

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GUSTAVO HENRIQUE KNAK

**ESTUDO HIDROGEOLÓGICO E GEOFÍSICO EM ROCHA GRANÍTICA NA
REGIÃO URBANA DE CAÇAPAVA DO SUL, RS**

**Caçapava do Sul
2025**

GUSTAVO HENRIQUE KNAK

**ESTUDO HIDROGEOLÓGICO E GEOFÍSICO EM ROCHA GRANÍTICA NA
REGIÃO URBANA DE CAÇAPAVA DO SUL, RS**

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

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Fontoura Hansen

Coorientador: Prof. Dr. José Pedro Rebés Lima

**Caçapava do Sul
2025**

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

Knak, Gustavo Henrique

Estudo hidrogeológico e geofísico em rocha granítica na região urbana de Caçapava do Sul, RS – 2025.

115 p

Orientador: Marco Antonio Fontoura Hansen
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2025.

1. Eletrorresistividade 2. Prospecção Hidrogeológica 3. Aquífero Fraturado 4. Geofísica Aplicada. I. Título.

GUSTAVO HENRIQUE KNAK

**ESTUDO HIDROGEOLÓGICO E GEOFÍSICO EM ROCHA GRANÍTICA NA REGIÃO URBANA
DE CAÇAPAVA DO SUL, RS**

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

Dissertação defendida e aprovada em: dia, mês e ano.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marco Antonio Fontoura Hansen

Orientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Maximilian Fries

UNIPAMPA

Dr. Lenon Melo Ilha

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **MARCO ANTONIO FONTOURA HANSEN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2025, às 15:20, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LENON MELO ILHA, Técnico de Laboratório Área**, em 18/12/2025, às 22:09, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MAXIMILIAN FRIES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/12/2025, às 14:53, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1932990** e o código CRC **D2A2A2C1**.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente à minha família, meu pai Erno, minha mãe Andreia, meus irmãos Vinicius e Milena e demais familiares por todo o apoio e incentivo nesses anos longe de casa. Ao meu primo Fabricio que olha por mim de algum lugar melhor.

Aos professores Marco Hansen e José Pedro pela orientação na execução do trabalho. Aos demais professores da UNIPAMPA pelos ensinamentos. Aos servidores do LEG e LATRAM pelo auxílio nas etapas de campo a análises. Ao professor Cesar da UNESP pelo auxílio no campo e fornecimento de equipamento.

À minha namorada Julia pelo companheirismo e paciência nessa reta final do curso.

Aos meus amigos Hiago, Ingrid, Ana, Gabriel, Samuel, Bocha, Caio, Flavinha, Gabi, Pâmela, Emmanuel, Júlia, Vítinho e Thammy pela amizade, pelas aventuras e por tornar minha estadia em Caçapava do Sul muito mais suportável.

Ao Paulo, Afonso, Estevan, Harrison e demais colegas da turma de 2019. Us kara é loko!

Aos meus companheiros da *Grunge is Dead*, Bruno, Gabriel, Krauser, Cássio, Harrison, Marcos e Laerte, à Treze Black, Amnésia Rock & Blues e demais bandas da cena por me proporcionarem as melhores experiências da minha vida dividindo palco com vocês.

E, por fim, à Universidade Federal do Pampa pela educação pública, gratuita e de qualidade.

RESUMO

O município de Caçapava do Sul/RS possui um histórico de dependência de fontes de água subterrânea para abastecimento em áreas rurais e setores industriais, especialmente em períodos de estiagem. No entanto, a exploração desses recursos é dificultada pela falta de estudos hidrogeológicos, sobretudo em rochas cristalinas. Este trabalho aborda essa lacuna, propondo uma investigação integrada para identificar zonas favoráveis à captação de água em aquíferos fraturados. O objetivo principal foi realizar um estudo hidrogeológico e geofísico em uma área de expansão urbana do município, visando caracterizar zonas com potencial para a locação de um poço tubular, subsidiando a gestão sustentável de recursos hídricos. Os objetivos foram atingidos por meio de uma abordagem metodológica que incluiu: a coleta e análise de dados secundários provenientes de fontes públicas (SIAGAS, SIOUT, SBG/CPRM); o mapeamento preliminar com o auxílio de sensoriamento remoto e Sistemas de Informação Geográfica (SIG); e a execução de um levantamento geofísico de campo, especificamente a eletrorresistividade com arranjo Wenner-Schlumberger. Junto disso, foram feitos ensaios de infiltração com o Permeâmetro de Guelph e análises granulométricas de solo para caracterizar as condições de recarga. Como resultado, foram identificados três domínios de resistividade, associados à rocha sã, ao saprólito e zonas saturadas. A integração dos dados revelou a presença de uma fratura que pode atuar como conduto para o fluxo de água em subsuperfície. Com base na análise integrada dessa estrutura, do reservatório e da área de recarga, foi possível determinar um local favorável para a perfuração de um poço. Este estudo demonstra a eficácia da metodologia integrada como ferramenta para a prospecção de água subterrânea em terrenos cristalinos, fornecendo um produto de grande valor para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos de Caçapava do Sul.

Palavras-chave: eletrorresistividade, prospecção hidrogeológica, aquífero fraturado, geofísica aplicada.

ABSTRACT

The municipality of Caçapava do Sul, in Rio Grande do Sul/RS, has a history of dependence on groundwater sources for supply in rural areas and industrial sectors, especially during periods of drought. However, the exploration of these resources is hampered by the lack of hydrogeological studies, particularly in crystalline rocks. This work addresses this gap by proposing an integrated investigation to identify favorable zones for water abstraction in fractured aquifers. The main objective was to conduct a hydrogeological and geophysical study in an urban expansion area of the municipality, aiming to characterize zones with potential for the location of a tubular well, thus supporting the sustainable management of water resources. To achieve the objectives, the methodology involved the acquisition and analysis of data from public sources (SIAGAS, SIOUT, SBG/CPRM), the use of remote sensing and Geographic Information Systems (GIS) for the preparation of preliminary maps, and the execution of a geophysical survey using the electrical resistivity method (Wenner-Schlumberger array). In addition, infiltration tests were performed with the Guelph Permeameter and soil granulometric analyses were conducted to characterize the recharge conditions. As a result, three resistivity domains were identified, associated with fresh rock, saprolite, and saturated zones. The integration of the data revealed the presence of a fracture that can function as a conduit for subsurface water flow. Based on the integrated analysis of this structure, the reservoir, and the recharge area, it was possible to determine a favorable location for the drilling of a well. This study demonstrates the effectiveness of the integrated methodology as a tool for groundwater prospecting in crystalline terrains, providing a product of excellent value for the planning and management of water resources in Caçapava do Sul.

Keywords: electrical resistivity, hydrogeological prospecting, fractured aquifer, applied geophysics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.....	14
Figura 2 - Mapa de localização da área de proposta de locação de poço.....	14
Figura 3 - Escudo Sul Rio-Grandense no contexto do Cinturão Dom Feliciano.....	17
Figura 4 - Mapa Geológico do Complexo Granítico Caçapava do Sul.....	19
Figura 5 - Classificação de aquíferos de acordo com a porosidade.....	20
Figura 6 - Representação esquemática de diferentes tipos de aquíferos.....	21
Figura 7 - Regiões Hidrográficas do Rio Grande do Sul.....	22
Figura 8 - Bacias Hidrográficas no município de Caçapava do Sul.....	23
Figura 9 - Domínios Hidrogeológicos de Caçapava do Sul.....	24
Figura 10 - Organização do método da eletrorresistividade.....	26
Figura 11 - Arranjo de Wenner.....	27
Figura 12 - Arranjo Schlumberger.....	28
Figura 13 - (a) Permeâmetro Guelph sem saída de água, (b) Permeâmetro Guelph com saída de água.....	31
Figura 14 - Croqui de localização das trincheiras no terreno. Legenda: Traços Vermelhos: trincheiras com sua identificação; Traços Verdes: seções geológicas.....	31
Figura 15 - Fluxograma de atividades.....	33
Figura 16 - Disposição das linhas geofísicas.....	34
Figura 17 - a) Equipamento utilizado nos levantamentos geofísicos. b) GPS Diferencial. c) e d) Eletrodos da linha geofísica.....	35
Figura 18 - Localização dos Ensaios de Permeabilidade e Trincheiras feitas por Lusa (2017).	36
Figura 19 - a) Abertura do poço. b) Poço onde será feito o ensaio. c) Trado de Entalhe. d) Escova para expor a matriz do solo. e) Instalação do Permeâmetro de Guelph. f) Equipamento pronto para uso.....	36
Figura 20 - a) Amostras coletadas. b) Processo de peneiramento. c) Grãos peneirados. d) Quarteamento. e) Continuação do processo de quarteamento. f) Amostras prontas para análise.....	39
Figura 21 - Microtrac Retsch GmbH Analisador de tamanho de partículas S3500.....	39
Figura 22 - Disposição das linhas geofísicas e lineamentos estruturais.....	41
Figura 23 - Seção 2D de resistividade referente à Linha 1.....	42
Figura 24 - Modelo Geofísico-Geológico desenvolvido a partir da integração de dados de resistividade e geológicos.....	42
Figura 25 - Seção 2D de resistividade referente à Linha 2.....	43
Figura 26 - Modelo Geofísico-Geológico desenvolvido a partir da integração de dados de resistividade e geológicos.....	43
Figura 27 - Curvas de Infiltração referentes à primeira e segunda carga, respectivamente, do Ponto 1.....	44
Figura 28 - Curvas de Infiltração referentes à primeira e segunda carga, respectivamente, do Ponto 2.....	44
Figura 29 - Curvas de Infiltração referentes à primeira e segunda carga, respectivamente, do Ponto 3.....	44
Figura 30 - Curvas de Infiltração referentes à primeira e segunda carga, respectivamente, do Ponto 4.....	45
Figura 31 - Distribuição granulométrica do Ponto 1, com distribuição polimodal, predominando Silte Médio/Areia Fina.....	46
Figura 32 - Distribuição granulométrica do Ponto 2, com distribuição polimodal predominando Silte Médio, Silte Grosso e Areia Média.....	46

Figura 33 - Distribuição granulométrica do Ponto 3, com distribuição bimodal predominando Silte Médio/Grosso e Areia Fina.	47
Figura 34 - Distribuição granulométrica do Ponto 4, com distribuição polimodal, predominando Areia Fina e Silte Médio/Grosso.....	47
Figura 35 - Sugestão de locação de poço tubular profundo.	49
Figura 36 - Sugestão para locação de poço tubular profundo na área de estudo.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação granulométrica de Wentworth (1922).	40
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

