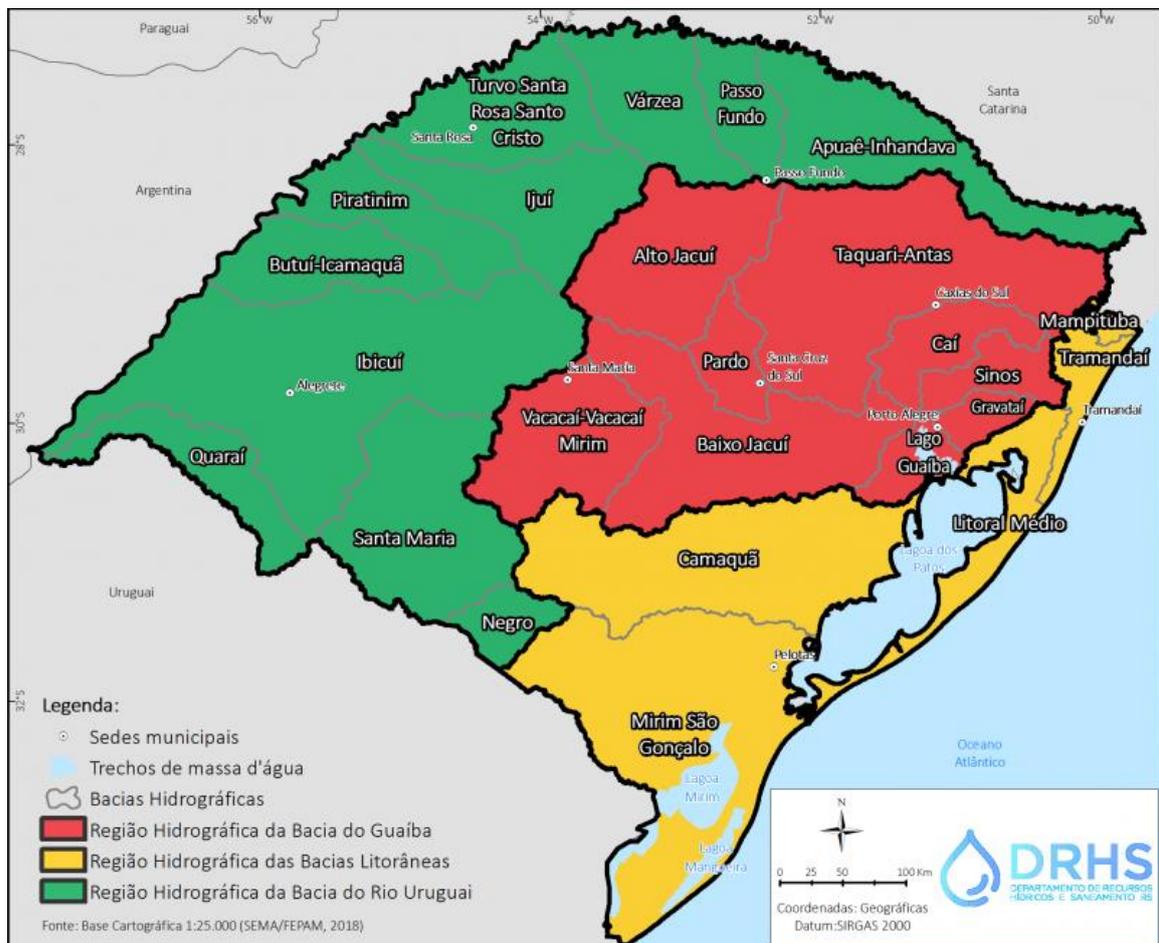
A região de São Francisco de Paula está 892 metros acima do nível do mar, tem um clima quente e temperado com temperatura média de 16,2 °C. A pluviosidade do município é significativa ao longo do ano, a média anual de chuvas é 2.111 mm. O mês mais seco é abril, com 137 mm, enquanto a precipitação e a temperatura média mais elevada são no mês de janeiro, com 232 mm de chuva e

20,4 °C. O mês com temperatura média mais baixa é julho, com 11,5 °C (CLIMATE, 2019).

1.3.2 Bacia Hidrográfica

Na região norte do Rio Grande do Sul o SASG está inserido dentro de diferentes bacias hidrográficas, como: Passo Fundo, Várzea, Turvo Santa Rosa Santo Cristo, Taquari-Antas e etc. A área de estudo está inserida na bacia Taquari-Antas, localizada a nordeste do estado. A bacia hidrográfica Taquari-Antas tem uma área de 26.928 km² sendo a maior sub-bacia da região hidrográfica do Guaíba, representando 9,6% da área do estado. Suas nascentes principais estão nos municípios de Cambará do Sul, São Francisco de Paula e Bom Jesus, e desembocam no rio Jacuí, no município de Triunfo (VERDUM et al., 2004). Na figura 2 é possível ver a Bacia Taquari-Antas a nordeste do Rio Grande do Sul.

Figura 2 - Mapa das bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul.



Fonte: SEMA (2021).

1.3.3 Geomorfologia

Segundo o Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (2020), no estado existem unidades geomorfológicas bem definidas: o Planalto Meridional, a Depressão Central, o Escudo Cristalino Sul-riograndense e a Planície Costeira. A área de estudo está inserida no Planalto Meridional, localizado a norte do estado, e é formado por “rochas basálticas decorrentes de um grande derrame de lavas ocorrido na era Mesozoica” e suas bordas correspondem à Serra Geral. A nordeste do planalto estão as maiores altitudes, chegando a 1.398 metros no município de São José dos Ausentes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Geologia

O conhecimento geológico tem constante evolução e graças a isso podemos explicar a formação das grandes massas continentais do nosso planeta. Segundo Hasui (2010, p. 143), a origem da atual configuração dos continentes para a geologia moderna se explica através de ciclos fragmentando e reaglutinando supercontinentes:

“Mais recentemente com o reconhecimento de que supercontinentes se formaram, fragmentaram e reaglutinaram, introduziu-se o Ciclo dos Supercontinentes. Esses conceitos englobam processos de: (1) fragmentação de um supercontinente, deriva de massas continentais e abertura de oceanos em regime distensivo (envolvendo adelgaçamento litosférico, soerguimento, rifteamento, intrusões intraplaca, formação da dorsal meso-oceânica e oceanos, separação de massas continentais e desenvolvimento de margens passivas); (2) convergência e aglutinação de massas continentais em regime compressivo (formação de arcos insulares e continentais, bacias diversas e prismas de acreção, fechamento do oceano, colisão de continentes, orogênese, metamorfismo, magmatismo); (3) exumação ou colapso do orógeno, erosão e consolidação de um novo supercontinente, em condições distensivas.”

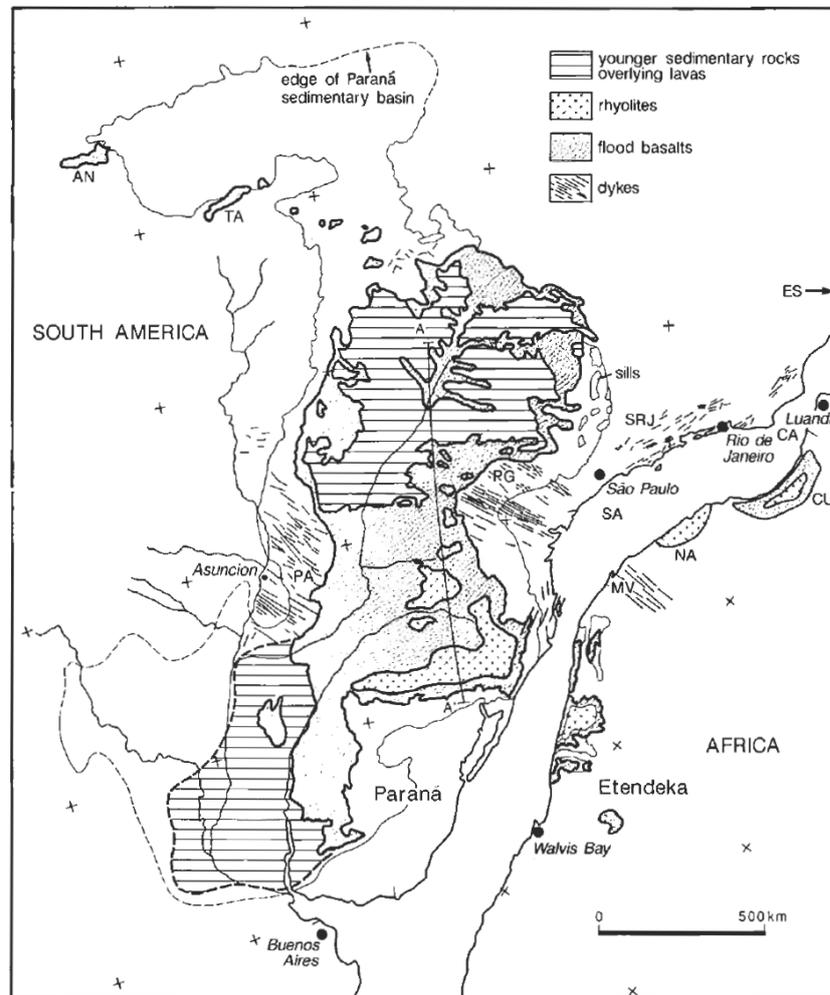
Um dos supercontinentes do planeta incluía grande parte da crosta continental do atual hemisfério sul, o Gondwana, que teve sua parte ocidental fragmentada gerando a abertura do Oceano Atlântico Sul. A separação ocorreu durante o Cretáceo Inferior através de processos distensivos sob influência da anomalia termal gerada pela pluma mantélica de Tristão da Cunha, a cerca de 130 Ma (TURNER et al., 1999). O intenso evento magmático originou a província ígnea Paraná-Etendeka. Ressalta-se que essas grandes províncias magmáticas ou *Large Igneous Provinces* (LIPs) têm como característica o grande volume de rochas ígneas, gerado e depositado durante milhões de anos, com sucessivos derrames de lava basáltica, seja ela de composição ácida ou básica, formando áreas de planalto.

2.1.1 Província Paraná-Etendeka

Segundo Coelho e Chaves (2016) a LIP Paraná-Etendeka “ocupa o sul, centro-oeste e sudeste brasileiro, parte da Argentina e Uruguai (Paraná) e, com menor volume de material magmático, parte da Namíbia (Etendeka)”. A figura 3

ilustra a fase inicial da abertura do Oceano Atlântico Sul, onde é possível ver a distribuição do grande pacote basáltico entre os dois continentes.

Figura 3 - Mapa da fase inicial da abertura do Atlântico Sul.



Fonte: Peatte (1997, p. 219).

Na figura também é possível observar a localização dos enxames de diques alimentadores, que foram fundamentais para o deslocamento da lava desde a pluma até o topo dos derrames, e a composição bimodal do magmatismo Paraná-Etendeka. Para Peatte (1997), existe um domínio de mais de 90% de basaltos toleíticos típicos desses locais de características básicas a intermediárias. Porém, existem quantidades relevantes de riolitos e riodacitos com composições mais ácidas encontradas ao longo da Margem Continental Brasileira e no Etendeka.

A composição ácida pode gerar basaltos vesiculados. As vesículas e amígdalas são cavidades com formato de bolhas geradas pelo gás presente na lava. São mais comuns no topo dos derrames devido à sua densidade, pois o gás tende a

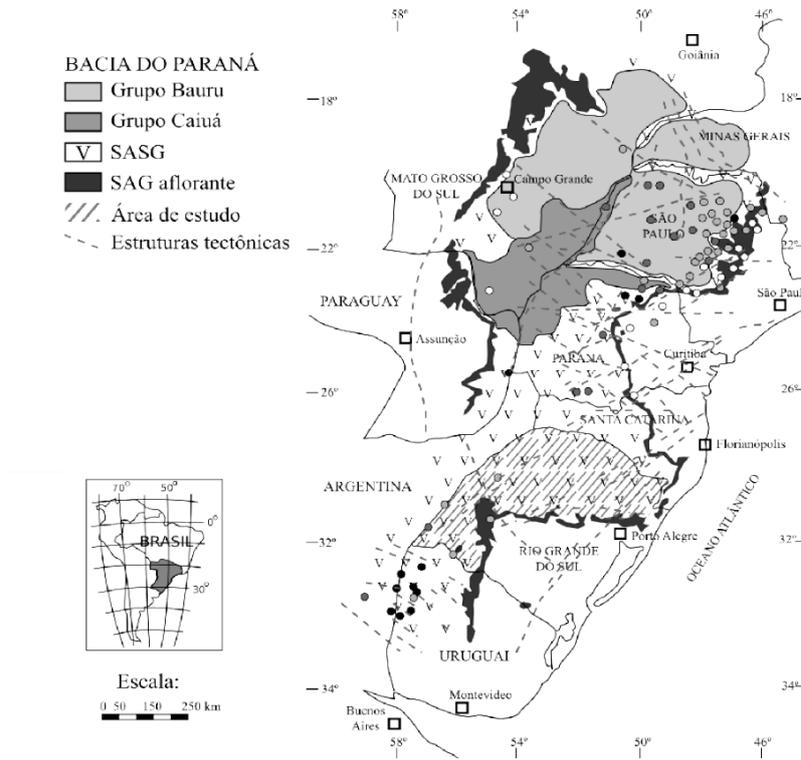
subir facilitando a liberação para a atmosfera. Estas estruturas podem ser preenchidas ou não por material secundário rochoso como a zeólita, ou muitas vezes utilizado como locais de percolação de água quando apresentam tamanho e conexão.

Coelho e Chaves (2016) descrevem petrograficamente as rochas da LIP, tanto na Bacia do Paraná quanto Etendeka, como “holo ou hipocristalinas afaníticas, de coloração cinza, com tons esverdeados e avermelhados, textura intergranular a intersertal (presença de vidro), às vezes vesiculares e amigdaloidais”; ainda segundo os autores, os principais minerais encontrados são plagioclásio, piroxênio e olivina.

2.1.2 Grupo São Bento

O Grupo São Bento está inserido na Bacia do Paraná, uma grande bacia localizada dentro do cráton no leste da América do Sul, com rochas predominantemente sedimentares formadas do Ordoviciano ao Cretáceo (LOPES et al., 2003). O Grupo São Bento é dividido na Formação Botucatu, composto por rochas sedimentares do Jurássico Superior, e Formação Serra Geral, formada por rochas vulcânicas do Cretáceo Inferior oriundas da LIP Paraná-Etendeka. A figura 4 apresenta a localização da Bacia do Paraná, assim como a localização do SASG.

Figura 4 - Localização da Bacia do Paraná e do SASG.



Fonte: Modificado de Nanni (2000, p. 23).

A figura 5 apresenta uma síntese litoestratigráfica do Permiano ao Cretáceo da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul, com a divisão das formações Botucatu e Serra Geral.

Figura 5 - Litoestratigrafia do Permo-Cretáceo da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul.

PERÍODO	GRUPO	FORMAÇÃO	SEQÜÊNCIAS DEPOSICIONAIS
Cretáceo Inferior	São Bento	Serra Geral	Rochas vulcânicas
Jurássico Superior		Botucatu	IV Botucatu
Triássico	S	Caturrita	III Mata
	M	Santa Maria	
	I	Sanga do Cabral	I Sanga do Cabral / Rio do Rastro
Permiano	Passa Dois	Rio do Rastro	<i>Seqüência Neopermiana – Eotriássica</i>

Grupos Passa Dois inferior, Guatá e Itararé indivisos

Fonte: Modificado de Faccini (2000).

2.1.3 Formação Botucatu

A Formação Botucatu é atribuída ao Jurássico Superior e tem rochas areníticas quartzosas a subarcoseanas de composição relativamente homogênea. Para Betiollo (2006), a homogeneidade é atribuída ao transporte eólico do extenso deserto de paleodunas do local. Ainda segundo o autor, a área abrange um total de 1.500 km² ocupando os países do Uruguai, Paraguai, Argentina e Brasil. O pacote sedimentar tem espessura variável, podendo chegar a 100 metros, mas sua área é pequena comparado à sua real extensão, isso porque os sedimentos estão recobertos pela Formação Serra Geral (BETIOLLO, 2006).

2.1.4 Formação Serra Geral

Após à abertura do Oceano Atlântico, a plataforma Sul-Americana manteve um caráter ascensional acumulando derrames da Formação Serra Geral até alcançar o ajuste isostático. Na Bacia do Paraná, Segundo Giampá e Souza (1982, p. 4), os derrames basálticos estão interdigitados ou sobrepostos aos arenitos da Formação Botucatu:

“Os derrames basálticos da Bacia do Paraná são constituídos por rochas ígneas efusivas do Grupo São Bento. O Grupo São Bento de idade jurássico-cretácea divide-se em dois pacotes distintos: Formação Botucatu Pirambóia, mais antiga de natureza flúvio-eólica e Formação Serra Geral com basaltos toleíticos...”

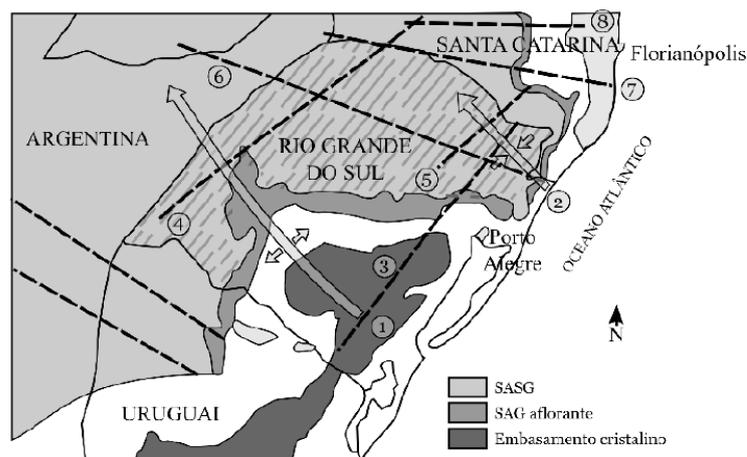
Conforme Betiollo (2006, p. 42) “o pacote vulcânico está sobreposto discordantemente sobre os arenitos eólicos da Formação Botucatu (Formacion Tacuarembó no Uruguai, e sobre a Etjo Formation na Namíbia) mas pode ocorrer localmente [...] no limite meridional da Bacia do Paraná”. As rochas vulcânicas da Formação Serra Geral formam um pacote de 20.000 km³, com predomínio de riocacitos e basaltos (SCHWANCK, 2009).

Leinz (1949) realizou estudos no nordeste do estado do Rio Grande do Sul, entre os municípios de Três Forquilhas e São Francisco de Paula. Ele identificou ao todo 13 derrames distintos desde o contato com o embasamento: ocorrência de intercalação entre zonas vítreas e cristalinas, que indicam basaltos característicos da Formação Serra Geral; e, zonas vesiculares, corroborando a presença de lavas ácidas e indicando a existência dos riocacitos como litologia presente.

Schwanck (2009), descreve um forte controle de estruturas rúpteis na topografia da Formação Serra Geral, atribuindo às reativações tectônicas que ocorreram após a abertura do Atlântico Sul. As estruturas rúpteis são lineamentos tectônicos como as juntas, com formas, direções e tamanhos variados dependendo da natureza de sua origem. Uma fratura é o rompimento da homogeneidade do corpo rochoso através de rupturas sem deslocamento entre os blocos envolvidos, enquanto as falhas geológicas são fraturas planas ou curvilíneas com deslocamento relativo entre os blocos (SIGEP, 2021).

No Rio Grande do Sul existem grandes lineamentos tectônicos com direções predominantes NW e NE (Figura 6), e outras milhares de estruturas secundárias que seguem este padrão direcional.

Figura 6 - Lineamentos tectônicos principais do sul da Bacia do Paraná: Arco de Rio Grande (1); Sinclinal de Torres (2); Leão (3); Lancinha-Cubatão (4); Perimbó (5); Torres-Posadas (6); Rio Uruguai (7) e Taquara Verde (8).



Fonte: Nanni (2008, p. 32).

Fernandes & Melo (2005) atribuíram a natureza das estruturas rúpteis da Formação Serra Geral principalmente aos eventos da tectônica cenozóica. Um dos eventos foi descrito com natureza extensional e com σ_3 de direção NNW, capaz de gerar fraturas NE-ESE. Conforme Fernandes et al., (2006), atualmente essas fraturas se encontram mais abertas, influenciando diretamente na eficácia do fluxo de água subterrânea. Os estudos dos paleo-esforços realizados por Fernandes et al. (2006) em rochas da Formação Serra Geral indicam 5 trends principais de direções das fraturas: 3 trends apresentam direção NW e 2 trends apresentam direção NE.

2.1.5 Reservatório Fraturado SASG

A área de estudo foi selecionada por seu tipo específico de reservatório subterrâneo, chamado aquífero fraturado ou SASG. O aquífero tem área total estimada de 1.000.000,00 km² e sua espessura varia de poucos metros a 1.000 metros no Rio Grande do Sul, e 1.500 metros no Paraná. O SASG é encontrado nos lineamentos tectônicos. Sua permeabilidade e transmissividade aparente ocorre graças à junção de fraturas e falhas muitas vezes sobrepostas e transpostas, somadas a estruturas secundárias de resfriamento como as zonas de brechas ou arenitos inter-derrames. Os arenitos inter-derrames são arenitos intercalados aos derrames basálticos, vesículas, amígdalas ou disjunções do corpo rochoso. A figura 7 compara um esquema com as estruturas presentes no SASG e uma imagem onde é possível identificar algumas destas estruturas.

Figura 7 - Estruturas presentes no SASG.

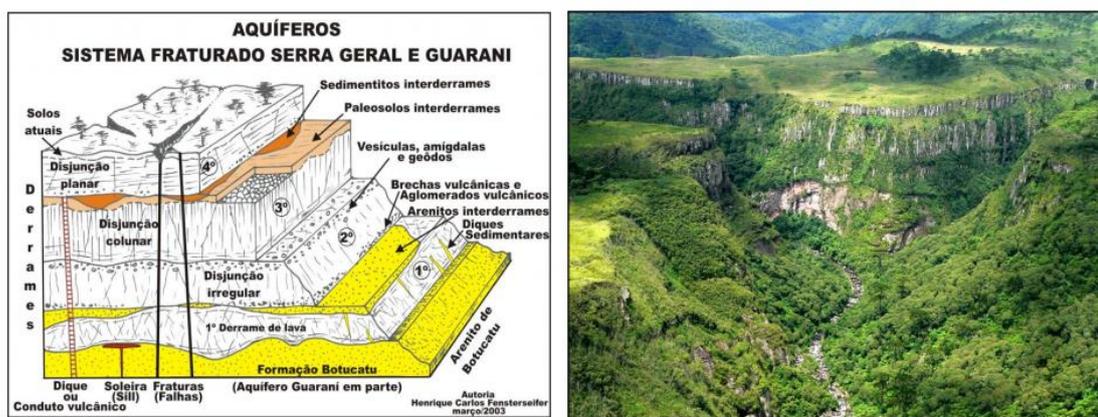


Foto: Carlos Henrique Fensterseiffer

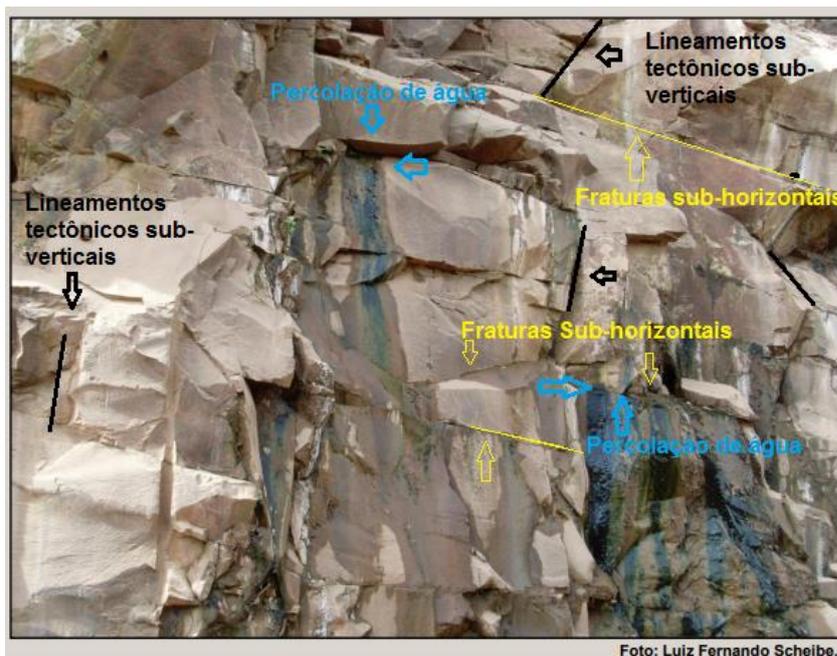
Fonte: Sheibe & Hirata (2008, p. 3) - Foto: Carlos Henrique Fensterseiffer.

A circulação de água do SASG é controlada pela densidade dessas estruturas. A densidade é altamente relevante, pois quando ocorrem muitos lineamentos tectônicos associados a vários derrames empilhados e separados por brechas, existe uma grande chance de ocorrer boas vazões de água e alto nível de potencial explorável, ou seja, reservatórios com alta capacidade de armazenamento e exploração. A vazão específica, que considera a área do reservatório, varia entre 0,08 e 50 m³/h/m, com uma média em torno de 1,0 m³/h/m (SILVA et al., 2013).

Segundo Bittencourt et al. (2003, p. 1), "As águas nos basaltos estão armazenadas nas estruturas tectônicas, pelas quais ocorre sua circulação. Na

ausência de mistura com águas de aquíferos subjacentes, as águas deste aquífero são de excelente qualidade[...]”. A figura 8 apresenta a percolação de águas através de fraturas sub-horizontais no basalto do SASG, que fica localizado na subestação UHE Foz do Chapecó-RS.

Figura 8 - Fraturas sub-horizontais com percolação de água em basalto.



Fonte: Modificado pelo autor de Rede Guarani Serra Geral-SC/UFSC (2021, p. 17).

Os reservatórios do SASG dependem da recarga para repor o recurso utilizado pelo homem ou extravasado por nascentes naturais nas zonas de descarga. Ao observar as formas de recarga, além da precipitação atmosférica, também ocorrem descontinuidades geológicas internas entre o SASG e outros aquíferos, como o Sistema Aquífero Guarani (SAG). As águas destes outros aquíferos ascendem pela elevada pressão hidráulica promovendo a recarga no SASG (BITTENCOURT et. al., 2003). A pressão citada ocorre devido ao tamanho e peso do pacote rochoso localizado acima dos demais, onde a sequência de derrames alcança aproximadamente 1.000 m de espessura nas regiões centrais da Bacia da Paraná (REBOUÇAS, 1994).

2.3 Vulnerabilidade

Na hidrologia, a vulnerabilidade trata da identificação das fragilidades que um sistema ou corpo hídrico pode estar exposto em relação às possíveis contaminações externas. Neste trabalho, é importante identificar essas fontes de contaminação, permitindo a avaliação prévia e parcial da qualidade ou potabilidade da água que se espera encontrar no reservatório hídrico pertencente ao SASG. Desta forma, a finalidade proposta de abastecimento rural seja garantida de maneira plena.

A qualidade do aquífero do SASG está ligada principalmente às ações antrópicas, ou seja, a forma como utilizamos e descartamos a água e efluentes pode interferir não apenas nas águas superficiais dos corpos hídricos, mas também pode resultar em infiltrações no lençol freático, que é um reservatório subsuperficial de águas pluviais e forma conexão com o aquífero. Para Scheibe & Hirata (2008) a qualidade das águas subterrâneas está diretamente relacionada com a vulnerabilidade. Eles observam fatores relevantes como o uso e ocupação do solo, e ainda a construção dos poços.

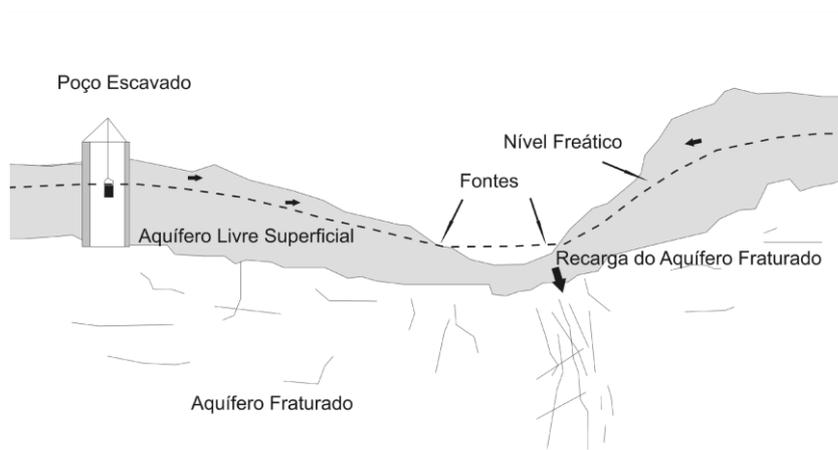
As causas naturais também podem afetar a qualidade da água, mas o que predomina é a ação do homem. Segundo Reginato & Ahlert (2013, p. 32): “[...] alguns problemas afetam a qualidade e estão relacionados a causas naturais (altos teores de ferro, manganês e fluoretos) ou antrópicas (contaminação química e bacteriológica).” As práticas poluidoras de uso de água não são exclusivas da região norte do estado do Rio Grande do Sul, toda a extensão do SASG apresenta ações antrópicas semelhantes, com discernimentos entre as regiões de áreas rurais frente aos grandes centros urbanos. O principal risco em áreas urbanas é o volume expressivo de resíduos gerados e não tratados, seja ele doméstico ou industrial.

Nas áreas rurais o maior consumo está relacionado à irrigação das monoculturas e a principal fonte de contaminação são os pesticidas e fertilizantes utilizados nas lavouras. O planalto nordeste do Rio Grande do Sul e, mais especificadamente, a região da área de estudo, tem monocultura de batatas, que requer volume significativo de pesticidas. Outros exemplos de agricultura intensiva que visa alta produtividade são: cenoura, verduras como o repolho, e grãos como soja e milho.

As águas do SASG são exploradas através de poços relativamente rasos, em alguns casos inferiores a 100 metros de profundidade, ou então os poços são

perfurados até o lençol freático, que na Formação Serra Geral pode ocorrer entre 4 e 100 metros de profundidade (SILVA et al., 2013). Devido à esta variação, as perfurações muitas vezes podem criar ligações diretas entre as águas superficiais e o aquífero. Isso torna o recurso mais acessível, mas também eleva o nível de vulnerabilidade aos processos de contaminação tanto pelas fraturas das rochas, quanto por defeitos durante a construção dos poços. A figura 9 mostra a possível variação dos níveis freáticos e do aquífero fraturado.

Figura 9 - Variação do nível do aquífero fraturado.



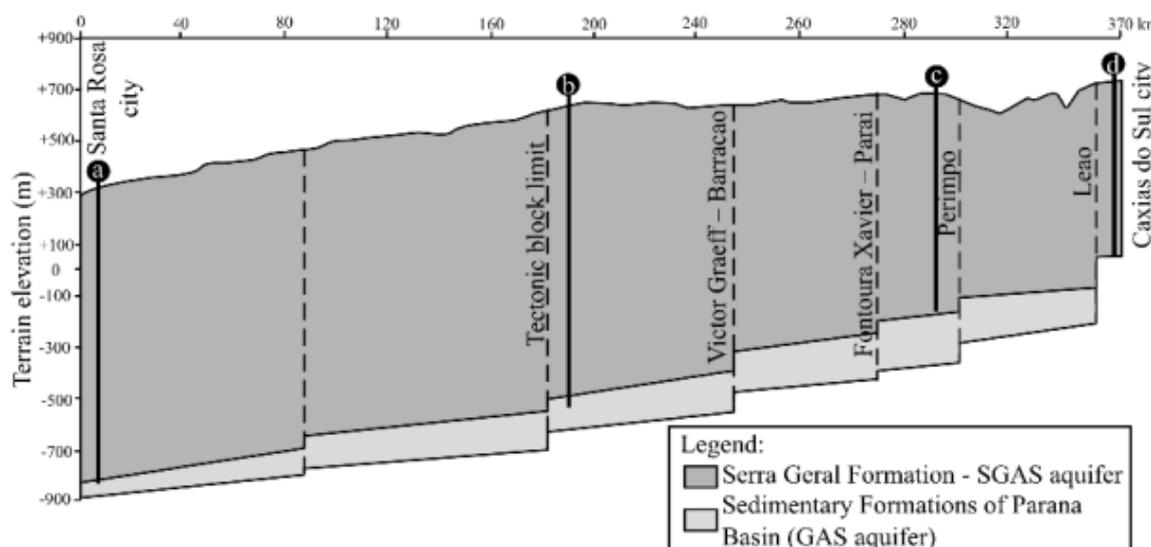
Fonte: Nanni et al. (2005, p. 4).

É interessante identificar o contato entre aquíferos quando analisamos a vulnerabilidade do SASG, pois a contaminação presente em um reservatório pode infiltrar em outro, expondo os dois aquíferos (REGINATO et al., 2013). O reservatório do SASG apresenta indícios de conexão a outros sistemas como o SAG, que tem característica granular com sistemas de recarga e descarga mais expostos, característica de rochas sedimentares como o arenito. O SAG tem um tamanho expressivo, chegando a 1,2 milhão de quilômetros quadrados, porém apenas uma parte dele se encontra recoberto pelos basaltos do SASG. (CETESB, 2021).