SIOUT - Sistema de Outorgas do Rio Grande do Sul

ESRG - Escudo Sul Rio-Grandense

CMPF - Complexo Metamórfico Passo Feio

CGCS - Complexo Granítico Caçapava do Sul

CPRM - Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais

SBG - Serviço Geológico Brasileiro

CE - Caminhamento Elétrico

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

K_{fs} – Condutividade Hidráulica Saturada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Justificativa.....	13
1.2 Área de Estudo.....	13
1.3 Caracterização do Problema e Hipóteses.....	15
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo Geral.....	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	17
3.1 Geologia Regional.....	17
3.2 Geologia Local.....	18
3.2.1 Complexo Granítico Caçapava do Sul (CGCS).....	18
4 ESTADO DA ARTE.....	20
4.1 Hidrogeologia.....	20
4.2 Hidrogeologia em Caçapava do Sul.....	22
4.3 Método Geofísico.....	25
4.3.1 Método Eletrorresistividade.....	25
4.3.2 Caminhamento Elétrico (CE).....	26
4.3.3 Arranjo Wenner.....	27
4.3.5 Arranjo Schlumberger.....	28
4.3.6 Arranjo Wenner-Schlumberger.....	29
4.4 Métodos Geofísicos Aplicados na Prospecção de Água Subterrânea.....	29
4.5 Ensaio de Infiltração de Guelph.....	30
4.5.1 Exemplos de Ensaios de Infiltração na Área de Estudo.....	31
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
5.1 Aquisição de dados.....	33
5.2 Sensoriamento Remoto e SIG.....	33
5.3 Levantamento Geofísico.....	34
5.4 Ensaio de Infiltração.....	35
5.5 Amostras de Solo.....	38
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
6.1 Levantamento Geofísico.....	41
6.2 Ensaios de Permeabilidade.....	43
6.3 Análises de Solo.....	45
7. CONCLUSÕES.....	50
9 REFERÊNCIAS.....	51
ANEXOS.....	55

1 INTRODUÇÃO

A água é um dos recursos naturais mais essenciais à vida. Seu acesso influencia diretamente no desenvolvimento humano, agricultura, indústria e, principalmente, na saúde pública. Apesar de parecer ser um recurso abundante, a distribuição de água doce no planeta é desigual. Cerca de 97,5% da água do planeta é salgada, e dos 2,5% que restam, apenas uma parte está disponível na superfície em rios e lagos. A maior parte está concentrada e retida em geleiras ou no subsolo (Rebouças, 2004).

Dito isto, as águas subterrâneas são recursos de suma importância para a sociedade e meio ambiente, desempenhando papel estratégico no abastecimento e manutenção de cidades e suas atividades econômicas. Além disso, em períodos de seca, essas reservas mantêm o fluxo hídrico, evitando o colapso de sistemas ambientais e a manutenção do equilíbrio ecológico (Hirata et al., 2019).

No Brasil, os aquíferos são uma das maiores fontes de abastecimento, principalmente em regiões onde a água superficial é de difícil acesso, seja por contaminação ou por condições climáticas. Segundo Hirata e Conicelli (2012), a utilização de poços para captação de água subterrânea aumentou significativamente nas últimas décadas, deixando claro a necessidade de uma gestão e estudos hidrogeológicos criteriosos que conduzam à exploração racional desse recurso.

No estado do Rio Grande do Sul a realidade de abastecimento é a mesma, principalmente em municípios de pequeno e médio porte, conforme levantamentos do Ministério de Minas e Energia (Freire et al., 1998) e estudos mais recentes de Bohn e Goetten (2013). Em Caçapava do Sul, o abastecimento público urbano é realizado em sua maioria pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), no entanto, em áreas rurais e em setores industriais o cenário muda, com boa parte da população ainda dependendo de poços próprios para o suprimento.

Nesse contexto de investigação em subsuperfície, a geofísica aplicada pode ser uma importante ferramenta, por ser um método indireto e não destrutivo, ela permite investigar propriedades físicas dos materiais em profundidade sem a necessidade de perfurações (Luiz, 2022). Em estudos de águas subterrâneas, especialmente em meios fraturados, métodos geofísicos como a eletrorresistividade são essenciais para mapear contrastes que indicam zonas saturadas e a espessura do manto de intemperismo (Kearey et al., 2002; Telford et al., 1990), fundamentais na locação de poços e reduzindo riscos de insucesso na captação.

1.1 Justificativa

Considerando o histórico de estiagens na região, além da constante necessidade de água potável, uma proposta de nova locação utilizando métodos geofísicos é de grande valia, assegurando o abastecimento hídrico municipal durante períodos de seca e da crescente demanda por água de qualidade, além de poupar recursos mal gastos, muitas vezes públicos, com a perfuração de poços improdutivos ou mal sucedidos.

A utilização de métodos geofísicos neste trabalho justifica-se, primeiramente, pelo fato de que em terrenos cristalinos, a perfuração de poços é dificultada pela complexidade dos sistemas de fraturas e estruturas em subsuperfície, e, visto que a água ocorre majoritariamente nestas discontinuidades da rocha, a geofísica auxilia nessa procura, identificando anomalias condutivas e aumentando as chances de sucesso na perfuração,

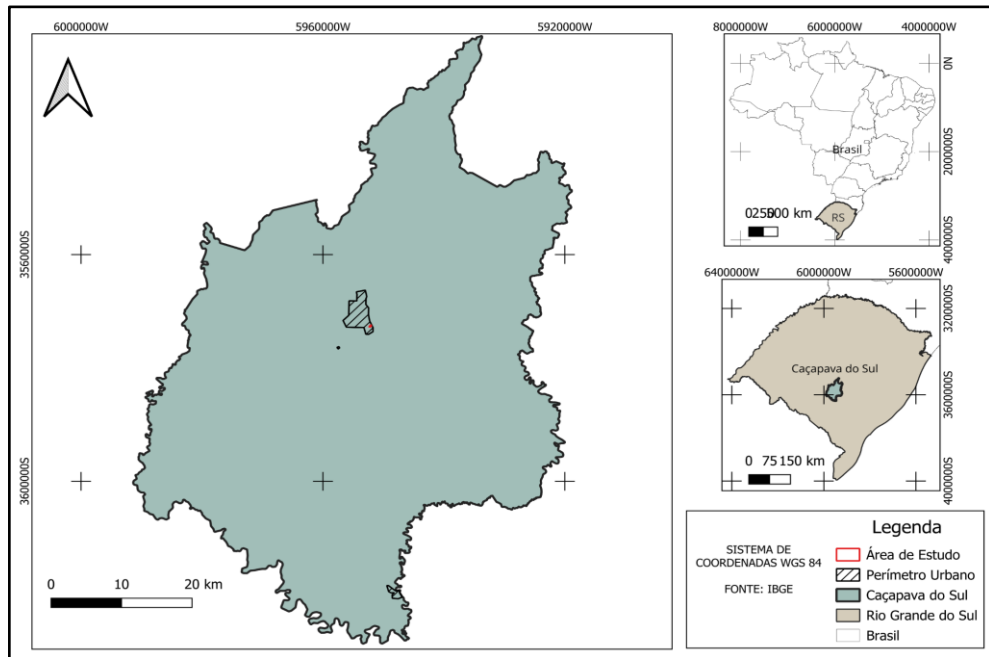
A escolha da área para estudo de locação de poço foi em razão de ser um terreno em área urbana, onde sempre haverá demanda para água, além do mesmo estar em boas condições para a realização de linhas geofísicas e de fácil acesso.

1.2 Área de Estudo

A área de estudo localiza-se no município de Caçapava do Sul, na região central do Rio Grande do Sul (Figura 1). O município está a cerca de 260 km da capital Porto Alegre, possuindo acesso pelas rodovias BR-392 e BR-290, que ligam a capital com o interior do estado. Especificamente, a área está nas proximidades da Avenida Santos Dumont, na esquina com a Rua do Arvoredo e Estrada dos Maciel, próximo ao Aeroporto de Caçapava do Sul (Figura 2).

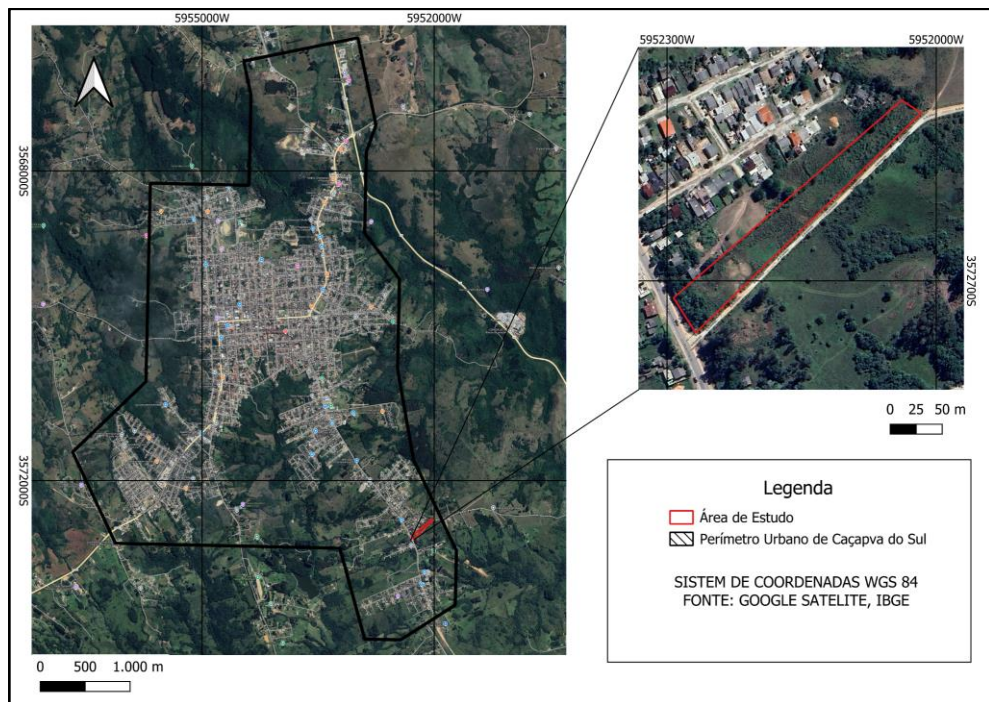
Nos aspectos climáticos, a região insere-se, segundo a classificação de Köppen, no tipo fundamental Cfa (Subtropical Úmido). Este clima é caracterizado por verões quentes e invernos frescos a frios, com chuvas em todos os meses do ano, sem estação de seca definida (Alvares et al., 2013). A pluviosidade média anual varia entre 1.300 mm e 1.400 mm, com temperatura média anual próxima dos 17 °C. Apesar da boa distribuição de chuvas, a região ainda é suscetível a estiagens periódicas, impactando diretamente no abastecimento e disponibilidade de água superficial.