Os locais de ligação entre os dois aquíferos são atribuídos principalmente às falhas e descontinuidades do basalto, que romperam também o corpo rochoso arenítico. A conexão dos reservatórios foi comprovada por Celligoi (1994), através de análises geoquímicas. A composição bicarbonatada sódica de algumas águas captadas em poços do SASG, com profundidades máximas de 200 m, foi atribuída a uma mistura com as águas de aquíferos subjacentes. No norte do estado do Rio Grande do Sul, algumas dessas estruturas de ligação estão presentes como

lineamentos tectônicos com direções predominantes NW e NE. Estes lineamentos são responsáveis pelo rebaixamento gradual dos terrenos de leste para oeste, devido à acomodação de blocos. A figura 10 apresenta as principais estruturas subterrâneas que conectam o SASG e o SAG entre as cidades de Caxias do Sul e Santa Rosa.

Figura 10 - Principais estruturas entre os aquíferos de Caxias do Sul-RS e Santa Rosa-RS.



Fonte: Nanni (2008, p. 62).

A falta de estudos no aquífero pode ser considerada uma vulnerabilidade. Apesar do investimento necessário representar um impedimento para os órgãos competentes, a utilização da geoquímica e geofísica poderia auxiliar na identificação das conexões internas e das zonas de recarga, indicando pontualmente locais mais vulneráveis às ações poluidoras e prolongando a qualidade dos aquíferos de uma maneira geral. Para Reginato & Ahlert (2012, p. 33) “[...]a maneira correta de proteção dos aquíferos é através dos estudos de vulnerabilidade e de avaliação do risco à contaminação.”.

A CETESB do governo do estado de São Paulo analisou a qualidade da água do SASG; o resultado não apresentou variações significativas de 2001 a 2006, evidenciando que as ações antrópicas ainda não estavam alcançando o aquífero. As tabelas 1 e 2 apresentam o resultado completo deste estudo, atestando a potabilidade do SASG na região de estudo da CETESB.

Tabela 1 - Dados de qualidade das águas subterrâneas do SASG - 2001-2003.

Parâmetro	Unidade	Padrão Portaria MS nº1469/00	Sistema Aquífero Serra Geral (10 poços)		
			Amplitude de Variação	Mediana	3º Quartil (75%)
pH	--	6,0-9,5	4,9 - 10,0	7,3	8,1
Temperatura	°C	--	21 - 30	25	27
Condutividade Elétrica	µS/cm	--	11,4 - 247	127	174
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	1000	20 - 242	121	146
Resíduo Seco 180°C	mg/L	--	26 - 237	119	135
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	500	3 - 100	42	59
Alcalinidade Bicarbonato	mg/L CaCO ₃	--	8 - 120	66	79
Alcalinidade Carbonato	mg/L CaCO ₃	--	0 - 80	0	0
Alcalinidade Hidróxido	mg/L CaCO ₃	--	0 - 7	0	0
Carbono Orgânico Dissolvido	mg/L C	--	<1 - 13,9	1,8	5,2
Alumínio Total	mg/L Al	0,2	<0,01 - 0,34	<0,01	0,03
Arsênio Total	mg/L As	0,01	<0,002	<0,002	<0,002
Bário Total	mg/L Ba	0,7	<0,005 - 0,11	<0,08	<0,08
Boro	mg/L B	--	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Cálcio total	mg/L Ca	--	0,7 - 29,6	12,1	15,6
Cádmio Total	mg/L Cd	0,005	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Cloreto	mg/L Cl	250	0,25 - 6,0	1,0	1,5
Chumbo Total	mg/L Pb	0,01	<0,002 - 0,008	<0,002	<0,002
Cobre	mg/L Cu	2	<0,01	<0,01	<0,01
Cobalto	mg/L Co	--	<0,01	<0,01	<0,01
Cromo Total	mg/L Cr	0,05	<0,0005 - 0,04	<0,0005	0,004
Ferro Total	mg/L Fe	0,3	<0,01 - 0,63	<0,02	0,02
Fluoreto	mg/L F	1,5	<0,01 - 0,58	0,14	0,26
Magnésio Total	mg/L Mg	--	0,1 - 9,2	3,2	4,6
Manganês Total	mg/L Mn	0,1	<0,002 - 0,01	<0,005	<0,006
Mercúrio Total	mg/L Hg	0,001	<0,0001 - <0,001	<0,0001	<0,0001
Nitrogênio Nitrato	mg/L N	10	<0,01 - 2,43	0,30	0,45
Nitrogênio Kjeldhal Total	mg/L N	--	0,022 - 0,31	0,10	0,15
Níquel	mg/L Ni	--	<0,02	<0,02	<0,02
Potássio	mg/L K	--	0,10 - 4,76	1,4	2,6
Selênio	mg/L Se	0,01	<0,002	<0,002	<0,002
Sódio Total	mg/L Na	200	0,8 - 54,7	10	14
Vanádio	mg/L V	--	<0,02 - 0,11	<0,02	<0,02
Zinco	mg/L Zn	5	<0,01 - 0,15	0,01	0,02
Bactérias Heterotróficas	UFC/mL	500	0 - 290	0	5
Coliforme Total	NC.MF/100 mL	0	0 - 52	0	0
Coliforme Termotolerante	P/A/100 mL	0	0	0	0

Fonte: CETESB-SP (2021).

Tabela 2 - Dados de qualidade das águas subterrâneas do SASG - 2004-2006.

Parâmetro	Unidade	Valor Máximo Permitido VMP	Aqüífero Serra Geral (12 pontos)		
			Mínimos e Máximos	Mediana	3º Quartil
pH	--	6,0-9,5	5 - 10	7,1	7,7
Temperatura	°C	--	16 - 29	25	26
Condutividade Elétrica	µS/cm	--	6,3 - 324	124,1	171,8
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	1000	24 - 294	116	154
Sólidos Totais	mg/L	--	27 - 300	123	170
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	500	0,32 - 65,8	34,1	48,1
Alcalinidade Bicarbonato	mg/L CaCO ₃	--	<2 - 96	58	68
Alcalinidade Carbonato	mg/L CaCO ₃	--	0 - 78	0	0
Alcalinidade Hidróxido	mg/L CaCO ₃	--	0	0	0
Carbono Orgânico Dissolvido	mg/L C	--	<1 - 5,34	1,32	2,8
Alumínio Total	mg/L Al	0,2	<0,01 - 0,2	0,02	0,04
Antimônio	mg/L Sb	0,005	<0,002	<0,002	<0,002
Bário Total	mg/L Ba	0,7	<0,005 - 0,62	0,02	0,03
Boro	mg/L B	--	<0,03	<0,03	<0,03
Cádmio Total	mg/L Cd	0,005	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Cálcio total	mg/L Ca	--	<0,1 - 21,5	10,1	12,5
Chumbo Total	mg/L Pb	0,01	<0,002 - 0,005	<0,002	<0,002
Cloreto	mg/L Cl	250	<0,05 - 4,7	1,2	1,2
Cobre	mg/L Cu	2	<0,01 - 0,05	0,01	0,01
Cromo Total	mg/L Cr	0,05	<0,0005 - 0,05	0,001	0,002
Ferro Total	mg/L Fe	0,3	<0,01 - 0,4	<0,01	<0,01
Fluoreto	mg/L F	1,5	0,02 - 0,52	0,12	0,18
Magnésio Total	mg/L Mg	--	0,01 - 4,63	1,13	3,21
Manganês Total	mg/L Mn	0,4	<0,005 - 0,04	<0,005	<0,005
Nitrogênio Nitrato	mg/L N	10	<0,05 - 8,88	0,3	0,66
Nitrogênio Nitrito	mg/L N	1	<0,001 - 0,02	0,004	0,004
Nitrogênio Amoniacal Total	mg/L N	--	<0,023 - 0,6	0,05	0,05
Nitrogênio Kjeldhal Total	mg/L N	--	<0,03 - 0,8	0,15	0,24
Potássio	mg/L K	--	<0,1 - 6,89	1,2	2,1
Sódio Total	mg/L Na	200	0,24 - 56,3	5,8	16,2
Sulfato	mg/L SO ₄	250	<10	<10	<10
Zinco	mg/L Zn	5	<0,01 - 1,06	0,01	0,02
Bactérias Heterotróficas	UFC/mL	500	0 - 476	0	5

Fonte: CETESB-SP (2021).

Levando em conta os dados apresentados até aqui comparados à localização da área de estudo no interior do município de São Francisco de Paula, é possível descartar algumas fontes de contaminação e analisar a possível ocorrência de outras através da análise estrutural e local. Para um estudo mais avançado seriam

necessárias avaliações químicas nas águas dos poços da região, as quais não existem até o momento.

2.4 Geofísica de Prospecção

Os métodos geofísicos de prospecção estudam estruturas e corpos delimitados pelos contrastes de alguma propriedade física com as do meio circundante, com finalidades variadas como a identificação litologias, plumas de contaminação, hidrocarbonetos e águas subterrâneas. Para Soares (2017, p. 4) “dentro das geociências, utiliza-se geofísica principalmente para exploração de hidrocarbonetos, com investigações de alguns quilômetros de profundidade. Já as aplicações para água subterrânea se limitam geralmente aos 250 m abaixo da superfície[...]”. Braga (2006, p. 1) ressalta a importância dessa ferramenta para questões relacionadas às águas subterrâneas:

“A Geofísica, cujas metodologias ao longo dos anos têm sido aperfeiçoadas e adaptadas em função da solicitação crescente nos mais variados campos de atuação, tem nas questões relacionadas às águas subterrâneas, um papel de extrema importância, tanto em estudos visando à captação para abastecimento, como estudando e solucionando problemas decorrentes de contaminações através de fontes variadas.”

Dentro desse contexto existem os métodos geoeletricos. Braga (2006, p. 1) afirma que além do emprego hidrogeológico “métodos geoeletricos apresentaram uma evolução na obtenção e tratamento dos dados, tanto na parte instrumental, como no desenvolvimento de *softwares* visando à inversão dos dados de campo para obtenção de modelos mais precisos e confiáveis”. O modelo geofísico tem vantagens quando comparado a outros métodos, sendo uma delas o diagnóstico não invasivo, avaliando a subsuperfície sem a necessidade de perfurações e amostragens físicas, reduzindo significativamente os gastos com sondagem aplicadas em locais incorretos, além de apresentar resultados rápidos e eficazes desde que aplicados corretamente (BRAGA, 2016).

2.4.1 Eletroresistividade (ER)

A ER se destaca como um importante método elétrico na geofísica de prospecção de águas. A ER funciona com a transmissão de fonte artificial de

corrente elétrica contínua ou de baixa frequência através do solo, por meio de um par de eletrodos fincados no local escolhido. A diferença de potencial do meio é medida por outro par de eletrodos inseridos em local previamente determinado, dependendo da profundidade da camada investigada (GANDOLFO, 2007).

Braga (2016, p. 17) cita que o princípio da ER “está baseado na determinação da resistividade elétrica dos materiais que, juntamente com a constante dielétrica e a permeabilidade magnética, expressa fundamentalmente as propriedades eletromagnéticas dos solos e rochas.”. Braga (2016, p. 17) ainda cita alguns exemplos práticos no meio geológico:

“Os diferentes tipos de materiais existentes no ambiente geológico apresentam como uma de suas propriedades fundamentais a resistividade elétrica, parâmetro físico aplicável para caracterização da integridade física de materiais geológicos, em termos de alteração, fraturamento, saturação etc., além de possibilitar a identificação de litotipos sem a necessidade de amostragem ou reconhecimento direto.”

A heterogeneidade do meio permite a identificação das diferentes propriedades resistivas entre as composições de solos, rochas, fluídos e estruturas tectônicas. Soares (2017, p. 1) cita que é importante analisar o método utilizado, afirmando que: “Diversas são as técnicas elétricas (ou geoeletricas) aplicadas na pesquisa geofísica para locação de poços tubulares, entre elas a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e o Caminhamento Elétrico (CE) [...]”. Dentro das técnicas de SEV e CE existem diferentes arranjos de eletrodos, entre eles os principais são os arranjos Werner, Schlumberger e Dipolo-dipolo (Braga, 2016). O arranjo dipolo-dipolo foi utilizado no presente estudo e será melhor abordado no capítulo seguinte.

O CE consiste na técnica de investigação horizontal, impactando em profundidade determinada a partir de medidas aplicadas na superfície do terreno. Assim, o método é adequado à prospecção de águas subterrâneas em aquíferos fraturados ou cristalinos. De acordo com Gallas (2003, p. 45),

“A finalidade do caminhamento resistividade é estudar principalmente as variações laterais da resistividade do subsolo, sendo muito adequado para detectar contatos geológicos verticais ou inclinados, mineralizações, diques, fraturamentos e/ou falhamentos e outros corpos ou estruturas que se apresentem como heterogeneidades laterais deste parâmetro. Pode ser também utilizada na caracterização de aquíferos e de depósitos de areias e cascalhos, delineando os seus limites.”

Braga (2006, p. 28) cita o CE como técnica adequada para investigação de lineamentos tectônicos:

“A técnica do caminhamento elétrico – CE, aplica-se principalmente, em situações cujos objetivos das pesquisas visam determinar descontinuidades laterais dos materiais geológicos em subsuperfície, tais como: diques e "sills", contatos geológicos, fraturamentos e/ou falhamentos, corpos mineralizados, etc..”

No estudo de casos de aquíferos fraturados, Soares (2017) utilizou a técnica do CE, chamado Imageamento Elétrico Multi-eletrodos à geometria variável. Segundo Soares (2017, p. 1), a técnica funciona de maneira automatizada:

“[...] basicamente trata-se da aquisição automatizada e com maior número de valores obtidos de resistividade aparente do subsolo permitindo gerar uma “imagem” 2D da variação de resistividade em subsuperfície. A técnica é multi-eletrodos, por utilizar diversos polos simultaneamente permitindo além da maior quantidade de dados, uma maior velocidade de aquisição.”

Orellana (1972) afirma que o método geofísico de ER com quatro eletrodos tem um resultado real médio de resistividade se aplicado em um meio homogêneo, mas é possível compreender que na realidade o meio natural é heterogêneo e, portanto, suas medições devem considerar uma resistividade aparente (ρ_a). Conforme Braga (2006), a resistividade aparente (ρ_a) é a variável equivalente a medida de alguns métodos geoeletricos, cuja medida é a base da interpretação dos resultados. A resistividade aparente (ρ_a) depende da passagem de uma corrente contínua de intensidade (I) pelo meio (Figura 11). Essa corrente é transmitida por dois eletrodos (A e B) ligados à uma fonte externa de energia artificial. Dois eletrodos (M e N) medem a diferença de potencial (ΔV), e a resistividade aparente (ρ_a) é encontrada através da seguinte equação, em que o coeficiente K depende das dimensões entre A, M, N e B:

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

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$

Para a configuração de quatro eletrodos (AB e MN), pode ser aplicado o cálculo do potencial elétrico com a seguinte expressão:

$$\Delta V = K \cdot \frac{\rho \cdot I}{2\pi R}$$

Onde:

ρ = resistividade elétrica (ohm.m)

ρ_a = resistividade elétrica aparente (ohm.m)

K = coeficiente geométrico (m)

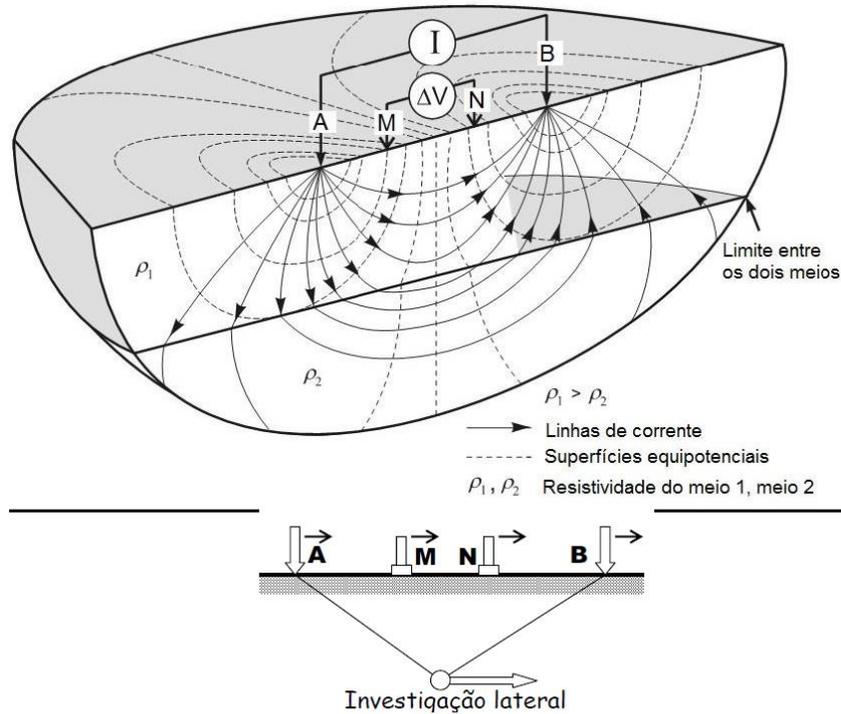
ΔV = diferença de potencial entre os eletrodos M e N (mV)

I = intensidade de corrente que passa entre os eletrodos A e B (mA)

R = espaçamento entre o eletrodo de corrente e o ponto no qual o potencial é medido (m)

A figura 11 demonstra o princípio geofísico de ER com o arranjo de quatro eletrodos. A parte superior demonstra a configuração prática das variáveis do cálculo citado no parágrafo anterior, enquanto a parte inferior representa um modelo simplificado do CE, onde o espaçamento entre os eletrodos varia de acordo com o nível de profundidade almejado. A partir desse princípio, os eletrodos são realocados quantas vezes for necessário, de acordo com o comprimento escolhido como alvo do levantamento (KNÖDEL et al., 2007; BRAGA, 2006).

Figura 11 - Método da eletrorresistividade com técnica de caminhamento elétrico.



Fonte: Modificado de Knödel et al. (2007) e Braga (2006).

A heterogeneidade do meio é esperada e com a resposta da resistividade desse meio são encontrados parâmetros na literatura para algumas litologias. A tabela 3 apresenta dados extraídos de Braga (2016):

Tabela 3 - Resistividade aparente dos tipos litológicos.

Tipo Litológico	Resistividade (ohm.m)
Argiloso	≤ 20
Argilo-arenoso	20 - 40
Areno-argiloso	40 - 60
Siltito argiloso	10 - 60
Siltito arenoso	10 - 60
Arenoso	10 - 20
Argilito	10 - 20
Arenito	80 - 200
Basalto/Diabásio	200 - 500
Calcário	500 - 1.000
Granito/Gnaiss	3.000 a 5.000
Zona não saturada	100 a 30.000

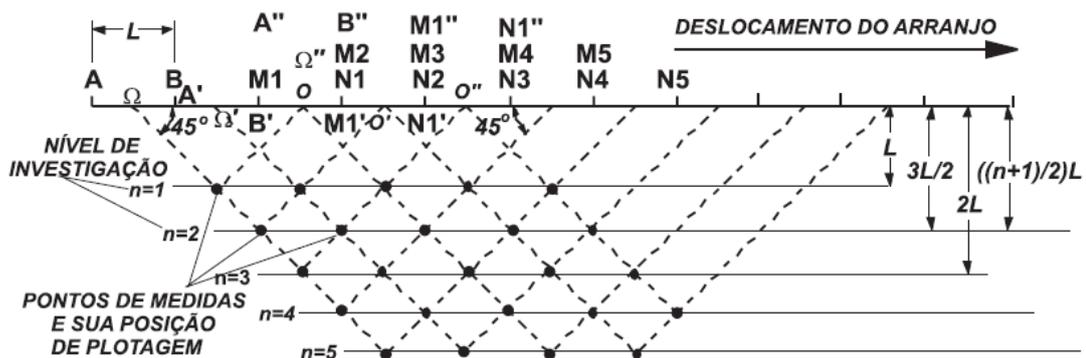
Fonte: Modificado de Braga (2016).

2.4.2 Arranjo dipolo-dipolo

Conforme a literatura, para chegar ao melhor resultado de avaliação de aquífero presente em rochas cristalinas, foi escolhida a técnica do CE com o arranjo dipolo-dipolo. Este arranjo permite mais de 8 níveis de investigação, com qualidade de sinal e sem limitação de pequenas aberturas. Mesmo que apresente pequena perda de definição, o arranjo escolhido registra bem as anomalias condutoras presentes nos lineamentos estruturais (GANDOLFO, 2007; SOARES, 2017).

No arranjo dipolo-dipolo os eletrodos A e B enviam corrente, enquanto os eletrodos M e N, de potencial ou de recepção, estão alinhados no mesmo perfil. A definição dos espaçamentos é: $L = AB = MN$ e a profundidade de investigação cresce com L, que corresponde em teoria a: $L, 3/2L, 2L, \dots, ((n+1)/2)L$ (Figura 12).

Figura 12 - Arranjo dipolo-dipolo.



Fonte: Gallas (2003, p. 46).

O coeficiente geométrico K do arranjo é encontrado pela equação:

$$K_{DD} = 2\pi x \frac{1}{\left(\frac{1}{n}\right) - \left(\frac{2}{n+1}\right) + \left(\frac{1}{n+2}\right)}$$

Gallas afirma que “comumente, as medidas são realizadas em várias profundidades de investigação, isto é, $n = 1, 2, 3, 4$ e 5 , e atribuídas na intersecção das linhas que partem a 45° dos centros de AB (O, O', O'' ...)”. Após cada pulso, o par de dipolos é deslocado na distância equivalente a L, assim “os dados são plotados nas posições $n = 1, 2, 3, \dots$ e interpolados, gerando uma pseudo-seção de resistividade aparente.”

2.4.3 Resistividade em lineamentos tectônicos

Para identificar de maneira eficiente os lineamentos tectônicos, além do método geofísico correto é importante adequar os perfis de levantamento *in loco*. Braga (2006, p. 68) afirma que quando a direção dos lineamentos é conhecida, as linhas de levantamento “devem manter uma direção perpendicular às estruturas de interesse[...]”. Também é importante avaliar previamente as respostas geofísicas que devem ser encontradas. Gallas (2003, p. 44) explica a forma de propagação da corrente elétrica no meio físico:

“Fisicamente, a corrente elétrica propaga-se através dos diferentes materiais dos seguintes modos: eletrônico e iônico. Condução eletrônica é aquela que se verifica nos materiais que possuem elétrons livres, como é o caso dos metais ou dos sulfetos metálicos; também é o modo como se dá nos materiais semicondutores, normalmente maus condutores ou até mesmo isolantes, que possuem poucos ou nenhum caminho que possibilite a passagem de corrente. Condução iônica (eletrolítica) é aquela que ocorre em um eletrólito, onde o fluxo da corrente se processa através de íons.

Soares (2017, p. 8) cita que “[...]o fator predominante de controle da resistividade é a porosidade das rochas, havendo uma relação de que quanto maior a porosidade, menor a resistividade elétrica e vice-versa.”. No contexto basáltico não existe um nível elevado de porosidade, dessa forma Soares (2017, p. 8) ainda afirma que “No caso de rochas cristalinas não há alto grau de porosidade, portanto elas geralmente apresentam valores de resistividade maiores, exceto na presença de falhas ou fraturas onde há passagem de fluidos e argilominerais”.

Estudos de Soares (2017) em rochas cristalinas mostram que uma anomalia de queda pouco acentuada em corpo rochoso não alterado pode indicar a possível presença de fraturas com água dentro de zonas condutivas. Outro indicativo pode ser encontrado na camada intermediária entre as rochas superiores mais alteradas e a possível fissura cristalina da rocha são anômala. Esse nível pode apresentar alterações elevadas, acumulando minerais argilosos responsáveis por uma resistividade elétrica baixa de aproximadamente ≤ 100 ohm.m.

2.5 Sensoriamento Remoto

Em muitos estudos de geociências, assim como neste trabalho, são utilizadas as ferramentas do Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e sensoriamento

remoto (SR), que consiste na avaliação à distância das imagens e demais dados da superfície da Terra com diferentes escalas de aproximação. Para isso, considera-se dados adquiridos por sensores já existentes na literatura como: imagens adquiridas via satélite, fotos retiradas a partir de aviões, além de dados gerados pela parte interessada através de um drone, por exemplo. Em muitos casos o estudo remoto associa informações geofísicas e geoquímicas da literatura, melhorando seus resultados. Através de aplicativos, sites ou *softwares*, as informações obtidas remotamente podem ser tratadas permitindo o desenvolvimento de uma estratégia de trabalho.

Para o presente estudo, a avaliação das imagens aéreas obtidas via satélite foram essenciais. Uma imagem de satélite colorida é composta por um conjunto de pixels de tamanho médio 30X30 metros, combinando as cores azul, verde e vermelho com diferentes comprimentos de onda ou faixas espectrais. Os sensores captam a energia refletida pelos objetos presentes no planeta através de um comprimento de onda. Objetos claros como os solos expostos refletem muita energia, enquanto as águas sem sedimentos ficam escuros pois refletem pouca energia. A vegetação reflete pouca energia na faixa espectral do vermelho porque utiliza essa energia no processo da fotossíntese, e assim apresenta resultado escuro na captação da banda referente ao vermelho. Da mesma forma, a banda do infravermelho próximo recebe alta energia da vegetação em função da estrutura celular das folhas (INPE, 2021).

Para Soares & Fiori (1976, p. 1), “[...] esta parte comunicável da fotointerpretação necessita ser praticada para que se desenvolvam hábitos mentais, aptidões para a identificação e análise dos elementos da imagem.”. Ou seja, além do tratamento correto das bandas através do sensoriamento remoto aliado ao SIG, é importante o autor ter conhecimento prévio das características que o objeto de estudo irá apresentar frente às imagens obtidas.

Ao avaliar os lineamentos tectônicos em rochas cristalinas, as principais características são a presença de vegetação natural alinhada em resposta às regiões mais úmidas ou o aproveitamento das estruturas para a ocorrência de drenagens como arroios ou rios retilíneos. As falhas geológicas se destacam pelo deslocamento dos blocos, normalmente são interrompidas abruptamente por outra estrutura ou corpo mais resistente, em muitas ocorrências a mesma falha segue no bloco seguinte, porém deslocadas alguns metros ou muitos para o lado. É possível

afirmar ainda que as falhas podem estar presentes em linhas de rebaixamento da altitude, formando uma espécie de vales imperceptíveis quando vistos de perto, mas bem marcados quando avaliados na escala correta.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O objeto de estudo é a subsuperfície de uma área rural de aproximadamente 14 hectares no interior do município de São Francisco de Paula. A metodologia aplicada foi a ER por sua aplicabilidade na identificação de lineamentos tectônicos e consequentemente possíveis locais com potencial reservatório hídrico subterrâneo.

3.1 Obtenção das Imagens de Satélite

Os materiais utilizados inicialmente foram as ferramentas de sensoriamento remoto e SIG, com o intuito de mapear as estruturas geológicas. Dentro dessas ferramentas, a primeira foi o Google Earth com estudo prévio da localização e delimitação da área.

Com a localização da área, foi possível obter imagens de satélite junto ao catálogo do DGI-INPE, o qual foram realizadas buscas no satélite Landsar-7 e Landsat-8. O satélite Landsat-8 foi escolhido pela facilidade de busca e qualidade de imagens, com escala de 1:100.000, imagens pixels de 30 metros e bandas de 1 a 9 atualizadas. Após acessar o site do INPE foi feita a busca pelo catálogo de imagens, preenchendo os parâmetros básicos de pesquisa: satélite (LANDSAT-8) (produtos na escala 1:100.000); instrumento: (OLI); data início e data fim (algo irrelevante pois a busca contempla uma estrutura geológica que apresenta mudanças apenas em tempo geológico); qualidade mínima 9 e cobertura máxima 0, para alcançar as melhores imagens possíveis; órbita= 221 e ponto= 80.

Dentro dessa busca foram encontradas 35 imagens e destas foram escolhidas as 4 melhores referente a quesitos como, luminosidade ou ausência de nuvens e fumaça. As 4 imagens foram adicionadas e baixadas via confirmação de e-mail (pedidos 1542966 e 1542967).

3.2 Tratamento da Imagem

O passo seguinte foi o avanço para o *software* ENVI, onde foi escolhido o melhor dos 4 arquivos baixados. A imagem selecionada é datada de 16 de novembro de 2018, 13 horas e 18 minutos denominada: L8-OLI 221/080 2018-11-16. Ela foi trabalhada com as bandas 6 (*red*), 5 (*green*) e 4 (*blue*) dentro das possíveis 2

a 7 (bandas visíveis). Com o comando Stack foi possível salvar a imagem com projeção UTM, Datum WGS-1984 e Zona 22S. A imagem foi cortada em um tamanho adequado para o trabalho de localização dos lineamentos, através do comando *Region Of Interesting* (ROI) e do comando *Subset* para aplicar e salvar a área recortada. A imagem foi recortada centralizando o local de estudo e com uma margem de trabalho confortável permitindo a identificação de lineamentos com poucos metros a alguns quilômetros de comprimento dentro de uma área de aproximadamente 400.000 hectares.

Ainda dentro do *software* ENVI, através da opção DATA MANAGER, foram carregadas as bandas 6, 5 e 4 já recortadas para o início do tratamento com os filtros adequados. As técnicas de filtragem são adequações do nível de cinza dos pixels das imagens através de matrizes ou máscaras com a finalidade de colocar os objetos de estudo em evidência dentro da imagem. Os filtros podem remover ruídos (obstáculos como as nuvens ou a fumaça), reduzir o efeito de bandas menos eficiente ou destacar as bandas mais adequadas.

Alguns filtros utilizados foram: *covolution* passa baixa (suaviza a imagem atenuando transições abruptas e diminuindo ruídos); *covolution* passa alta (realça as transições entre as regiões, como as bordas ou linhas curvas); *covolution* direcional 30 (realça detalhes da imagem e minimiza efeitos de ruídos) e filtros de morfologia (minimiza ruídos, suaviza ou realça bordas mas altera a média da imagem) (INPE, 2021).

Os filtros aplicados não alcançaram resultados melhores do que o carregamento simples das bandas RGB-654 sem filtro. Por esta razão, a opção escolhida foi utilizar a imagem sem filtros específicos.

No ENVI, a imagem escolhida foi extraída em formato TIFF para migrar ao *software* ArcGis. No ArcGis os lineamentos tectônicos foram marcados avaliando as estruturas e alternando entre as escalas de 1:400.000 até 1:10.000 para evidenciar todos os detalhes necessários.

3.3 Identificação das linhas de levantamento geofísico

No *software* ArcGis, a camada com os limites da área de estudo foi carregada sobre a imagem com os lineamentos demarcados. Assim, foi possível avaliar a ocorrência ou não das estruturas viabilizando o andamento do trabalho. Com essas

camadas unificadas, o estudo passou para uma escala mais específica, permitindo a escolha do local de aplicação das ferramentas geofísicas *in loco*.

A partir dessa avaliação foram identificados um lineamento principal e um secundário para aplicação geofísica, o alinhamento secundário foi classificado dessa forma pois suas evidências são menos contundentes e poderá ser descartado. Foi realizada a projeção de duas linhas perpendiculares ao lineamento principal, objetivo do estudo, e uma linha individual transversal ao alinhamento secundário, opcional, uma vez que uma das linhas passa sobre as duas possíveis estruturas. No capítulo 4 as estruturas e suas orientações serão melhor abordadas.

3.4 Levantamento de campo

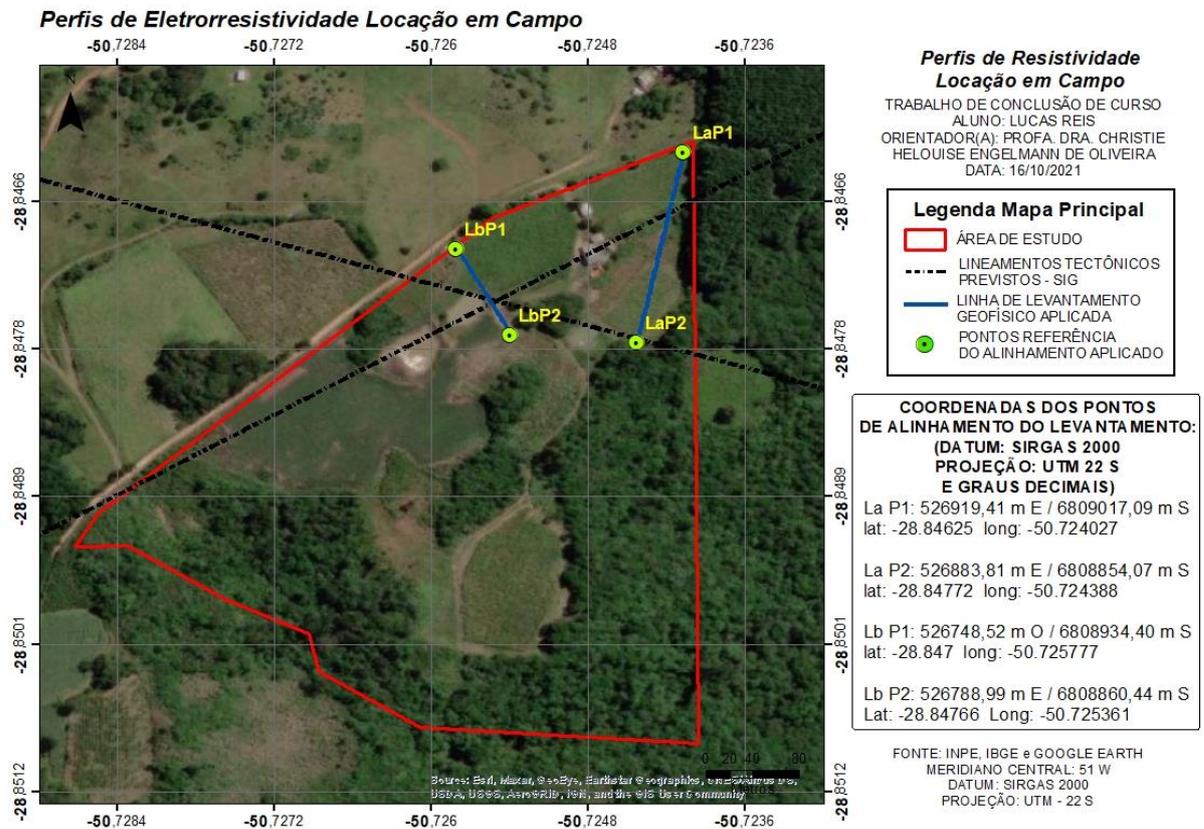
No dia 25 de setembro de 2021 foi realizado o levantamento dos dados geofísicos na área de estudo aplicando a técnica de CE. A técnica de CE através do arranjo dipolo-dipolo (figura 12), tem o alcance de profundidade proporcional ao comprimento de sua linha de leitura, mas sabe-se que os resultados na prática podem ser mais rasos que os cálculos teóricos sugerem.