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: autor.

Figura 2 - Mapa de localização da área de proposta de locação de poço.



Fonte: autor.

1.3 Caracterização do Problema e Hipóteses

A região urbana de Caçapava do Sul, situada no centro-sul do estado do Rio Grande do Sul, apresenta um substrato predominantemente composto por rochas graníticas, pertencentes ao embasamento cristalino do Escudo Sul-rio-grandense. Este tipo litológico, por sua baixa porosidade primária, representa um desafio significativo à exploração de águas subterrâneas, exigindo o aproveitamento de fraturas e zonas de alteração para o armazenamento e fluxo da água subterrânea.

Com o crescimento urbano e o conseqüente aumento da demanda por recursos hídricos, torna-se essencial compreender melhor as características hidrogeológicas do local, especialmente em áreas onde o acesso à água superficial é limitado ou vulnerável à poluição. No entanto, a ausência de dados hidrogeológicos detalhados e a complexidade estrutural das rochas graníticas dificultam a identificação de zonas produtivas para captação de água subterrânea.

Assim, é necessário realizar levantamentos geofísicos utilizando, por exemplo, o método Eletorresistividade, a fim de mapear com maior precisão as zonas fraturadas e alteradas do embasamento, que podem servir como reservatórios de água. Esse conhecimento é crucial para subsidiar decisões técnicas e estratégicas na implantação de poços tubulares, garantindo o abastecimento hídrico sustentável da população urbana.

A integração de dados geofísicos, como a resistividade das rochas em subsuperfície com informações hidrogeológicas pode identificar com maior precisão áreas favoráveis à exploração de água subterrânea em rochas graníticas. Os valores de resistividade elétrica em subsuperfície obtidos na área de estudo apresentam correlação com zonas de alteração e fraturamento do granito, indicando potenciais reservas de água subterrânea, sendo possível estabelecer critérios geofísicos e estruturais para orientar a perfuração de poços produtivos sobre o embasamento cristalino.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo hidrogeológico e geofísico integrado na área urbana de Caçapava do Sul, RS, com foco em rochas graníticas, visando identificar e caracterizar áreas favoráveis à captação de água subterrânea em aquíferos fraturados e alterados por meio de métodos geofísico e hidrogeológico.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Caracterizar a geologia e a estrutura local do embasamento granítico da área de estudo;
- Avaliar o potencial hidrogeológico para a locação de poços tubulares com base na integração de dados geológicos e geofísicos.
- Elaborar mapas e perfis interpretativos para orientar futuras atividades de exploração e gestão de recursos hídricos subterrâneos no município.

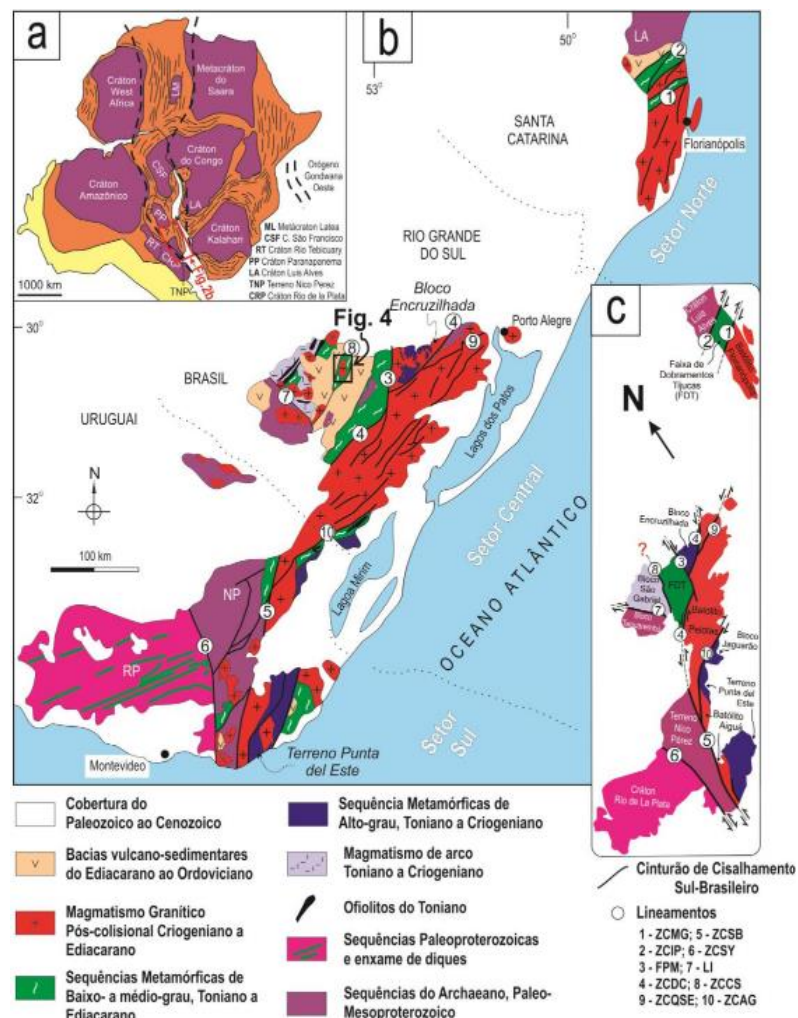
3 CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1 Geologia Regional

A área de estudo está localizada na porção meridional da Plataforma Sul-Americana da Província Mantiqueira, faixa móvel que se estende por aproximadamente 3 mil km, do Uruguai até a Bahia, também conhecida como Cinturão Dom Feliciano (Philipp et al., 2016).

Ao sul desta província se localiza o Escudo Sul Rio-Grandense (ESRG), que abrange uma área de aproximadamente 65.000 km², demarcado ao norte, sul e oeste pela Bacia do Paraná, e a leste pela Província Costeira do Rio Grande do Sul (Chemale Jr, 2000). Segundo Hartmann et al. (2007), a evolução tectônica do ESRG está associada aos ciclos orogênicos Transamazônico (2,26 - 2,00 Ga) e o Brasileiro (900 - 535 Má), que resultaram em processos de acreção continental, deformação e magmatismo (Figura 3).

Figura 3 - Escudo Sul Rio-Grandense no contexto do Cinturão Dom Feliciano.



Fonte: extraído de De Toni e Costa (2024).

Hartmann (2007) ainda divide o Escudo em quatro unidades geotectônicas principais: o Bloco Taquarembó, o Bloco São Gabriel, a Faixa de Dobramentos Tijucas e o Batólito Pelotas. Estes três últimos constituem o Cinturão Dom Feliciano em si, enquanto o Bloco Taquarembó é considerado como parte de seu embasamento.

O Complexo Metamórfico Passo Feio (CMPF) aflora a leste da área de estudo e é composto por uma associação de rochas metamórficas de médio a alto grau, interpretadas por Bittencourt (1983) e Salvi (2014) como resultado da evolução de arcos magmáticos neoproterozóicos.

Sua litologia é marcada por: anfibolitos, provenientes do metamorfismo de rochas máficas; xistos micáceos e quartzosos, derivados de pelitos e arenitos; gnaisses quartzofeldspáticos e paragneisses, com foliação bem desenvolvida.

Análises estruturais apontam que o CMPF passou por três eventos deformacionais principais. Os dois primeiros, associados ao desenvolvimento de foliações regionais e dobramentos, enquanto o último é relacionado à geração de zonas de cisalhamento e zonas miloníticas (Bittencourt, 1983; Costa et al., 2021).

3.2 Geologia Local

3.2.1 Complexo Granítico Caçapava do Sul (CGCS)

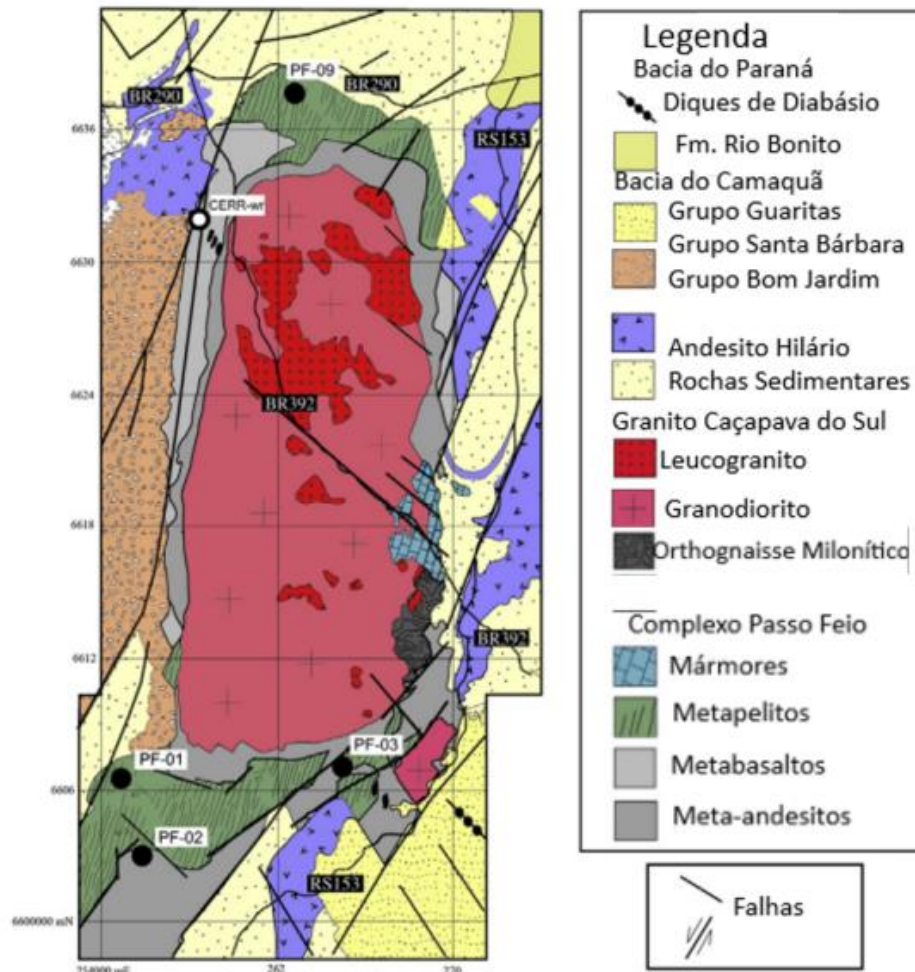
A área de estudo onde será sugerida a locação de um novo poço está inserida no Complexo Granítico Caçapava do Sul (CGCS), que cobre aproximadamente 250 km² e possui morfologia alongada na direção N-S, que se deve à tectônica de cisalhamento (Figura 3) (De Toni e Costa, 2024). As principais litologias observadas são sienogranitos, monzogranitos, tonalitos e granitóides leucocráticos, que vêm de diferentes pulsos magmáticos em ambientes sin a pós colisionais (Remus et al., 2000).