Desta maneira, para atingir a profundidade necessária, o levantamento (figura 13) foi adaptado à viabilidade do local aumentando-se o comprimento de uma das linhas. A terceira linha, que era opcional, não foi realizada, enquanto a linha um (LaP1-LaP2) foi alongada para 170 metros (figura 14) e a linha dois (LbP1-LbP2) foi realocada, ficando com 85 metros (figura 15). As linhas foram colocadas de acordo com a referência de direções previstas através das ferramentas de sensoriamento remoto, perpendiculares aos lineamentos tectônicos. As coordenadas geográficas foram colhidas utilizando o GPS Portátil Garmin GPSMap 64x.

Os eletrodos necessários para a aplicação do método foram colocados no solo com um espaçamento de 10 metros ($AB=MN=10$) sobre a linha um e 5 metros ($AB=MN=5$) sobre a linha dois. Na linha um, foram aplicados 9 níveis de investigação. Na linha dois foram aplicados dois levantamentos distintos, um deles com 8 níveis de investigação e espaçamento de 5 metros entre os eletrodos, para alcançar maior detalhe na parte superior, e outro levantamento com 6 níveis de investigação e 10 metros entre os eletrodos, para alcançar maior profundidade. A distância média entre a linha um e a linha dois foi de 140 metros, a metragem não é constante pois os perfis não formam uma paralela perfeita podendo variar nas

extremidades, a figura 13 demonstra as linhas do levantamento realizado e suas coordenadas.

Figura 13 - Mapa da área com as linhas de CE aplicadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 14 – Linha um (LaP1-LaP2). Figura 15 - Linha dois (LbP1-LbP2).

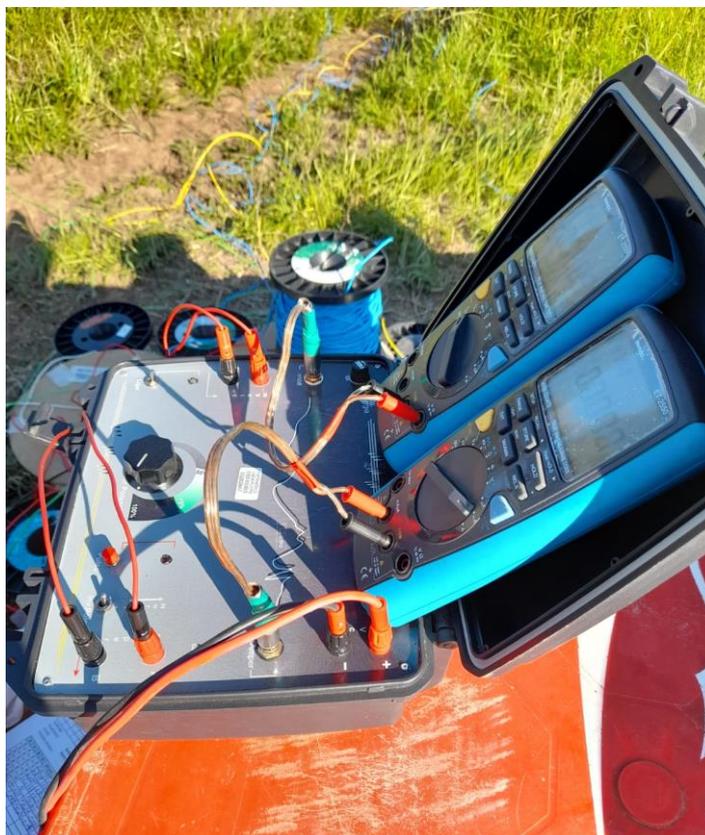


Fonte: Elaborado pelo autor (2021). Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

3.4.1 Obtenção de dados

Os dados dos perfis de eletrorresistividade foram obtidos com o eletrorresistivímetro da Autoenergia, modelo X5xtal Control e 2 multímetros Minipa ET-2550 (figura 16). Em um dos multímetros realizou-se a leitura da corrente elétrica em miliampère (mA), e no outro a diferença de potencial em milivolt (mV). Como fonte de energia foi utilizada uma bateria estacionária de 12 V, permitindo transmitir pulsos com tensão máxima de 500 V e potência de 350 W ao subsolo.

Figura 16 – Eletroresistivímetro modelo X5xtal Control e multímetros Minipa ET-2550.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A carga é distribuída via cabos de cobre revestidos (figura 18) e conectores que são fixados aos eletrodos de corrente A e B, enquanto os eletrodos de potencial M e N são responsáveis por captar as respostas de resistividades do meio. Os eletrodos são fincados no solo com o auxílio de uma marreta e uma trena de 100 m, que permite identificar o ponto correto de cada elemento (figura 19). Com o auxílio de uma prancheta e uma planilha previamente montada em acordo com os parâmetros do levantamento, foi anotado o resultado de cada pulso elétrico emitido. A figura 17 ilustra o levantamento sendo realizado.

Figura 17 – Levantamento sendo realizado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 18 – Cabos de cobre revestidos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 19 – Eletrodos fincados no solo com conector inserido.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

3.5 Processamento de dados

Os dados geofísicos levantados foram transformados em imagens 2d utilizando o *software* Res2dinv64 versão 4.9.18 da empresa Aarhus GeoSoftware. O programa interpreta automaticamente as respostas resistivas do meio através da inversão de dados, colhidas por eletrodos dispostos em uma linha com espaçamentos constantes ou não. O método utiliza blocos retangulares ligados à distribuição dos pontos da pseudo-seção e considera a diferença dos resultados resistivos através de uma técnica de otimização de mínimos quadrados não linear com restrição de suavidade. Assim, é calculada a resistividade aparente dos blocos e apresentada em um modelo de gradação de cores em escala de resultados finitos (LOKE, 2019).

O *software* é alimentado com as informações de campo organizadas em colunas dentro de um arquivo .dat e preenchidas com: título, espaçamento entre eletrodos, número de medidas, coordenada da medida, arranjo utilizado, nível de investigação e resistividade aparente. A resistividade aparente equivale à variação

resistiva vertical e horizontal do subsolo, abaixo da linha de CE, de acordo com os cálculos teóricos já citados em capítulo anterior.

Os modelos obtidos no programa foram gerados de duas formas, sendo uma delas a inversão simples, e a outra uma inversão com suavização das linhas aumentando o detalhamento e facilitando a interpretação. Após a interpretação dos modelos, foi possível fazer um *link* entre as respostas obtidas com a geofísica e as coordenadas geográficas da área de estudo através do software ArcGis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Estudo prévio

A partir da demarcação dos limites da área foi possível realizar um estudo prévio através da ferramenta Google Earth (figura 20). Inicialmente foram identificadas e delineadas algumas estruturas.

Figura 20 - Mapa da área com prováveis lineamentos tectônicos.



Fonte: Modificado pelo autor a partir do Google Earth (2021).

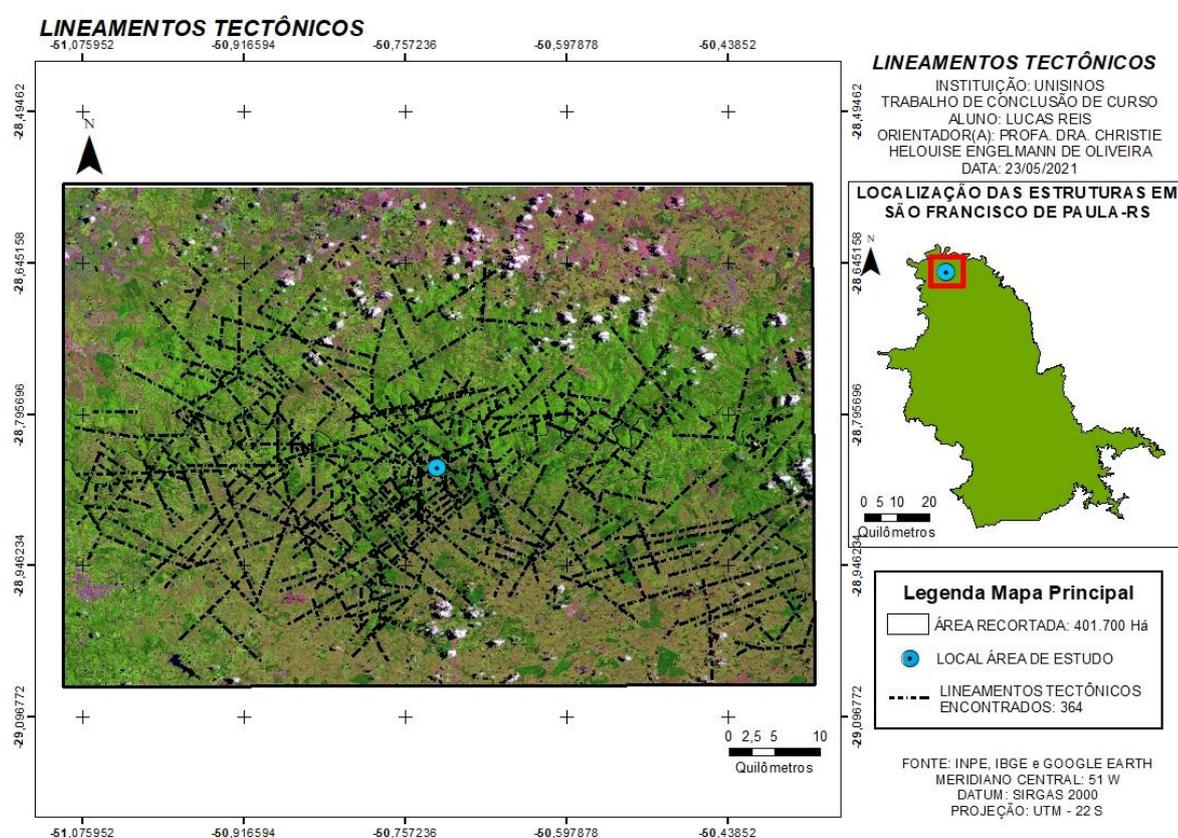
O passo seguinte foi a busca de imagens de satélite com qualidade para o correto tratamento e estudo mais aprofundado. A imagem selecionada é datada de: 16 de novembro de 2018, 13 horas e 18 minutos denominada: L8-OLI 221/080 2018-11-16.

A melhor composição de cores ou RGB foi escolhida carregando as bandas R:6, G:5 e B:4. Foi realizado o corte deixando a imagem com aproximadamente 400.000 hectares para permitir a identificação de todos os possíveis lineamentos tectônicos métricos a quilométricos. Essa imagem foi filtrada para evidenciar as estruturas geológicas e redução de ruídos, porém os filtros aplicados não foram

eficientes e optou-se por utilizar a imagem final sem filtros. O resultado foi salvo em formato compatível com o *software* ArcGis.

No *Software* ArcGis, a imagem foi trabalhada com diferentes níveis de aproximação, resultando no total de 364 lineamentos com domínio de orientações sudoeste-nordeste, sudoeste-nordeste e alguns leste-oeste, conforme encontrado na literatura . A figura 21 apresenta a área com os lineamentos em uma escala de 1:450.000.

Figura 21 - Mapa de lineamentos tectônicos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com os lineamentos marcados, a área foi avaliada em uma escala de detalhe mais apropriada, chegando ao total de duas possíveis estruturas dentro dos 14 hectares de interesse. Os dois lineamentos foram avaliados e classificados de acordo com a localização e viabilidade. A partir dessa avaliação foram identificados um lineamento principal de orientação sudoeste-nordeste e um secundário de orientação sudeste-noroeste (figura 22). Com essas diretrizes o levantamento geofísico foi planejado com duas linhas perpendiculares ao lineamento principal e uma linha opcional individual transversal ao alinhamento secundário, apenas para

sua confirmação, uma vez que uma das linhas transversal ao alinhamento principal também estaria passando sobre o alinhamento secundário. A figura 22 apresenta o local escolhido para aplicação do CE.

Figura 22 - Área escolhida previamente para o levantamento geofísico com os lineamentos tectônicos.

Local dos Perfis de Eletrorresistividade



Local Perfis de Resistividade
 TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
 ALUNO: LUCAS REIS
 ORIENTADOR(A): PROFA. DRA. CHRISTIE
 HELOUISE ENGELMANN DE OLIVEIRA
 DATA: 23/05/2021

Legenda Mapa Principal

- ÁREA DE ESTUDO
- LINEAMENTOS TECTÔNICOS
- LINHA DE LEVANTAMENTO GEOFÍSICO
- PONTOS REFERÊNCIA DO ALINHAMENTO

COORDENADAS DOS PONTOS DE ALINHAMENTO DO LEVANTAMENTO:

(DA TUM: SIRGAS 2000
 PROJEÇÃO: UTM-22 SUL
 E GRAUS DECIMAIS)

LAP1: 526858.31 E / 6809007.49 S
 Lat: -28,846338 Long: -50,724654
 LAP2: 526910.26 E / 6808905.88 S
 Lat: -28,847254 Long: -50,724119
 LBP1: 526751.34 E / 6808939.26 S
 Lat: -28,846956 Long: -50,725749
 LBP2: 526807.99 E / 6808845.52 S
 Lat: -28,847801 Long: -50,725166
 LCP1: 526877.54 E / 6808803.14 S
 Lat: -28,848182 Long: -50,724452

FONTE: INPE, IBGE e GOOGLE EARTH
 MERIDIANO CENTRAL: 51 W
 DATUM: SIRGAS 2000
 PROJEÇÃO: UTM - 22 S

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.2 Estudo aplicado

Ao chegar no local se descartou o levantamento da terceira linha opcional, sendo realizado apenas os dois principais perfis de levantamento e adaptando-se os tamanhos. Os novos pontos de referência nas extremidades das duas linhas do levantamento (figura 13) foram identificados com as coordenadas no Datum SIRGAS 2000 e sistemas UTM 22-S e Graus Decimais conforme a tabela 4:

Tabela 4 - Coordenadas de referência do estudo *in loco*.

NOME DO PONTO	Coordenada X em UTM	Coordenada Y em UTM	Coordenada Graus Decimais Latitude:	Coordenada Graus Decimais Longitude:
---------------	---------------------	---------------------	-------------------------------------	--------------------------------------

LaP1	526919,41 m E	6809017,09 m S	-28,84625	-50,724027
LaP2	526883,81 m E	6808854,07 m S	-28.84772	-50.724388
LbP1	526748,52 m O	6808934,40 m S	-28.84700	-50.725777
LbP2	526788,99 m E	6808860,44 m S	-28.84766	-50.725361

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os resultados das resistividades aparentes obtidos em cada linha foram transcritos para as planilhas de entrada do *software* Res2dinvx64 em forma de colunas. As figuras 23, 24 e 25 mostram o resultado e sua formatação.

Figura 23 – Dados obtidos da linha LaP1-LaP2.