No que se trata a respeito de litologias, o CGCS (Figura 4) pode ser dividido nas seguintes fácies, segundo De Toni e Costa (2024): Granitóides biotíticos, de coloração cinza, textura porfírica, majoritariamente observados nas porções sul, oeste e sudoeste do complexo; Leucogranitóides, com coloração mais clara, presentes nas partes norte e nordeste; e Fácies miloníticas, observadas a sudoeste, associadas à zona de deformação.

Estruturalmente, o complexo possui foliação bem marcada variando de sub-horizontal a mergulhos entre 40° e 90° sentido oeste. Já nas partes centrais e leste, a foliação tende a sub-horizontalidade com mergulhos de baixo a médio ângulo com direção leste.

Estudos de geocronologia indicam que o CGCS é resultado de processos de anatexia crustal no período Neoproterozoico, e U-Pb em zircões indicam a idade de cristalização em torno de 562 ± 8 Ma, colocando sua formação nos estágios finais da Orogênese Brasileira (Remus et al., 2000).

Figura 4 - Mapa Geológico do Complexo Granítico Caçapava do Sul.



Fonte: Lopes et al. (2015).

4 ESTADO DA ARTE

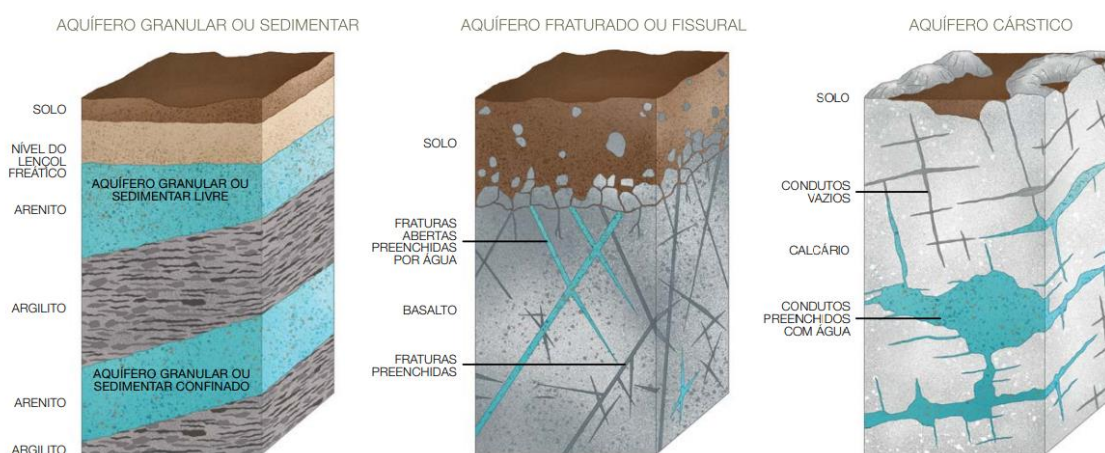
4.1 Hidrogeologia

O estudo da água subterrânea, também conhecido como Hidrogeologia, tem o papel de entender a circulação, armazenamento e interação com as rochas em meio superficial. Segundo Feitosa et al. (2008), a Hidrogeologia tem papel importante na gestão de recursos hídricos, especialmente em regiões onde a demanda de água subterrânea é alta, como ocorre em muitos municípios do Rio Grande do Sul.

Um aquífero pode ser definido, ainda segundo Feitosa et al. (2008), como uma formação ou unidade geológica com capacidade de armazenar e transmitir água subterrânea de maneira natural. Reginato et al. (2017), de maneira semelhante, definem aquífero como um corpo geológico que apresenta porosidade ou fraturamento suficientes para que a água subterrânea se movimente e armazene, em volumes suficientes para atender diferentes finalidades e usos.

Os aquíferos podem ser classificados, dentre outras características, conforme a porosidade da rocha armazenadora, (Figura 5), sendo divididos em aquíferos sedimentares (granular), fissural (fraturado) ou cárstico (Reginato et al., 2017).

Figura 5 - Classificação de aquíferos de acordo com a porosidade.



Fonte: Reginato et al. (2017)

Além da porosidade, outro fator que influencia na sua caracterização é a permeabilidade (Figura 6), responsável pela facilidade com que a água se desloca no meio. Segundo Feitosa et al. (2008), os aquíferos podem ser classificados segundo seu confinamento e armazenamento em:

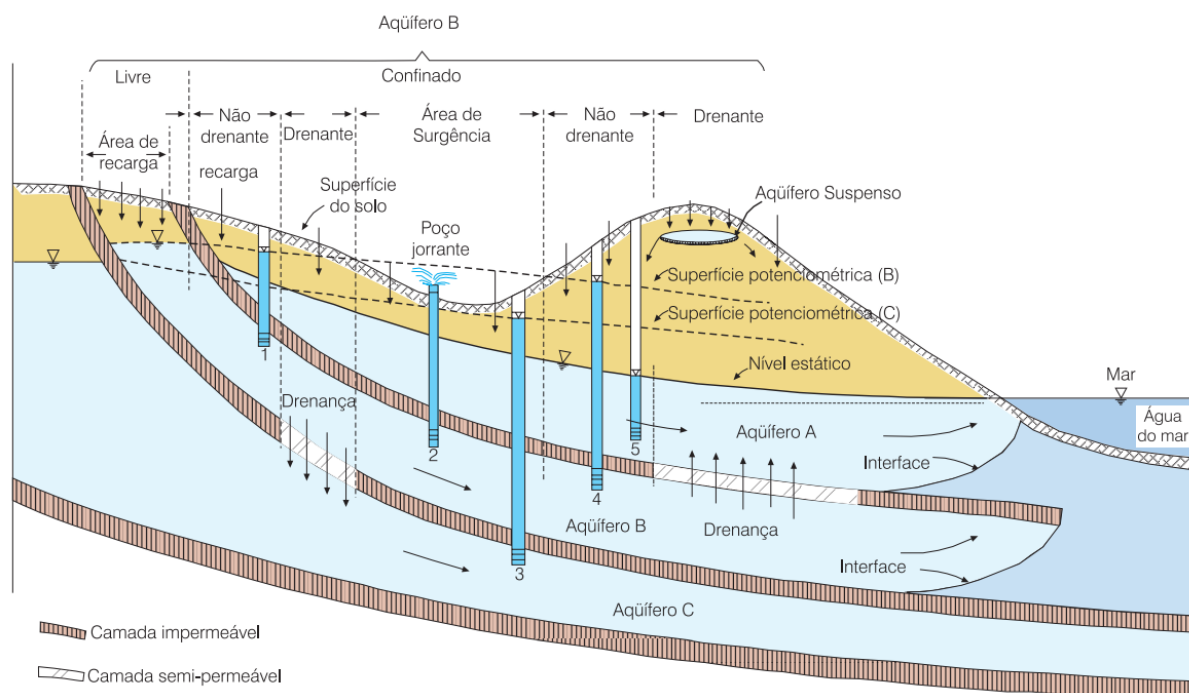
Aquíferos Livres (Freáticos): ocorrem em níveis superficiais, em equilíbrio com a pressão atmosférica;

Aquíferos Confinados: ocorrem entre duas camadas de baixa permeabilidade, com a água sob pressão superior à atmosférica.

Aquíferos Semiconfinados: delimitados por camadas que permitem a percolação de pequenas quantias de água, com baixa taxa de fluxo vertical.

Aquíferos Suspensos: formados por lentes de material permeável acima de camadas com menor grau de permeabilidade, também retendo pequenas quantias de água.

Figura 6 - Representação esquemática de diferentes tipos de aquíferos.



Fonte: Feitosa et al. (2008).

Ainda pode ocorrer a diferenciação entre aquíferos com porosidade primária, onde a água pode se mover pelos espaços vazios já existentes, associadas à aquíferos sedimentares, ou secundária, onde a movimentação se dá por fraturas e outras estruturas resultantes da deformação da rocha, associados à aquíferos cristalinos (Feitosa et al., 2008), muito presentes na região de Caçapava do Sul e na área de estudo.

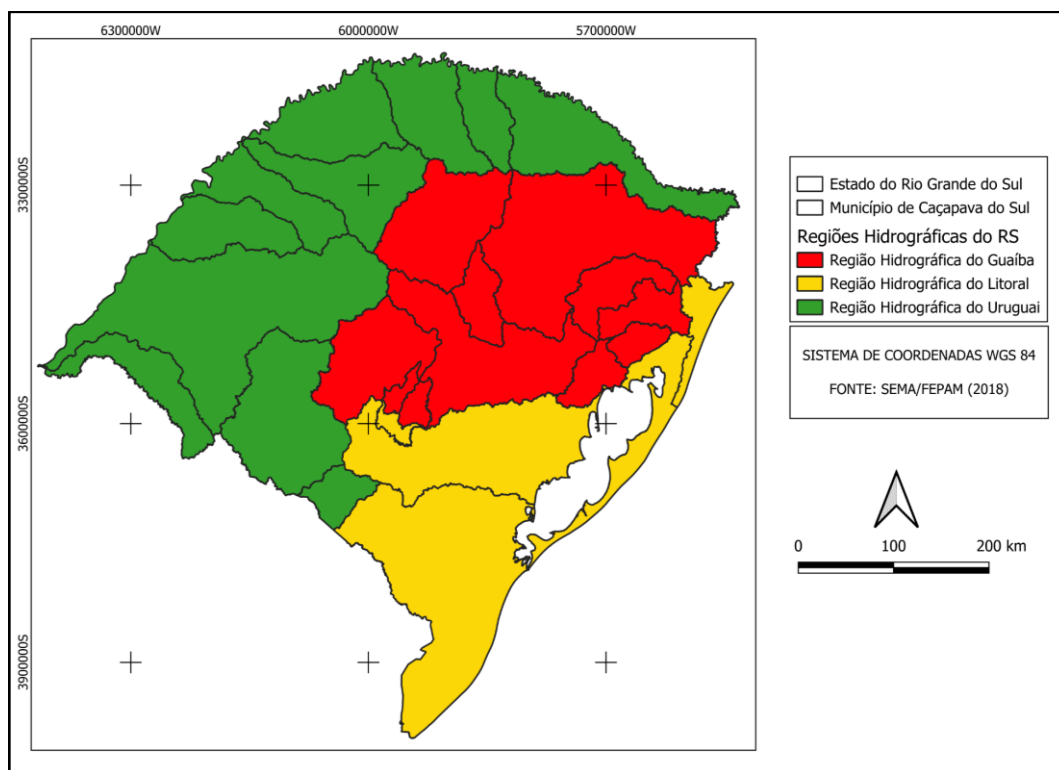
Na hidrogeologia, aquíferos cristalinos estão inseridos em rochas plutônicas e metamórficas, denominadas genericamente como rochas cristalinas. Vale ressaltar que as rochas metamórficas carbonáticas e as rochas vulcânicas possuem estruturas e feições distintas.

Tais aquíferos são compostos por dois compartimentos: o manto de intemperismo, que quando saturado, tem papel semelhante a um aquífero poroso, armazenando quantidades significativas de água, principalmente no saprólito; já o aquífero fraturado depende da presença, abertura e conexão de fraturas e outras descontinuidades na rocha, que agem como controladores do fluxo e armazenamento, embora este armazenamento seja limitado se comparado à zona intemperizada (Silva, 2017).

4.2 Hidrogeologia em Caçapava do Sul

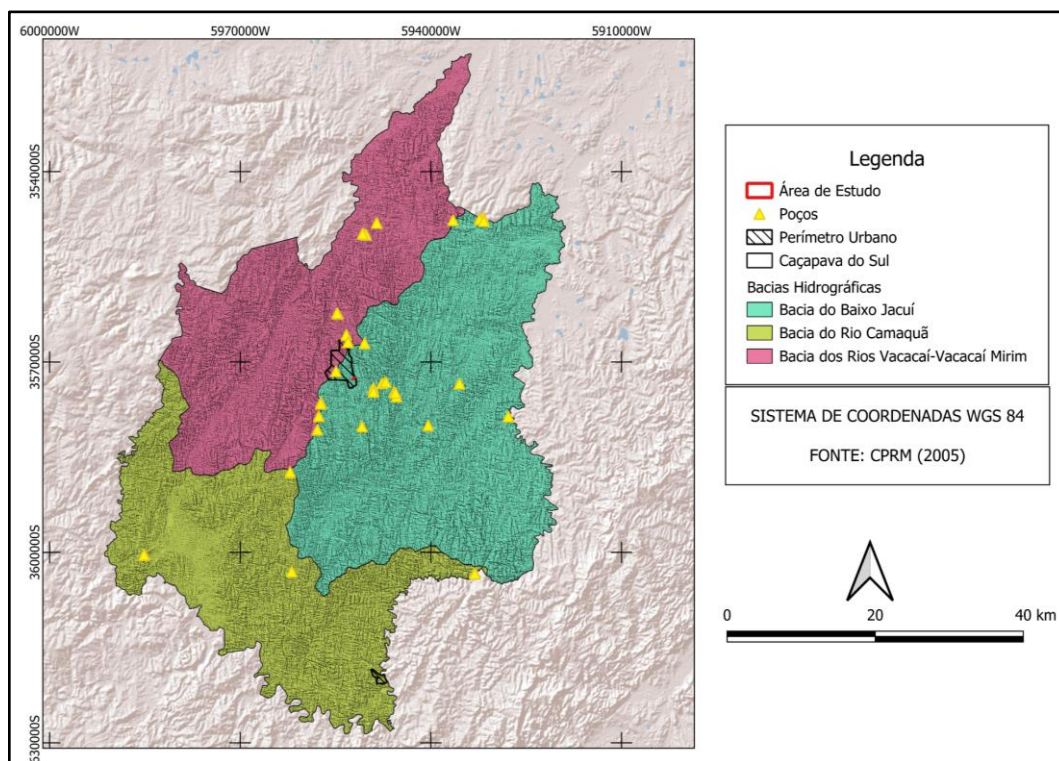
Segundo a Agência Nacional de Águas (2015), o Brasil divide-se em 12 regiões hidrográficas, formadas por bacias e sub-bacias. Conforme a Lei Estadual 10.350/1994, em seu artigo 38 classifica o Rio Grande do Sul em três regiões hidrográficas: Uruguai, Litoral e Guaíba (Figura 7). Pela classificação estadual, o município se situa entre as regiões Guaíba e Litoral, que compreende as bacias hidrográficas do Rio Camaquã, Baixo Jacuí e Vacacaí-Mirim (Figura 8).

Figura 7 - Regiões Hidrográficas do Rio Grande do Sul.



Fonte: SEMA/FEPAM, 2018.

Figura 8 - Bacias Hidrográficas no município de Caçapava do Sul.

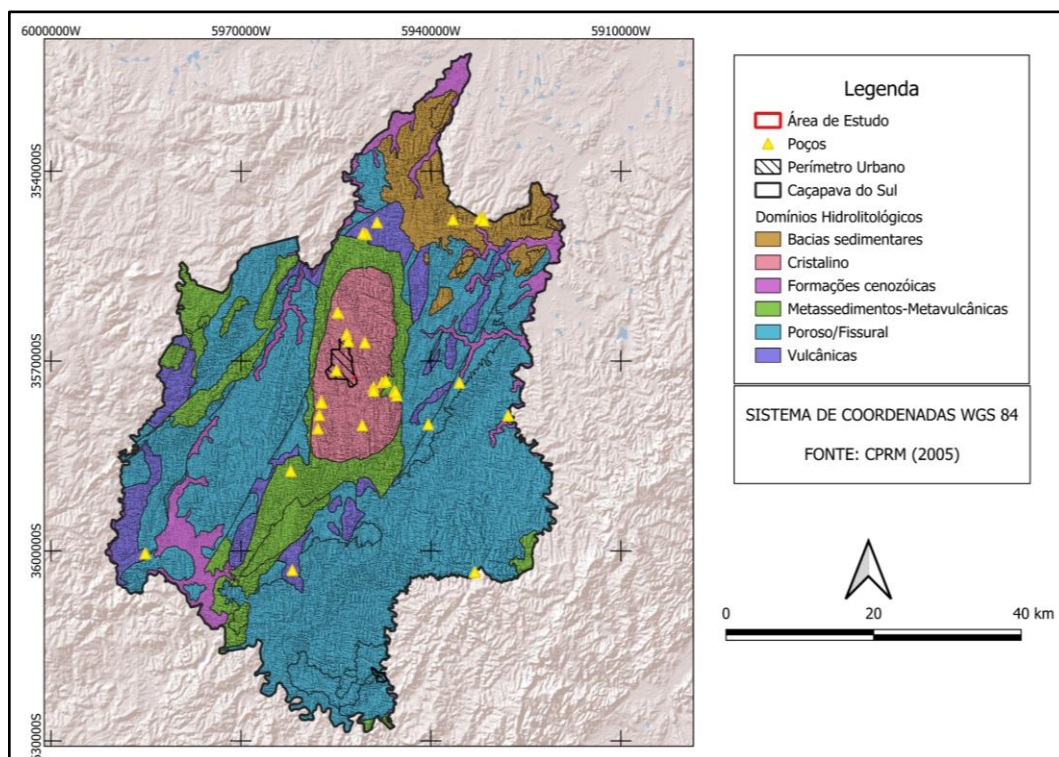


Fonte: autor.

O contexto hidrogeológico de Caçapava do Sul é caracterizado, em sua maioria, por sistemas aquíferos associados a rochas cristalinas. De acordo com o Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul (Machado e Freitas, 2005), os aquíferos gaúchos estão divididos em 21 sistemas, agrupados em 6 grandes grupos. O município da área de estudo está inserido no grupo “Aquíferos Limitados de Baixa Possibilidade Para Água Subterrânea em Rochas com Porosidade Intergranular ou por Fraturas”, mais especificamente no Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II, que abrange os municípios de Caçapava do Sul, Bagé, Encruzilhada do Sul e uma pequena porção de Porto Alegre. É formado por rochas graníticas, gnáissicas, andesíticas, xistos, filitos e calcários metamorfizados, afetados por fraturas e falhas. Dentro deste grupo, ainda se destaca o sistema Aquitardos Permianos, formado por siltitos, argilitos e folhelhos.

A divisão hidrogeológica do município de Caçapava do Sul, com base no Mapa de Domínios e Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil (CPRM, 2007), abriga seis domínios hidrolitológicos principais: Formações Cenozóicas, Bacias Sedimentares, Poroso/Fissural, Metassedimentos/Metavulcânicas, Vulcânicas e Cristalino (Figura 9). Os com maior expressão na área de estudo são o Domínio Cristalino e o Poroso/Fissural.

Figura 9 - Domínios Hidrogeológicos de Caçapava do Sul.



Fonte: autor.

Segundo Bonfim (2010), o Domínio Cristalino é um aquífero fissural, de porosidade secundária, onde a água circula por meio de fraturas e falhas. Suas principais litologias são marcadas por granitóides, gnaisses, granulitos, migmatitos e rochas básicas e ultrabásicas. A ocorrência de água é descontínua e de pequena extensão, com baixos índices de vazão.

O Domínio Metassedimentos/Metavulcânicas tem como composição xistos, filitos, metarenitos, metassiltitos, anfíbolitos, quartzitos, ardósias e demais metavulcânicas. Quanto à disponibilidade de água e vazão, semelhantes ao Domínio Cristalino, com ocorrência de água descontínua, pequena extensão e baixa vazão (Bonfim, 2010).

Dentre os 21 sistemas aquíferos específicos, Roisenberg et al. (2007) indicam que quatro deles ocorrem em Caçapava do Sul: Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II, Sistema Aquífero Aquicludo Eopaleozoico, Sistema Aquífero Palermo/Rio Bonito e Sistema Aquífero Aquitardo Permiano, todos com baixa capacidade específica e, no geral, baixa possibilidade de exploração, exigindo um estudo e estratégias criteriosas, além do uso de métodos geofísicos aplicados para melhor eficiência na locação de um novo poço.

4.3 Levantamento Geofísico

A geofísica pode ser entendida como uma ciência que aplica princípios físicos para investigar a subsuperfície através da medição das propriedades físicas de rochas, como densidade, resistividade elétrica e velocidade sísmica que variam conforme a natureza dos materiais geológicos. (Telford; Geldart; Sheriff, 1990). No contexto hidrogeológico, levantamento geofísico é usado na identificação, dentre outras, da geometria de aquíferos, sistemas de fraturas e presença de zonas saturadas, visto que a presença de água no meio altera as propriedades físicas medidas em campo (Keys, 1990). Tal abordagem se baseia em contrastes físicos entre diferentes materiais e suas alterações em decorrência da presença ou ausência de água, permitindo identificar estruturas e condições hidrogeológicas de maneira indireta e não destrutiva (Parasnis, 1997).