Linha A	NOME	35.00	10.00	3	726.8466	50.00	10.00	6	6546.2024
10.00	DISTANCIA ENTRE ELETRODOS	45.00	10.00	3	550.9265	60.00	10.00	6	551.5022
3		55.00	10.00	3	562.5334	70.00	10.00	6	767.21
94	NÚMERO DE MEDIDAS	65.00	10.00	3	459.1182	80.00	10.00	6	628.7864
1	RESISTIVIDADE APARENTE	75.00	10.00	3	606.8986	90.00	10.00	6	568.7366
0	POSICÃO X	85.00	10.00	3	645.1812	100.00	10.00	6	411.8514
	NÍVEL DE INVESTIGAÇÃO	15.00	10.00	1	776.9199	95.00	10.00	6	272.5823
		25.00	10.00	1	539.4524	105.00	10.00	6	392.894
		35.00	10.00	1	509.0756	115.00	10.00	6	509.3321
		45.00	10.00	1	432.2431	125.00	10.00	7	780.7508
		55.00	10.00	1	454.7042	135.00	10.00	7	1753.8536
		65.00	10.00	1	599.6893	145.00	10.00	7	601.0146
		75.00	10.00	1	718.4973	30.00	10.00	7	590.2197
		85.00	10.00	1	1127.1845	40.00	10.00	7	314.2372
		95.00	10.00	1	1052.3946	50.00	10.00	7	512.1389
		105.00	10.00	1	600.6805	60.00	10.00	7	370.9847
		115.00	10.00	1	192.1713	70.00	10.00	7	495.7045
		125.00	10.00	1	463.1393	80.00	10.00	7	20134.1183
		135.00	10.00	1	62.6128	90.00	10.00	8	1335.7953
		145.00	10.00	1	449.2198	100.00	10.00	8	8167.9788
		155.00	10.00	1	633.5024	110.00	10.00	8	452.5025
		20.00	10.00	2	907.5367	120.00	10.00	8	314.3932
		30.00	10.00	2	889.0844	130.00	10.00	8	367.3979
		40.00	10.00	2	546.6469	140.00	10.00	8	529.8747
		50.00	10.00	2	437.7474	35.00	10.00	8	583.2014
		60.00	10.00	2	479.7733	45.00	10.00	9	1226.2895
		70.00	10.00	2	569.8111	55.00	10.00	9	1606.0814
		80.00	10.00	2	173.4983	65.00	10.00	9	547.4286
		90.00	10.00	2	778.9867	75.00	10.00	9	0
		100.00	10.00	2	753.6996	85.00	10.00	9	0
		110.00	10.00	2	724.2521	95.00	10.00	9	0
		120.00	10.00	2	433.2823	105.00	10.00	9	0
		130.00	10.00	2	473.1881	115.00	10.00	9	0
		140.00	10.00	2	1785.6661	125.00	10.00	9	0
		150.00	10.00	2	452.8297	135.00	10.00	9	0
		25.00	10.00	3	838.1720	40.00	10.00	6	1043.0584

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 24 - Dados obtidos da linha LbP1-LbP2 com espaçamento de 10 metros.

DIPOLO_linhaB10m - Bloco de Notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

Linha B 10m → NOME

10.00 → DISTANCIA ENTRE ELETRODOS

3

21 → NÚMERO DE MEDIDAS

1

0

RESISTIVIDADE APARENTE CALCULADA

POSICÃO X	NÍVEL DE INVESTIGAÇÃO	RESISTIVIDADE APARENTE CALCULADA
15.00	10.00 1	188.8532
25.00	10.00 1	80.8073
35.00	10.00 1	131.6959
45.00	10.00 1	166.7724
55.00	10.00 1	326.2538
65.00	10.00 1	385.6714
20.00	10.00 2	101.1475
30.00	10.00 2	478.8483
40.00	10.00 2	180.1504
50.00	10.00 2	175.4392
60.00	10.00 2	515.4797
25.00	10.00 3	144.7739
35.00	10.00 3	975.7296
45.00	10.00 3	164.5264
55.00	10.00 3	263.5627
30.00	10.00 4	260.0437
40.00	10.00 4	3597.4887
50.00	10.00 4	266.4719
35.00	10.00 5	317.1800
45.00	10.00 5	2706.9731
40.00	10.00 6	406.9687
0		
0		
0		
0		
0		
0		
0		

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 25 – Dados obtidos da linha LbP1-LbP2 com espaçamento de 5 metros.

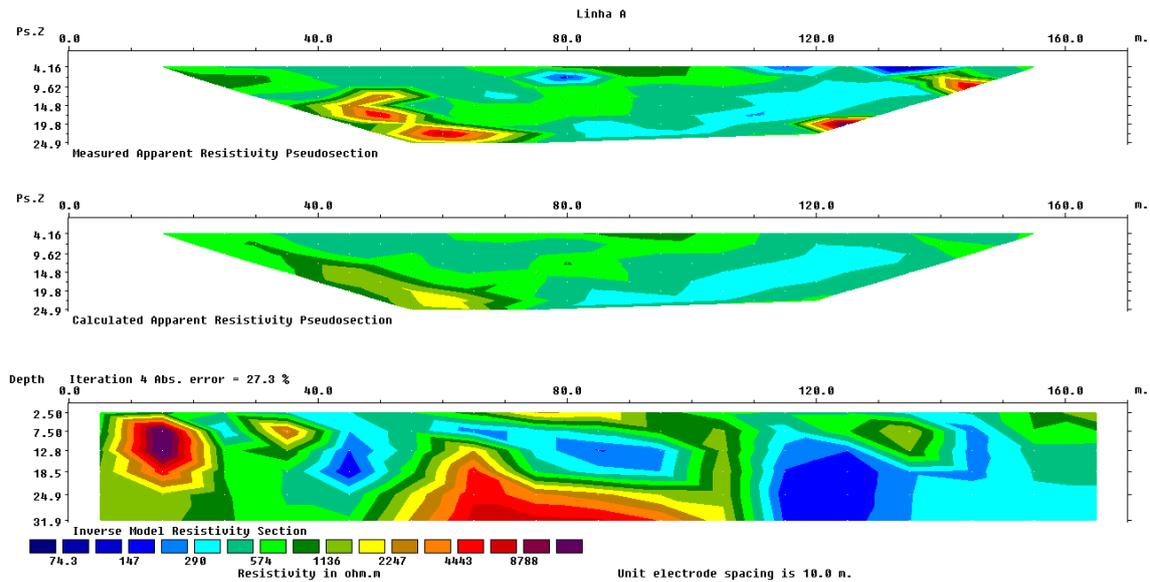
DIPOLLO_linhaB5m - Bloco de Notas				DIPOLLO_linhaB5m - Bloco de Notas				DIPOLLO_linhaB5m - Bloco de Notas						
Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda	Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda	Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda
Linha B 5m		NOME			17.50	5.00	3			2756.0708	25.00	5.00	6	3224.396
5.00		DISTANCIA ENTRE ELETRODOS			22.50	5.00	3			104.8508	30.00	5.00	6	221.4803
3		NÚMERO DE MEDIDAS			27.50	5.00	3			40.558	35.00	5.00	6	254.8358
92		RESISTIVIDADE APARENTE CALCULADA			32.50	5.00	3			54.1467	40.00	5.00	6	162.072
1		POSICÃO X			37.50	5.00	3			139.6548	45.00	5.00	6	166.7429
0		NÍVEL DE INVESTIGAÇÃO			42.50	5.00	3			158.8288	50.00	5.00	6	218.6943
	7.50	1	1135.4827		47.50	5.00	3			177.618	55.00	5.00	6	241.3768
	12.50	5.00	845.5723		52.50	5.00	3			154.3908	60.00	5.00	6	334.4994
	17.50	5.00	398.2851		57.50	5.00	3			517.6861	65.00	5.00	6	716.2737
	22.50	5.00	146.9821		62.50	5.00	3			487.5059	22.50	5.00	7	147.7017
	27.50	5.00	83.2234		67.50	5.00	3			398.0127	27.50	5.00	7	5413.0875
	32.50	5.00	53.8583		72.50	5.00	3			292.1557	32.50	5.00	7	266.2419
	37.50	5.00	44.7374		15.00	5.00	4			105.3342	37.50	5.00	7	265.3723
	42.50	5.00	111.3071		20.00	5.00	4			5876.1042	42.50	5.00	7	127.72
	47.50	5.00	167.3663		25.00	5.00	4			92.2448	47.50	5.00	7	250.356
	52.50	5.00	283.5213		30.00	5.00	4			75.7735	52.50	5.00	7	220.4849
	57.50	5.00	205.8368		35.00	5.00	4			134.6862	57.50	5.00	7	322.3712
	62.50	5.00	185.3119		40.00	5.00	4			187.4426	62.50	5.00	7	133.1925
	67.50	5.00	228.4895		45.00	5.00	4			146.1598	25.00	5.00	8	422.3201
	72.50	5.00	574.6117		50.00	5.00	4			163.0616	30.00	5.00	8	3150.3436
	77.50	5.00	597.4051		55.00	5.00	4			255.7054	35.00	5.00	8	317.3326
	10.00	5.00	41.8801		60.00	5.00	4			576.2814	40.00	5.00	8	206.1642
	15.00	5.00	1251.8307		65.00	5.00	4			675.2831	45.00	5.00	8	247.9442
	20.00	5.00	146.7401		70.00	5.00	4			433.6961	50.00	5.00	8	199.9599
	25.00	5.00	75.4881		17.50	5.00	5			147.4816	55.00	5.00	8	225.2935
	30.00	5.00	255.8907		22.50	5.00	5			405.4684	60.00	5.00	8	282.2327
	35.00	5.00	59.254		27.50	5.00	5			92.1867	0			
	40.00	5.00	110.6294		32.50	5.00	5			123.374	0			
	45.00	5.00	173.0732		37.50	5.00	5			1897.388	0			
	50.00	5.00	163.9895		42.50	5.00	5			179.3595	0			
	55.00	5.00	304.883		47.50	5.00	5			78.5351	0			
	60.00	5.00	388.9902		52.50	5.00	5			266.2991	0			
	65.00	5.00	272.4325		57.50	5.00	5			263.363	0			
	70.00	5.00	294.1198		62.50	5.00	5			767.9897				
	75.00	5.00	458.9715		67.50	5.00	5			617.7619				
	12.50	5.00	82.5118		20.00	5.00	6			157.0212				

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.2.1 Linha LaP1-LaP2

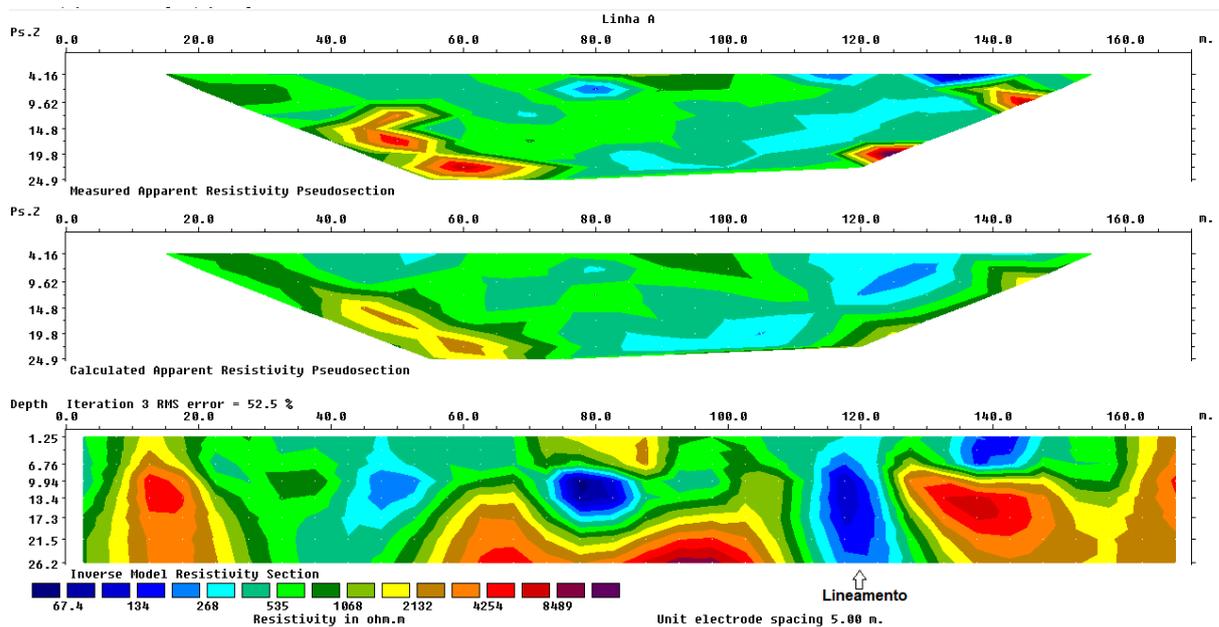
A primeira linha aplicada, denominada LaP1-LaP2, alcançou a profundidade de aproximadamente 31,9 metros na inversão simples. Em seguida, foi aplicado um tratamento nos dados para suavização das linhas, para melhorar a qualidade do resultado alcançando uma profundidade inferior, mas facilitando a interpretação. Essa foi a linha de maior extensão, com um comprimento de leitura de 185 metros. O resultado da interpolação simples pode ser visto na figura 26 e da suavização na figura 27. As discussões apresentadas abaixo são referentes a imagem suavizada.

Figura 26 - Imagem 2d: perfil LaP1-LaP2, sem suavização das linhas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 27 – Imagem 2d: perfil LaP1-LaP2, com suavização das linhas e localização do lineamento tectônico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O primeiro fator a ser observado é a rocha presente. No local está aflorando o basalto da Formação Serra Geral, mas além do basalto foi possível identificar algumas amostras soltas de arenito que podem indicar lentes de intercalação recorrentes na região, conforme já mencionado neste trabalho.

Inicialmente é possível ver variação com respostas resistivas aproximadas entre 63 e 8500. As altas resistividades estão representadas em tons laranjas e vermelhos e apresentam linhas levemente arredondadas, elas estão presentes nas laterais do perfil, mas também ocorrem na parte central inferior. Entende-se que estas podem indicar a presença do embasamento basáltico coeso sem saturação e, portanto, sem a influência de vesículas ou fraturas.

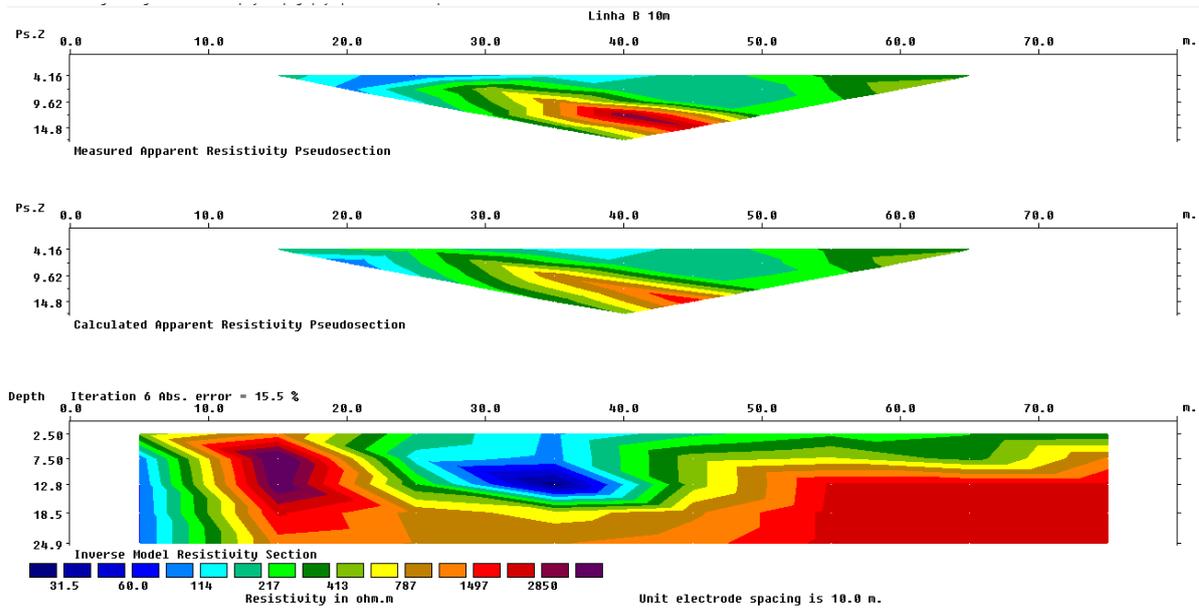
Quando se observa o perfil entre aproximadamente 40 e 55 metros é possível identificar respostas intermediárias de resistividade, entre 150 e 500. Isso pode ocorrer pela presença de um lobo arenítico possivelmente saturado ou então um basalto fraturado ou vesiculado com presença de alteração elevada. De maneira geral, os tons esverdeados que representam resistividades entre 250 e 1800, podem indicar as variações da composição basáltica.

A presença de argilominerais, lineamentos tectônicos ou até mesmo água pode ser representada por respostas resistivas baixas. Entre 130 e 150 metros a linha do levantamento apresenta tal característica, podendo indicar o acúmulo de material de um antigo corpo hídrico. Nesta mesma linha é possível destacar, entre 110 e 125 metros, uma cunha que pode ser o lineamento tectônico, devido ao seu formato e ao fato que muitas vezes uma estrutura pode ter seu espaço preenchido por argilominerais devido à percolação de águas em rochas cristalinas.