4.3.1 Método Eletorresistividade

O método da eletorresistividade tem por base teórica a Lei de Ohm, proposta pelo físico e matemático Georg Simon Ohm (1789-1854), onde é estabelecida a relação entre resistência elétrica, sua resistividade elétrica, o comprimento e uma área de seção transversal (Telford et al., 1990). A unidade no SI para a resistividade é ohm por metro, dada por (ohm.m).

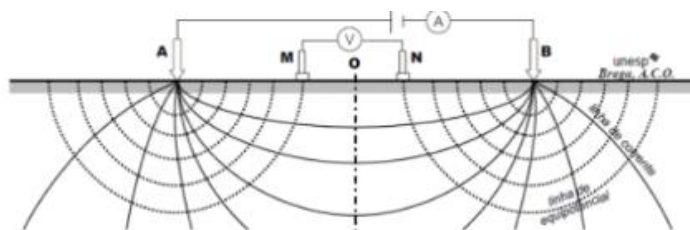
$$\rho = R \frac{S}{L} (\text{ohm.m}) \quad (1)$$

onde, R = Resistência Elétrica, ρ = Resistividade Elétrica, L = Comprimento, S = Seção Transversal.

No entanto, essa relação foi desenvolvida para corpos com geometrias regulares, principalmente cilindros, portanto, não leva em conta corpos tridimensionais, heterogêneos e anisotrópicos, necessitando ser adaptada. Em razão disso, as correntes elétricas são enviadas por trajetórias radiais ao longo de linhas.

No arranjo Sondagem Elétrica Vertical, a injeção de corrente no solo é feita por dois eletrodos de corrente (A e B), se propagando pelo meio e é medida por dois eletrodos de potencial (M e N) (Figura 10), conforme demonstram Kearey et al. (2002).

Figura 10 - Organização do método da eletrorresistividade.



Fonte: Kearey et al. (2002).

Com a injeção de corrente no solo, obtém-se a resistividade elétrica aparente (ρ_a), pela equação:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

onde, ρ_a = Resistividade aparente (ohm.m); ΔV = Diferença de potencial elétrico entre M e N (V); I = Corrente aplicada entre A e B (A); e K = Fator Geométrico do arranjo AMNB, que é dado por:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \quad (3)$$

onde, AM, AN, BM, BN as distâncias entre os eletrodos (Kearey et al., 2002).

4.3.2 Caminhamento Elétrico (CE)

O CE no arranjo Wenner é uma técnica onde um espaçamento médio é mantido entre os quatro eletrodos, onde se movem todos paralelamente à superfície a ser estudada, a fim de capturar variações laterais de resistividade (Gallas, 2003). É indicada na detecção de fraturas, contatos geológicos dentre outras estruturas superficiais e possibilita a geração de modelos 2D da subsuperfície (Kearey et al., 2002). Segundo Luiz (2022), sua aplicação é fundamental em estudos preliminares para identificar regiões ricas em água subterrânea.

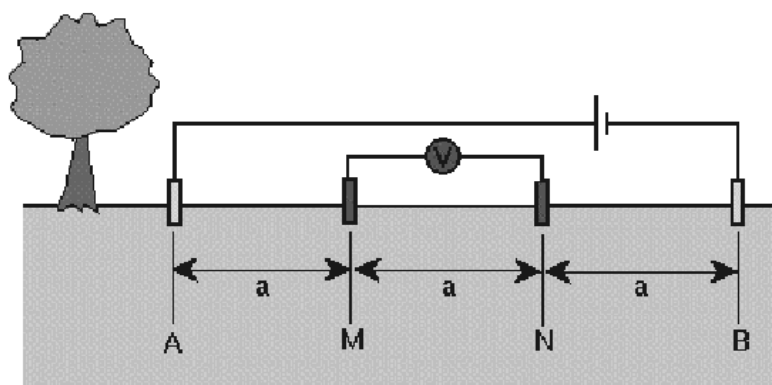
4.3.3 Arranjo Wenner

No arranjo Wenner, a disposição dos eletrodos se dá de forma linear, com espaçamento igual entre todos, de modo que a distância entre AM, MN e NB seja a mesma (Figura 11). A resistividade elétrica aparente (ρ_a) é calculada segundo a equação:

$$\rho_a = 2\pi a \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (5)$$

onde, ρ_a = resistividade aparente ($\Omega \cdot m$); a = espaçamento entre eletrodos (m); ΔV = diferença de potencial entre os eletrodos de potencial (V); I = corrente elétrica injetada (A)

Figura 11 - Arranjo de Wenner.



Fonte: Azambuja (2000).

Essa disposição facilita tanto na execução quanto no tratamento dos dados (Kearey et al., 2002). Com esse método, a profundidade de investigação é aumentada na mesma proporção ao aumento da distância entre os eletrodos, por isso é considerado mais eficiente para investigar estruturas horizontais ou camadas subjacentes relativamente planas (Telford et al., 1990).

Por ser mais sensível à variação de resistividade em áreas mais rasas, o arranjo de Wenner é indicado para estudos de delimitação de nível freático ou mapeamento da espessura de camadas superficiais condutoras (Luiz, 2022). No entanto, é limitado em relação à profundidade e resolução lateral se comparado ao arranjo Dipolo-Dipolo.

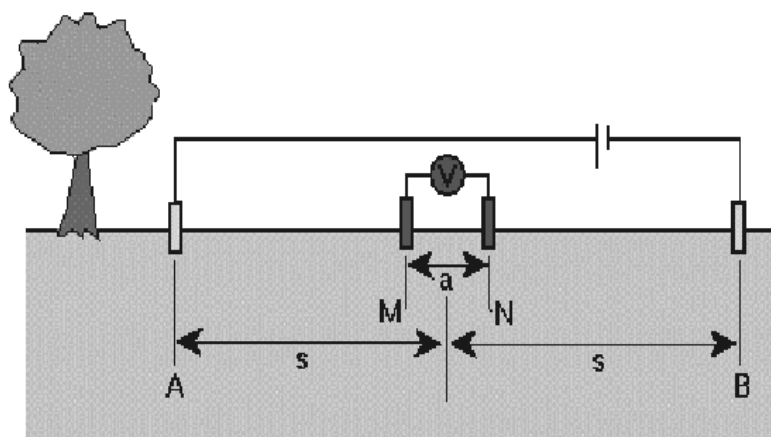
4.3.5 Arranjo Schlumberger

Este arranjo, assim como o de Wenner, é linear, porém os eletrodos de corrente (A e B) são afastados progressivamente durante a execução da aquisição dos dados, já os eletrodos de potencial (M e N) permanecem próximos e fixos na maioria das vezes (Figura 12). Com essa configuração, é possível alcançar maiores profundidades com menor movimentação de eletrodos, facilitando o trabalho em terrenos acidentados ou áreas urbanas (Kearey et al., 2002). A resistividade aparente no arranjo Schlumberger é calculada por:

$$\rho_a = \pi \cdot \left(\frac{L^2 - l^2}{l} \right) \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (6)$$

onde, L = metade da distância entre os eletrodos de corrente A e B (m); l = metade da distância entre os eletrodos de potencial M e N (m); ΔV = diferença de potencial medida (V); I = corrente elétrica injetada (A).

Figura 12 - Arranjo Schlumberger.



Fonte: Azambuja (2000).

Segundo Gallas (2003), esse arranjo é eficiente na aquisição de dados em camadas profundas, além de boa resolução vertical e boa detecção de camadas horizontais de resistividade contrastante (Telford et al., 1990).

4.3.6 Arranjo Wenner-Schlumberger

O arranjo Wenner-Schlumberger é uma configuração híbrida de eletrodos utilizado em levantamentos geofísicos utilizando o método da eletrorresistividade. Foi desenvolvido combinando as características de arranjos clássicos Wenner e Schlumberger, oferecendo equilíbrio entre resolução lateral e vertical.

No arranjo Wenner tradicional, é mantido um espaçamento constante entre os eletrodos, enquanto no arranjo Schlumberger, os eletrodos de corrente são afastados progressivamente. O Wenner-Schlumberger combina as duas geometrias, mantendo espaços proporcionais entre os eletrodos, mas com uma maior distância entre os eletrodos de corrente em relação aos potenciais. Fato este que gera uma sensibilidade intermediária entre os dois arranjos clássicos, entregando boa resolução lateral e vertical, além de ser menos suscetível a ruídos de superfície e irregularidades no acoplamento dos eletrodos. Por essas razões, segundo Loke (2004), o arranjo Wenner-Schlumberger tornou-se um dos métodos mais empregados em eletrorresistividade 2D, principalmente após a popularização dos sistemas multieletrodos na década de 1990.

4.4 Métodos Geofísicos Aplicados na Prospecção de Água Subterrânea

A seguir serão citados alguns trabalhos que utilizaram métodos geofísicos na prospecção de água subterrânea ou similares.

Dall’Agnese (2015) fez uma correlação entre a estrutura geológica da área de estudo em torno da Falha Açotéia-Piquiri, no município de Santana da Boa Vista (RS), utilizando dados geofísicos adquiridos por meio dos métodos geofísicos eletrorresistividade e eletromagnético, junto de imagens aéreas que auxiliaram na delimitação dos principais lineamentos da região. A partir dos resultados obtidos, o autor conclui que a região de falha é um alvo promissor para a prospecção de água.

Bortolozzo (2017) comparou os arranjos Dipolo-Dipolo e Wenner-Schlumberger na obtenção de dados de eletrorresistividade para estudo de presença de água no embasamento cristalino em Caçapava do Sul (RS). Os resultados permitiram visualizar feições de baixa resistividade, associadas a fraturas preenchidas por água, indicando alvos com potencial para locação de poços tubulares.

Silva e Soares (2020) desenvolveram uma caracterização de um aquífero fissural no campus da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), em Cuiabá (MT), utilizando

eletrorresistividade com arranjo dipolo-dipolo. Os resultados indicaram camadas condutivas em zonas de fraturamento e alteração de rochas cristalinas, onde foram interpretadas como locais onde ocorriam o principal fluxo de água subterrânea. A combinação de dados geofísicos e hidrogeológicos permitiram delimitar áreas propícias à futura locação de poços, mostrando a eficiência do método.

Nascimento (2024) aplicou métodos geofísicos para estudo do potencial hídrico em uma área rural do município de Caçapava do Sul (RS). Na execução do trabalho ele associou imagens de satélite, dados estruturais obtidos em campo e linhas de eletrorresistividade utilizando o arranjo Dipolo-Dipolo. As seções de resistividade apresentaram baixos valores em zonas de contatos litológicos e fraturas, indicando a provável presença de água.