4.2.2 Linha LbP1-LbP2

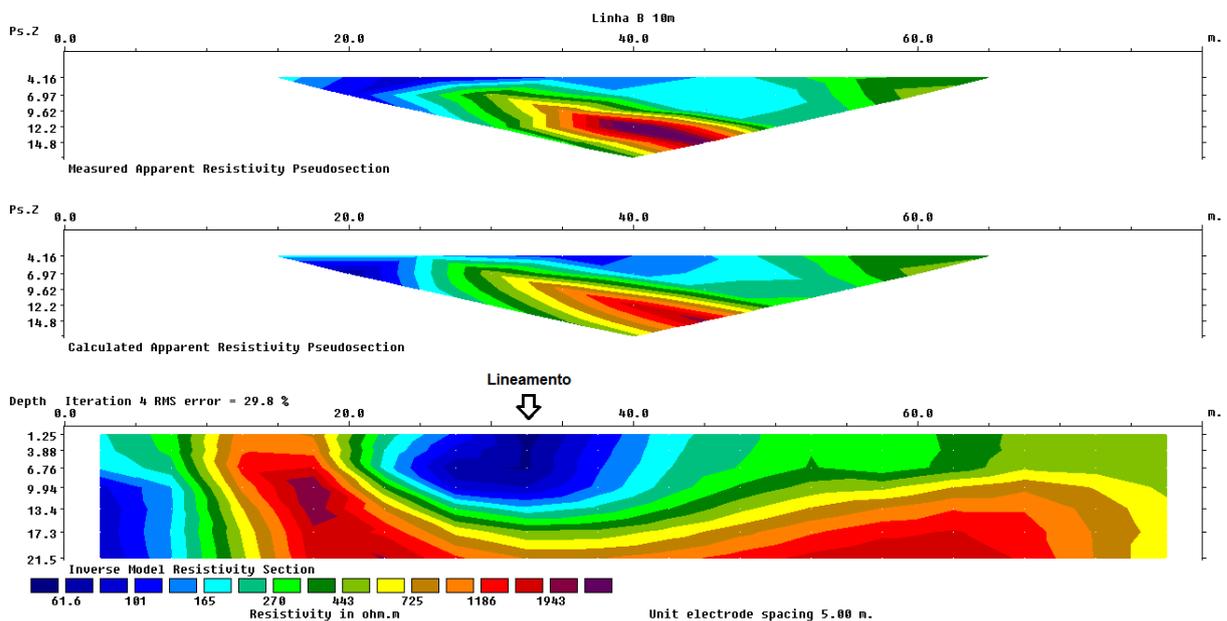
Na linha LbP1-LbP2 foi possível obter dois resultados, um deles mais profundo com maior espaçamento entre os eletrodos (10 metros), e outro mais detalhado, porém mais raso, com metade do espaçamento entre os eletrodos (5 metros). O comprimento da linha de leitura do levantamento com maior espaçamento foi de aproximadamente 77 metros, e sua profundidade foi de 24,9 metros. Novamente os resultados foram processados de duas maneiras buscando melhorar a apresentação e interpretação. A figura 28 apresenta o resultado da interpolação simples e a figura 29 ilustra a suavização das linhas referente ao levantamento com espaçamento de 10 metros.

Figura 28 – Imagem 2d: perfil LbP1-LbP2, 10m - sem suavização das linhas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 29 - Imagem 2d: perfil LbP1-LbP2, 10m - com suavização das linhas e localização do lineamento tectônico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

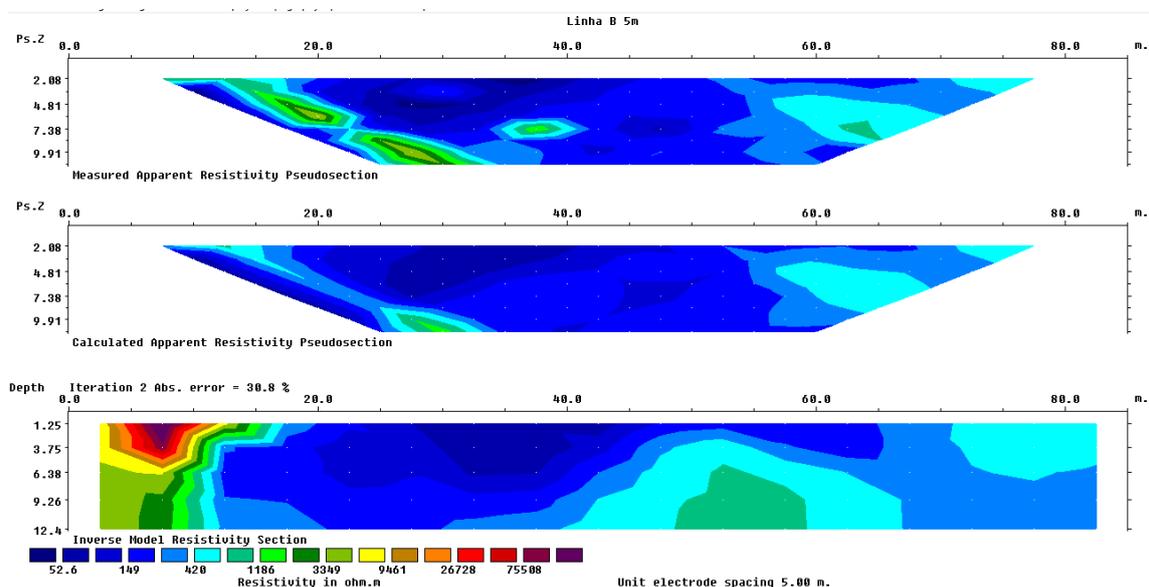
Novamente foi encontrada taxa de variação na resistividade do meio, mas neste perfil as respostas máximas foram inferiores, com resultados entre aproximadamente 61 e 1950. É possível notar uma tendência de centralização e profundidade nas resistividades mais elevadas em tons avermelhados, corroborando a presença de basaltos do embasamento mais coesos ou inalterados.

A variação em nuances verdes, representando resistividades aproximadamente entre 200 e 700, pode ser interpretada como variações da composição basáltica, possível presença de vesículas, ou alterações presentes pela ação de intemperismo.

Entre outras características semelhantes ao perfil anterior, neste também foi possível identificar a presença de argilominerais em forma de cunha, indicando a presença do lineamento tectônico entre aproximadamente 21,5 e 42 metros. Neste caso, existe uma estreita camada na parte inferior de tons mais resistivos que podem indicar superficialidade no lineamento ou também pode ser uma interpolação incorreta do *software*, interpolando as altas respostas resistivas presentes nas partes laterais do perfil.

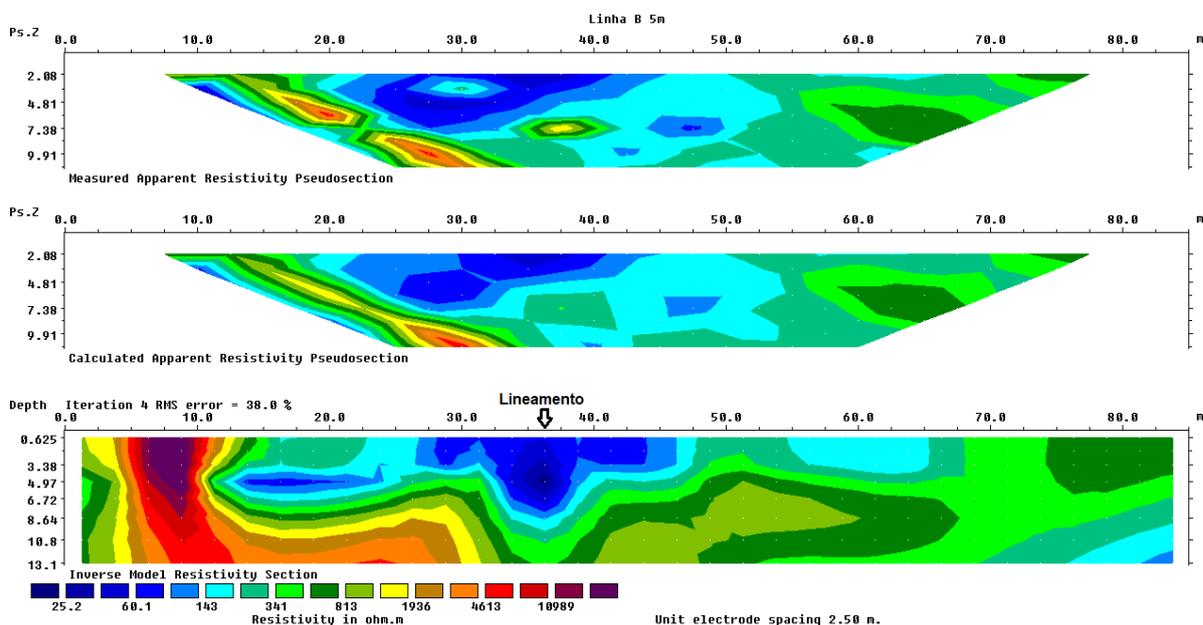
O levantamento com menor espaçamento entre os eletrodos, alcançou aproximadamente 81 metros de comprimento e 13,10 metros de profundidade. Nele a resolução é superior, o que permite delimitar com maior acurácia o local do lineamento, como pode ser observado na figura 31 entre 32,5 e 38,8 metros. É possível perceber que nesse perfil as características se mantêm em comparação com a interpretação anterior, porém existe uma baixa resposta de resistividade com coloração ciano na porção rasa entre 12,5 e 32 metros, que pode estar associada ao corpo hídrico que existe ao lado do local que foi realizado o levantamento. A figura 30 apresenta o resultado da interpolação simples e a figura na 31 consta o resultado com o método de suavização.

Figura 30 – Imagem 2d: perfil LbP1-LbP2, 5m - sem suavização nas linhas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 31 – Imagem 2d: perfil LbP1-LbP2, 5m - com suavização das linhas e localização do lineamento tectônico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

É válido atentar para um fato que ajuda na identificação de água superficial, uma vez que a poucos metros, no lado oeste da linha dois, existe um açude que conforme informação dos proprietários estaria sobre uma nascente, de maneira que, essa fonte de água aflorando pode estar ligada a localização da estrutura geológica, sendo possivelmente um ponto em que a água do reservatório superficial extravasaria, aliado a informação recorrente que sobre essas estruturas lineares, em muitos casos a vegetação é mais farta pela maior oferta de água comparado ao seu entorno.

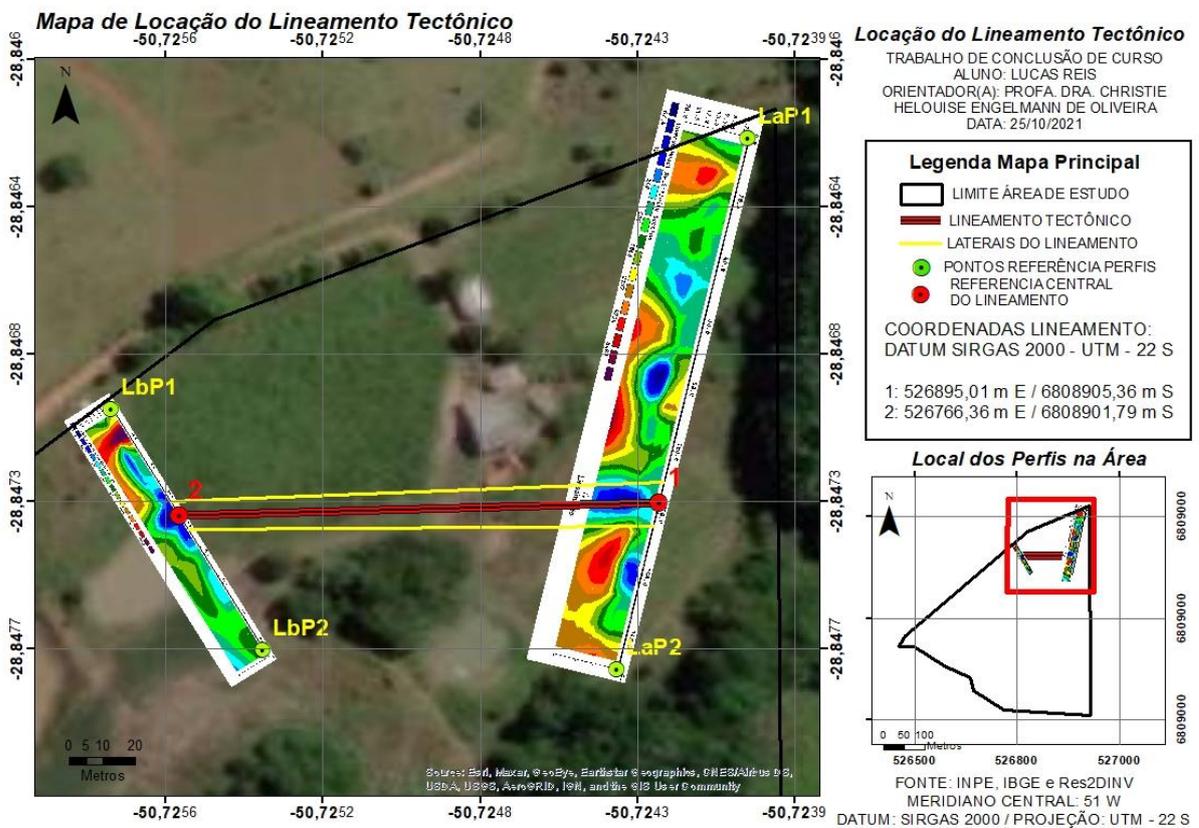
4.3 Convergência de Perfis

Os perfis de levantamento foram dispostos paralelos entre si, isso permitiu traçar uma linha entre os perfis ligando e identificando a posição do lineamento tectônico. Isso é possível pois trata-se de uma estrutura linear, que dificilmente muda significativamente a direção em um espaço de aproximadamente 100 metros, retratando com relativa fidelidade sua localização.

Assim, foi possível traçar uma linha de 126,7 metros de comprimento entre os pontos centrais do lineamento tectônico identificado em cada perfil, a linha citada

está representada na cor vermelha da figura 32, corresponde ao local preferencial para a perfuração do poço tubular profundo. Os pontos da extremidade da mesma têm as coordenadas em UTM: 526895,01 m E; 6808905,36 m S e 526766,36 m E; 6808901,79 m S. A figura 32 mostra o resultado obtido. Ressalta-se qualquer ponto sobre a linha é indicado para o poço e ainda que a projeção da profundidade do levantamento fica representada lateralmente, pois a imagem não permite uma representação em três dimensões.

Figura 32 – Linha de localização do lineamento tectônico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

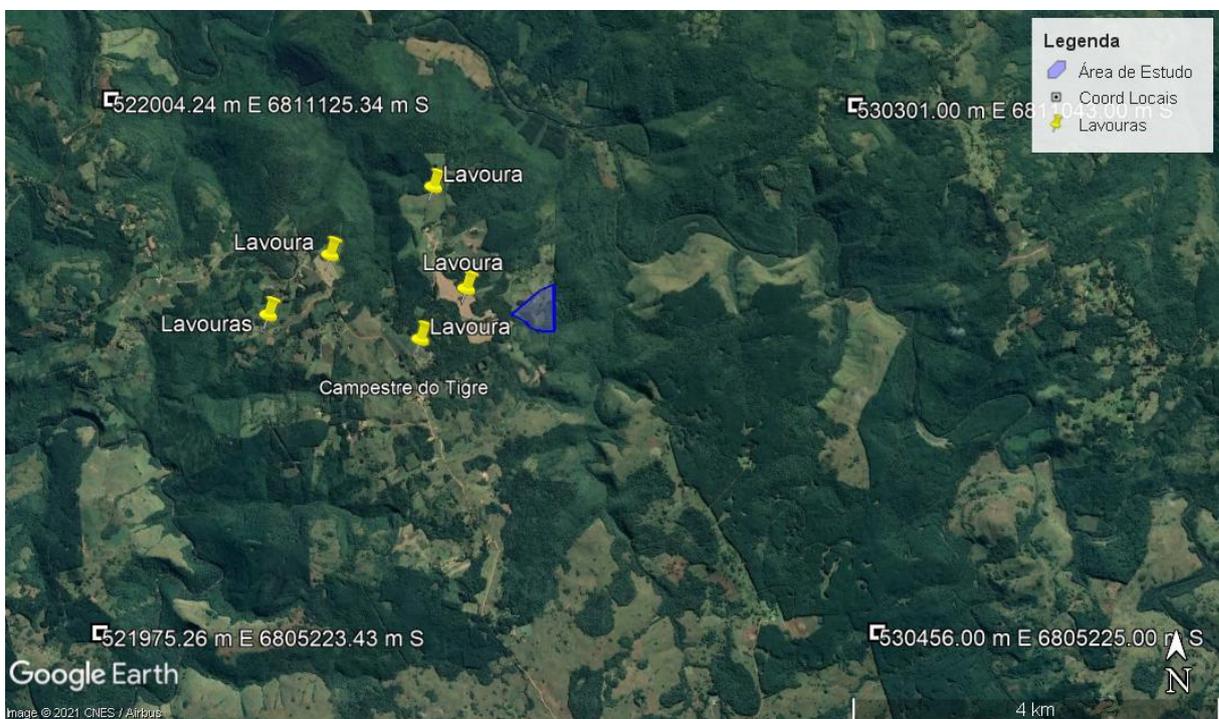
4.4 Avaliações complementares

Entre os demais fatores a serem considerados está a vulnerabilidade do aquífero que poderá ser encontrado nesta estrutura. Como foi observado em imagem de satélite e no local, principalmente a oeste da área existem lavouras com monoculturas de batata, soja e pastagens, além das parreiras inseridas na área de estudo. Em contrapartida, a região tem menor densidade de área lavrada quando

comparado ao restante do município, pois a localidade fica distante das principais vias de escoamento de produção do estado.

Considerando os fatores citados no parágrafo superior, a área pode ser classificada com baixo risco de contaminação, porém uma estrutura geológica pode ter grande proporção e seria importante realizar alguns testes de qualidade da água após a perfuração do poço pretendido para confirmar tal informação. A figura 33 apresenta um levantamento por imagem de satélite realizado no Google Earth, identificando os locais lavrados na localidade.

Figura 33 – Levantamento de lavouras locais.



Fonte: Modificado pelo autor a partir do Google Earth (2021).

5 CONCLUSÕES

O estudo proposto neste trabalho foi a utilização do método geofísico de ER para localizar a possível ocorrência de um lineamento tectônico com potencial reservatório hídrico em rochas cristalinas, de uma área rural de aproximadamente 14 hectares localizada no distrito de Cazuza Ferreira, interior do município de São Francisco de Paula-RS.

O método utilizado comprovou a existência da estrutura geológica, assim como, identificou sua localização dentro dos limites escolhidos previamente como preferenciais entre os perfis denominados LaP1-LaP2 e LbP1-LbP2. Na linha LaP1-LaP2 foi identificado o domínio do basalto coeso da Formação Serra Geral, mas com indícios da presença de alterações, vesículas e algumas lentes de arenito comuns à esta formação. No mesmo perfil foi possível identificar as baixas respostas resistivas dos argilominerais, sua forma e características foram importantes para identificar a localização da estrutura geológica, pois esses minerais podem ter se acomodado nas camadas superiores do lineamento tectônico, aproveitando seu espaço de acomodação.

A linha LbP1-LbP2 também apresentou boa resposta no estudo, ela foi realizada com dois espaçamentos dos eletrodos distintos e as imagens de duas dimensões geradas nos dois modelos foram utilizadas. Assim, foi possível visualizar novamente as rochas basálticas inalteradas, mas também algumas rochas com presença de alteração. Os argilominerais foram identificados, com as características resistivas que permitiram localizar o ponto de interceptação entre o perfil e o lineamento tectônico. Próximo à esta linha foi identificado o açude que estaria sobre uma nascente, este fato corrobora a presença da estrutura geológica, uma vez que muitas vezes sobre esses locais a vegetação é mais farta pela oferta de água maior do que as áreas de seu entorno.

Os pontos de interceptação entre os dois perfis e a estrutura foram identificados e foi possível reproduzir uma linha de 126,7 metros sobre a localização do lineamento tectônico no subsolo. Desta forma, uma perfuração de poço tubular profundo ao longo desta linha poderá interceptar estruturas com grande acumulação de água, o que validaria a interpretação derivadas dos dados de CE.

O presente estudo classificou o aquífero como de baixa vulnerabilidade se ele for encontrado na estrutura geológica, pois existe uma baixa densidade de lavouras

nas proximidades da região e o aquífero pode ainda estar inalterado. Porém, para comprovar essa informação é recomendada a aplicação de testes de qualidade na água caso ela seja extraída.

Conclui-se que a ER através da técnica do CE e o arranjo dipolo-dipolo, aliada às demais ferramentas de SIG e estudos prévios, apresentou excelente resposta quando se pretende identificar lineamentos tectônicos em rochas cristalinas como o basalto da Formação Serra Geral.

REFERÊNCIAS

ATLAS SOCIOECONÔMICO DO RIO GRANDE DO SUL (ISBN). **Hipsometria e unidades geomorfológicas**. 5. ed. Porto Alegre: ISBN, 2020. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/hipsometria-e-unidades-geomorfologicas>.

Acesso em: 20 maio 2021.

BETIOLLO, Leandro Menezes. **Caracterização estrutural, hidrogeológica e hidroquímica dos Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral no nordeste do Rio Grande do Sul, Brasil**. Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/14848>. Acesso em: 19 maio 2021.

BITTENCOURT, A. V. L.; DA ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E. C.; BUCHMANN FILHO, A. C. **A influência dos basaltos e de misturas com águas de aquíferos sotopostos nas águas subterrâneas do sistema aquífero serra-geral na bacia do rio piquiri, Paraná-br: águas subterrâneas, [S. l.], V. 17, N 1, 2003**. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/1313>. Acesso em: 15 abr. 2021.

BRAGA, Antônio Celso de Oliveira. **Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

BRAGA, Antônio Celso de Oliveira. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática**. 2006. Tese (Título de Livre-Docente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/116123>. Acesso em: 20 maio 2021.

CELLIGOI, A.; DUARTE U. **Aspectos hidrogeoquímicos da formação serra geral em Londrina-PR**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGUAS SUBTERRÂNEAS, 8, 1994, Recife: ABAS, 1994.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Áreas Subterrâneas: Aquífero Serra Geral**. São Paulo, SP: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, [S. l.], 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/programa-de-monitoramento/consulta-por-aquiferos-monitorados/aquifero-serra-geral/>. Acesso em: 18 maio 2021.

CLIMATE-DATA.ORG. **Dados climáticos para cidades mundiais**. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/sao-francisco-de-paula-43836/>. Acesso em: 20 maio 2021.

COELHO, Raphael Martins; CHAVES, Alexandre de Oliveira. Petrografia litoquímica de diques máficos Mesozoicos e Cambrianos(?) de Minas Gerais: comparações com basaltos da província Paraná-Etendeka e com diques da Suíte Fundão. **Revista Geonomos**, Minas Gerais, v.24, n.1, 30 nov. 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11687>. Acesso em: 19 maio 2021.

FACCINI, Ubiratan Ferruccio. 2000. **Estratigrafia do permo-triássico do Rio Grande do Sul: estilos deposicionais versus espaço de acomodação**. 300f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FERNANDES, Amélia João; MELLO, Cláudio Limeira. COBERTURAS CENOZÓICAS E ESTRUTURAS DEFORMADORAS NA DEPRESSÃO PERIFÉRICA PAULISTA, CAMPINAS, SÃO PAULO. **Revista do Instituto Geológico**. [S. l.], v. 25, n. 1-2, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.20040003>. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rig/article/view/8902>. Acesso em: 19 maio 2021.

FERNANDES, A. J.; MALDANER, C.; WAHNFRIED, I.; FERREIRA, L. M. R.; PRESSINOTTI, M. M. N.; VARNIER, C.; IRITANI, M. A.; HIRATA, R. Modelo conceitual preliminar de circulação de água subterrânea no Aquífero Serra Geral, Ribeirão Preto, SP. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], 2006. Disponível em:

<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23059>. Acesso em: 18 maio 2021.

GALLAS, José Domingos Faraco. Prospecção de água subterrânea em aquíferos cristalinos com o emprego de métodos indiretos. **Revista do Instituto Geológico**, p.43-51, São Paulo, 2003. DOI: 10.5935/0100-929x.20030004. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001400141>. Acesso em: 19 maio 2021.

GIAMPÁ, Carlos Eduardo Quaglia;, SOUZA, João Carlos de;. **Potencial aquífero dos basaltos da Formação Serra Geral no estado de São Paulo**. In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 4., 1982, Salvador. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22383/14706>. Acesso em: 02 maio 2021.

GOOGLE EARTH-MAPAS. Disponível em: <Http://mapas.google.com>. Acesso em: 14 nov. 2020.

GOOGLE MAPS. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/dir///@-29.4545515,-50.5860597,15z/data=!4m2!4m1!3e0>. Acesso em: 14 nov. 2020.

HASUI, Yociteru. A grande colisão pré-cambriana do sudeste brasileiro e a estruturação regional. **Geociencias**, v. 29, n. 2, p. 141-169, [S. l.], 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/71882>. Acesso em: 20 maio 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades**: São Francisco de Paula. Rio Grande do Sul: IBGE, 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/sao-francisco-de-paula/panorama>. Acesso em: 14 nov. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Imagens de satélite**. [S. l.], [2021?]. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>. Acesso em: 17 out. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Introdução ao sensoriamento remoto.** [S. l.], [2021?]. Disponível em: <http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm#:~:text=Uma%20imagem%20de%20sensoriamento%20remoto,Figuras%201%2C%202%20e%203>. Acesso em: 17 out. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAS (INPE). **Manuais:** tutorial de geoprocessamento. DPI/INPEA, [S. l.], 1991-2006. Disponível em: INPE, DPI Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/teoria/filtrage/filtragem.htm>. Acesso em: 19 maio 2021.

KNÖDEL, Klaus; LANGE, Gerhard; VOIGT, Hans-Jürgen. **Environmental Geology: Handbook of Field Methods and Case Studies.** Hannover Federal Institute for Geosciences and Natural Resources. Berlim: Springer-Verlag, 2007. p. 1374.

LEINZ, Viktor. Contribuição à geologia dos derrames basálticos do sul do Brasil. **Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Universidade de São Paulo. Geologia**, [S. l.], n. 5, p. 1-59, 1949. DOI: 10.11606/issn.2526-3862.bffcluspgeologia.1949.121703. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/bffcluspgeologia/article/view/121703>. Acesso em: 19 maio 2021.

LICHT, Otávio Augusto Boni. A evolução do conhecimento sobre a província ígnea do Paraná: dos primórdios até 1950. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 71-106, 2014. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rig/article/view/8963>. Acesso em: 18 maio 2021.

LOKE, M. H. **RES2DINVx64 v. 4.09 Rapid 2-D resistivity & IP inversion using the least-square method:** Manual. Penang: Geotomo *Software*, 2019.

LOPES, Ricardo da Cunha; SILVA, Augusto J. Pedreira da; VASCONCELOS, Antônio Maurílio; BAHIA, Ruy B. C. Bacias sedimentares Paleozoicas e Mesozoóicas interiores. **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**

(CPRM), [S. l.], v. 2, p. 55-85, 2003. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/publique/media/recursos_minerais/livro_geo_tec_rm/capII.pdf
Acesso em: 19 maio 2021.

MÉTODOS geofísicos. In: **IAG-USP**, [S. l.], C. VI, [2021?]. Disponível em: https://www.iag.usp.br/~eder/apostila/METODOS_GEOFISICOS.pdf. Acesso em: 20 maio 2021.

NANNI, Arthur Schmidt. **O flúor em águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul**: origem e condicionamento geológico. 2008. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/13785/000653223.pdf?sequence=1#:~:text=A%20ocorr%C3%A4ncia%20de%20teores%20de,origem%20e%20distribui%C3%A7%C3%A3o%20no%20aq%C3%BC%C3%ADfero>. Acesso em: 18 maio 2021.

NANNI, A. S.; TEDESCO, M. A.; FREITAS, M. A.; BINOTTO, R. B. **Vulnerabilidade natural e risco de contaminação do Aquífero Serra Geral pela suinocultura na Região das Missões – RS**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. [S. l.], 2005. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/spring/português/arquivos_publicacoes/xvi_sbrh.pdf. Acesso em: 19 maio 2021.

ORELLANA, Ernesto. **Prospeccion geoelectrica en corriente continua**. Madrid: Paraninfo, 1972. 523 p.

PEATE, David W. **The Paraná-Etendeka Province**. DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES, THE OPEN UNIVERSITY, MILTON KEYNES, UNITED KINGDOM, [S. l.], p. 217-220, 1997. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=5H8vobp2x3AC&oi=fnd&pg=PA217&dq=PEATE+1997&ots=MKsBQ3jpbs&sig=BzxMVD22ZGMS3EqSvwrc8Ops4GE#v=onepage&q=PEATE%201997&f=false>. Acesso em: 30 abr. 2021.

PEATE, D. W.; HAWKESWORTH, C. J.; MANTOVANI, M. M. S.; ROGERS, N. W.; TURNER, S. P. **Petrogenesis and stratigraphy of the high Ti/Y urubici magma type in the Paraná Flood Basalt Province and implications for the nature of dupal type manto in the south atlantic region**, 1999. *Journal of Petrology*, [S. l.], v.40, n.3, p. 451-473.

REBOUÇAS, Aldo da Cunha. **Sistema Aquífero Botucatu no Brasil**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. 8., 1994, Recife. **Anais** [...] Recife: ABAS. p. 500 – 509. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24504/16458>. Acesso em: 30 abr. 2021.

REGINATO, Pedro Antônio Roehe; AHLERT, Siclério. Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], v. 27, n. 2, 2013. DOI: 10.14295/ras.v27i2.27060. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27060>. Acesso em: 20 maio 2021.

REGINATO, Pedro Antonio Roehe; AHLERT, Siclério; SCHNEIDER, Vania Elisabete. **Caracterização hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Serra Geral na região Nordeste do Rio Grande do Sul**. [S. l.], 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/276058905_Caracterizacao_Hidroquimica_do_Sistema_Aquifero_Serra_Geral_na_Regiao_Nordeste_do_Rio_Grande_do_Sul. Acesso em 08 dez. 2021.

REGINATO, P. A. R.; AHLERT, S.; GILIOLI, K. C.; CEMIN, G. Caracterização hidrogeológica e hidroquímica do aquífero livre do manto de alteração da Formação Serra Geral, na bacia hidrográfica Taquari-Antas, região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 143-162, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/ambiagua/v7n2/v7n2a13.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2020.

SCHEIBE, Luiz Fernando. **O SISTEMA aquífero integrado Guarani/Serra Geral e o uso das águas subterrâneas no oeste de Santa Catarina**. In: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA: Rede Guarani Serra Geral (UFSC). Lages,

[2021?]. Disponível em:
https://segesc.paginas.ufsc.br/files/2012/11/aq_guarani_scheibe_lsegesc.pdf. Acesso em:
19 maio 2021.

SCHEIBE, Luiz Fernando; HIRATA, Ricardo César Aoki. **O contexto tectônico dos Sistemas Aqüíferos Guarani e Serra Geral em Santa Catarina: uma revisão.** [S. l.], [2008]. Disponível em:
<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/200399/abas.pdf?sequence=1>
. Acesso em: 20 maio 2021.

SCHWANCK, Carlos Franciéle, **Evolução termotectônica da porção nordeste do Planalto Regional do Rio Grande do Sul por termocrologia traços de fissão de apatita.** Porto Alegre, 2009. Disponível em:
<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/43023>. Acesso em: 14 nov. 2020.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA (SEMA). **Bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul.** [S. l.], [2021?]. Disponível em:
<https://www.sema.rs.gov.br/bacias-hidrograficas>. Acesso em: 06 jun. 2021.

SOARES, Henrique de Sá. **Imageamento elétrico para auxílio na locação de poços tubulares: estudo de casos em aquíferos fraturados.** Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Programa de Pós-Graduação em Geofísica Aplicada, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em:
https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14132/tde-07052019-073724/publico/d_henrique_s_sa_original.pdf. Acesso em: 19 maio 2021.

SOARES, Paulo Cesar; FIORI, Alberto Pio. **Lógica Sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia.** Not. Geomorfológicas, Campinas, v. 16. n.32, p.71-104, 1976. Disponível em:
https://www.ige.unicamp.br/beto/GN2072018/Aula10/FotoGeologia_Soares_Fiori.pdf. Acesso em: 19 maio 2021.

WINGE, M.; COMISSÃO BRASILEIRA DE SÍTIOS GEOLÓGICOS E PALEONTOLÓGICOS (SIGEP). **Falha.** Glossário geológico ilustrado, [S. l.], 2021.

Disponível em: <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/index.html>. Acesso em: 21 maio 2021.

VERDUM, Roberto; BASSO, Luis Alberto; SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes. **Rio Grande do Sul: paisagens e territórios em transformação**. 2. Ed. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2004. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/218547/000869918.pdf?sequence=1>. Acesso em: 20 maio 2021.

YASIR, Safaa F.; JANI, Janmaizatulriah; MUKRI, Mazidah. **A dataset of visualization methods to assessing soil profile using RES2DINV and VOXLER software**. Shah Alam, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340919301726#!>. Acesso em: 20 out. 2021.