4.5 Ensaio de Infiltração de Guelph

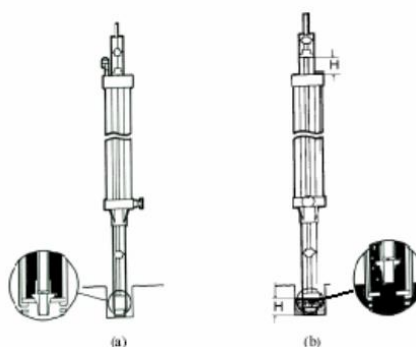
O permeâmetro de Guelph foi desenvolvido por Reynolds e Elrick (1983) e posteriormente aperfeiçoado na Universidade de Guelph, no Canadá, em 1985. É utilizado como ferramenta na determinação da condutividade hidráulica (K_{fs}) do solo. É amplamente utilizado mundialmente em estudos de caracterização hidrogeológica, pois permite uma estimativa direta da taxa de percolação do solo em um ponto específico, além de ser de fácil manuseio.

O equipamento consiste em um sistema de infiltração constante, normalmente acoplado a uma garrafa de Mariotte, que mantém o nível de água constante durante o ensaio (Figura 13). O ensaio é aplicado em furos cilíndricos feitos com trado de aproximadamente 45 cm, podendo variar para mais ou para menos conforme o objetivo do estudo. A água é inserida de maneira quantificada até o fluxo atingir uma condição de regime permanente, ou seja, até a taxa de infiltração de água no solo se estabilize, onde a vazão é utilizada para estimar a condutividade hidráulica saturada (K_{fs}) por meio da equação:

$$K_{fs} = \frac{Q}{C(\alpha H + 1)} \quad (7)$$

onde, K_{fs} = condutividade hidráulica saturada (cm/s); Q = vazão estabilizada (cm³/s); H = carga hidráulica aplicada (cm); α = parâmetro de estrutura do solo (1/cm); e C = constante geométrica relacionada à dimensão do furo. (Reynolds; Elrick, 1985).

Figura 13 - (a) Permeômetro Guelph sem saída de água, (b) Permeômetro Guelph com saída de água.

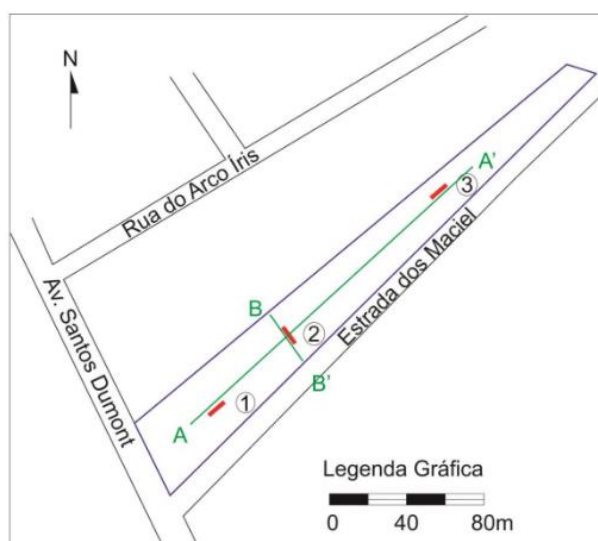


Fonte: Soto (1996).

4.5.1 Exemplos de Ensaios de Infiltração na Área de Estudo

A área de estudo conta com um laudo com ensaios de infiltração, realizado por Lusa (2017), com o objetivo de avaliar a capacidade do solo em absorver e percolar água. Os testes foram feitos conforme as normas ABNT NBR 7229/1993 e ABNT NBR 13939/1997, onde foram abertas três trincheiras retangulares de dimensões de aproximadamente 9 m de comprimento, 1,4 m de largura e 3 m de profundidade usando uma retroescavadeira. Em cada uma das trincheiras foram escavadas cavas de 0,3 m x 0,3 m x 0,3 m de profundidade, situadas a 0,6 m da superfície do terreno, além de uma cava adicional de 1,1 m. O fundo das cavas foi raspado, limpo e preenchido com brita nº 1 nos primeiros 0,5 m (Figura 14).

Figura 14 - Croqui de localização das trincheiras no terreno. Legenda: Traços Vermelhos: trincheiras com sua identificação; Traços Verdes: seções geológicas.



Fonte: Lusa (2017).

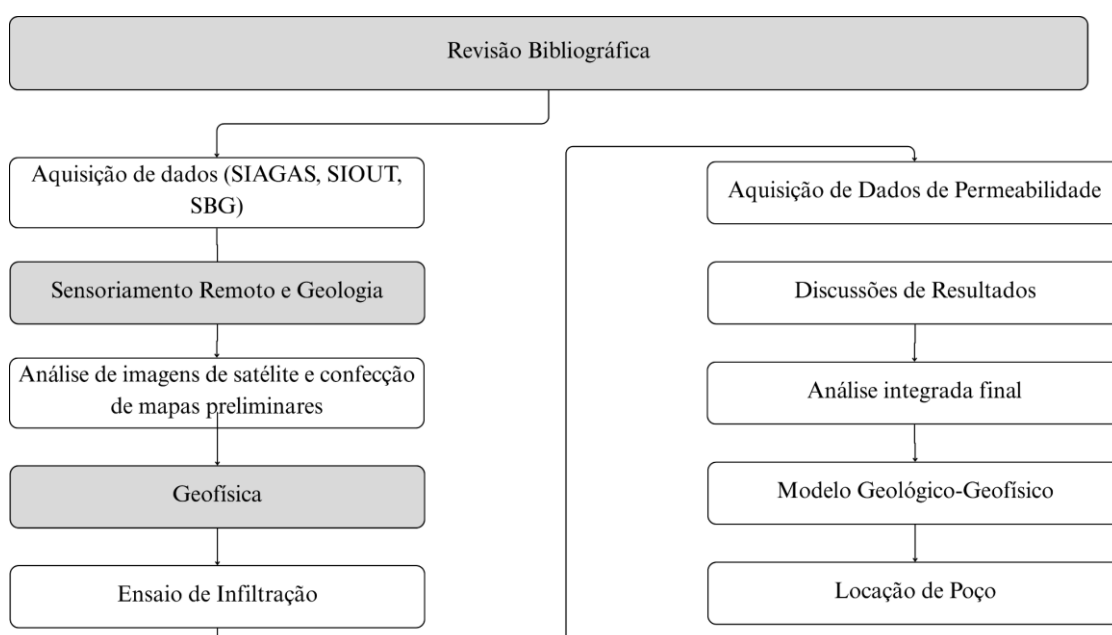
Em seguida, por dois dias consecutivos, foi iniciada a etapa de saturação do solo com a cava cheia d'água por 4 horas consecutivas. Após 12 horas foi dado o início do teste de percolação, onde a cava foi preenchida com 0,15 m de água acima da brita. Após o preenchimento da cava, foi determinado o rebaixamento do nível da água a cada 30 minutos, e após a determinação de nível, completou-se o nível de água de volta aos 0,15 m.

Com base nos resultados obtidos nos testes, uma das trincheiras se mostrou favorável para a locação de poço para captação de água subterrânea pela presença de solo com maior nível de permeabilidade, detecção de nível freático a 2,8 m de profundidade e substrato rochoso intensamente fraturado, que indica condições favoráveis ao acúmulo de água.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Na execução deste trabalho, que tem como foco sugerir a locação de um poço para captação de água em uma área urbana de Caçapava do Sul, foi feita a integração de dados geológicos, geofísicos e de sensoriamento remoto (Figura 15).

Figura 15 - Fluxograma de atividades.



Fonte: autor.

5.1 Aquisição de dados

Para o presente trabalho, a aquisição de dados se deu majoritariamente por três fontes públicas: o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e o Sistema de Outorga e Uso da Água no Rio Grande do Sul (SIOUT), além do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). Os dados coletados foram principalmente informações sobre os poços no município de Caçapava do Sul, como localização, profundidade, vazão, nível estático, tipo de captação, qualidade da água e litologia, gerando tabelas elaboradas no MS Excel.

5.2 Sensoriamento Remoto e SIG

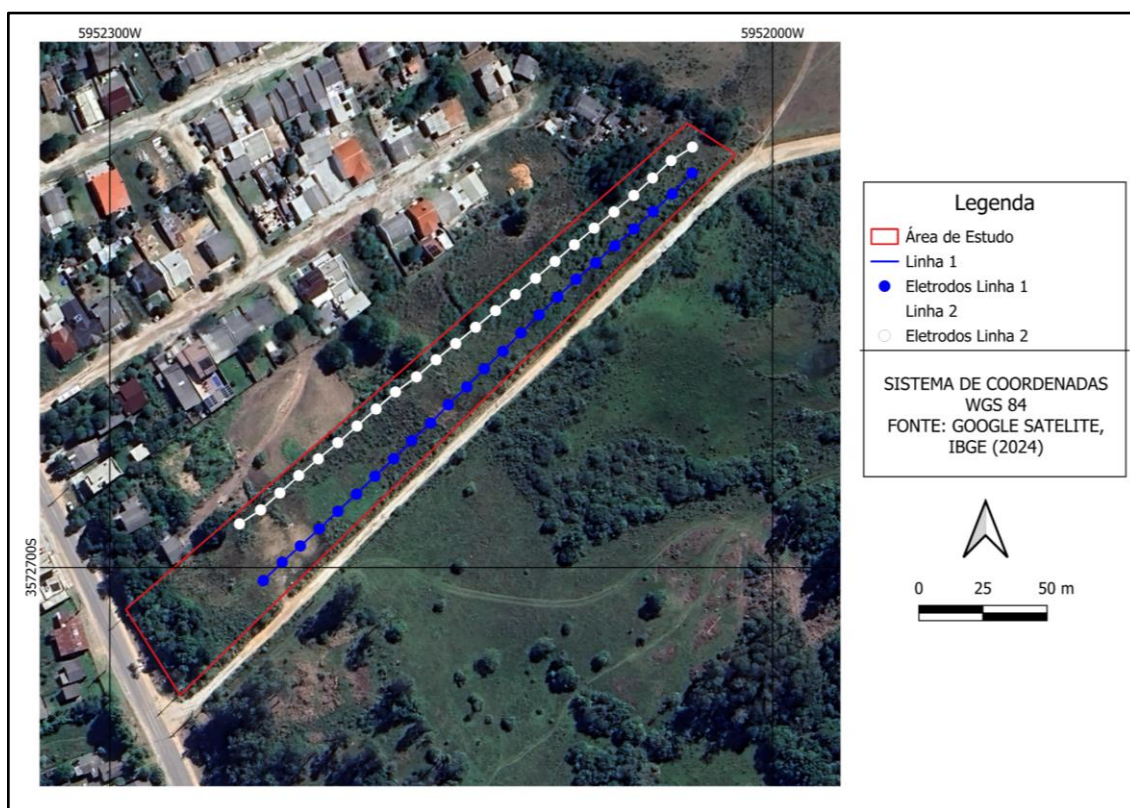
Com a ajuda de imagens de satélite e mapas prévios de trabalhos semelhantes e estudos feitos na região, foram elaborados mapas de localização dos poços com as coordenadas

extraídas do SIAGAS e SIOUT. Os mapas geológico e hidrogeológico foram feitos com o auxílio de shapes extraídos da CPRM e do IBGE. Os lineamentos para auxiliar no entendimento e execução do trabalho foram extraídos de imagens de satélite do Google e de Modelos de Elevação Digital. Os mapas foram confeccionados com o auxílio de imagens de satélite do *Google Earth* e do *software* livre Qgis versão 3.34.

5.3 Levantamento Geofísico

A etapa de campo para aquisição dos dados geofísicos consistiu na aplicação do Método Eletroresistividade usando a técnica de Caminhamento Elétrico utilizando o arranjo Wenner-Schlumberger, onde foram realizadas duas linhas de investigação geofísica. As linhas foram executadas na direção NE-SW, com espaçamento constante entre eletrodos de 10 metros e 230 metros de extensão de cada linha como representados na Figura 16. Foi utilizado o equipamento Terrameter LS 2, da fabricante ABEM (Figura 17a). Enquanto o equipamento fazia as medições, foi utilizado um GPS Diferencial modelo S700A do fabricante Stonex (Figura 17b) para tomar as coordenadas dos eletrodos, a fim de georreferenciar as linhas dos perfis.

Figura 16 - Disposição das linhas geofísicas.



Fonte: autor.

Figura 17 - a) Equipamento utilizado nos levantamentos geofísicos. b) GPS Diferencial. c) e d) Eletrodos da linha geofísica.



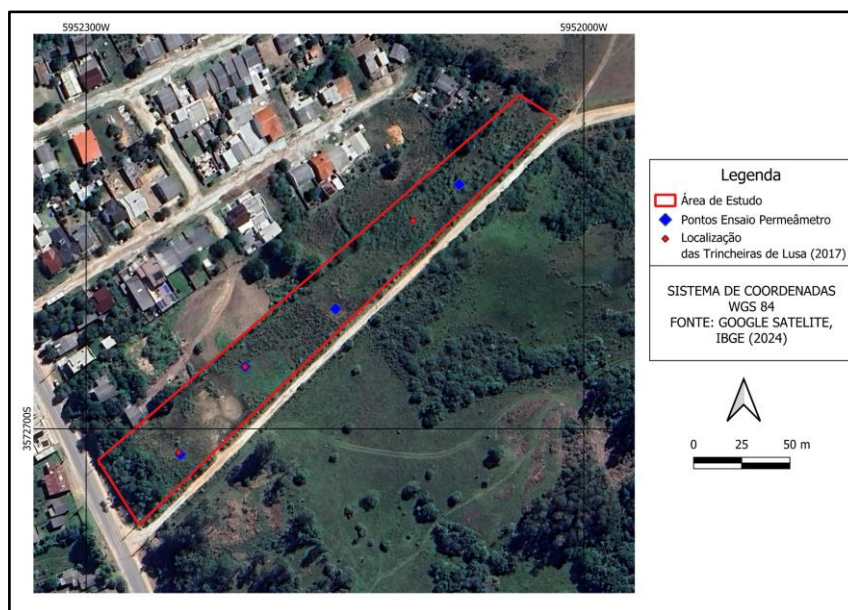
Fonte: autor

O processamento dos dados se deu por meio do *software* Res2Dinv, onde foram adicionados os dados de elevação para a confecção de uma seção 2D de resistividade com topografia. Segundo Loke, 2017, a pseudo-seção de resistividade aparente representa a plotagem dos dados brutos em campo *versus* a pseudoprodutividades, oferecendo uma visualização qualitativa inicial da distribuição da resistividade em subsuperfície. A partir desta, é elaborado o modelo de inversão, onde, por meio de métodos matemáticos, busca-se determinar um modelo de subsuperfície 2D cuja resposta teórica de resistividade seja a que melhor representa os valores medidos em campo.

5.4 Ensaio de Infiltração

Na área de estudo, foram feitos quatro ensaios de permeabilidade utilizando o Permeômetro de Guelph. Foram efetuados quatro ensaios, próximos das trincheiras abertas no ensaio feito por Lusa (2017) a fim de comparar os resultados (Figura 18).

Figura 18 - Localização dos Ensaios de Permeabilidade e Trincheiras feitas por Lusa (2017).



Fonte: autor.

As etapas do ensaio consistiram na abertura de um poço com diâmetro de 6,4 cm utilizando trado de solo, com profundidade de 20 cm. Após, é utilizado o trado de entalhe para remover a camada de solo compactado pelo processo de perfuração, e, em seguida, é utilizada uma escova para raspar suavemente as paredes, expondo a matriz do solo em seu estado natural, que antes estava compactado pelo trado de entalhe. Após, é instalado o aparelho previamente preenchido com água no centro do poço e nivelado com o auxílio do tripé (Figura 19).

Figura 19 - a) Abertura do poço. b) Poço onde será feito o ensaio. c) Trado de Entalhe. d) Escova para expor a matriz do solo. e) Instalação do Permeômetro de Guelph. f) Equipamento pronto para uso.



Fonte: autor.

O equipamento quando utilizado na configuração combinada, utilizando ambos os reservatórios, mantém um nível de água constante no poço por meio de um mecanismo de gotejamento e entrada de ar.

O ensaio foi realizado utilizando o método de dupla cabeça (*Double-Head Method*), que requer duas medições de fluxo em duas cargas constantes distintas. Na primeira carga, o nível de água no poço foi padronizado em 5 cm, e a segunda carga, após a estabilização da primeira carga, foi padronizado a 10 cm de altura.

Para cada carga (H1 e H2), o poço foi pré saturado até que o fluxo de água no reservatório atinja um nível estável, após, para a medição do fluxo estável, a taxa de queda é registrada em intervalos de 2 minutos até que a variação seja desprezível.

Para o tratamento dos dados, foi utilizada uma planilha disponibilizada pelo fabricante (*Guelph Permeameter Ksat Calculator*) para obter a condutividade hidráulica saturada de campo (K_{fs}).

Nos ensaios em que o cálculo do método de dupla cabeça resultou em valores fora da faixa realista ($0,01 \leq \alpha \leq 0,5 \text{ cm}^{-1}$) ou valores negativos, o cálculo de K_{fs} foi corrigido pela aplicação da análise de cabeça única (*Single-Head Analysis*) para cada recarga, e os valores finais de K_{fs} foram calculados pela média aritmética.

Neste caso, o valor final de K_{fs} é obtido em duas etapas: primeiro é encontrado o valor de K_{fs} para cada carga (H1 e H2) separadamente, depois é feito o cálculo da média aritmética simples dos dois valores. Para uma única carga hidráulica, a equação fundamental do fluxo é:

$$Q_i = A_i K_{fs} + B_i \phi_m \quad (8)$$

Onde, A_i e B_i são fatores geométricos. Para resolver essa equação em uma única medição (Q_i), é necessário isolar K_{fs} assumindo um valor para ϕ_m .

No caso do Permeâmetro de Guelph, a equação é reorganizada para determinar K_{fs} para a carga i , usando o Fator de Fluxo de Furo Estabilizado (F_i), que já incorpora a influência da sucção do solo (ϕ_m).

O valor de K_{fs} para cada carga (H1 e H2) é dado pela equação:

$$K_{fs_i} = \frac{Q_i}{F_i} \quad (9)$$

Onde, Q_i : Vazão de água estabilizada para a carga i , calculada como $Q_i = R_i \times A$ (cm^3/s);

F_i : Fator de Fluxo de Furo Estabilizado para a carga H_i (cm^2). Este fator é componente chave, pois é calculado internamente pelo *software* com base no método de Reynolds & Elrick (1985) levando em conta a altura da carga (H_i), o raio do furo (a) e o Índice de Estrutura do Solo (neste caso sendo inserido conforme o tipo de solo da área de estudo)

Para o cálculo final da média aritmética, depois de calculado o K_{fs} separadamente, o valor final de Condutividade Hidráulica Saturada de Campo é obtido através da média aritmética simples:

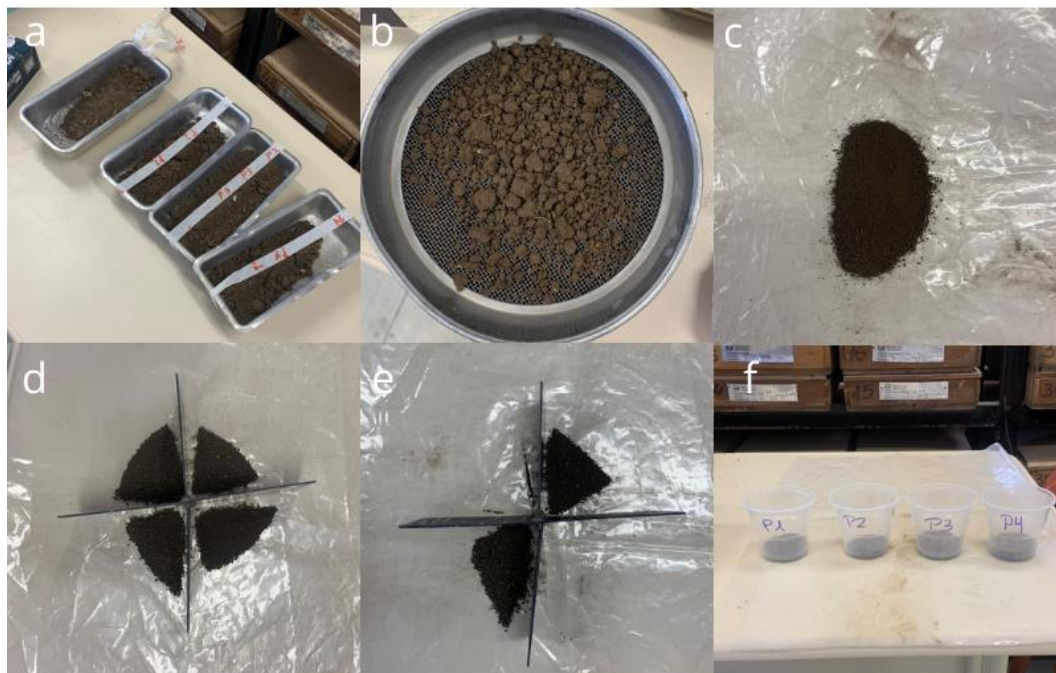
$$\text{Média } K_{fs} = \frac{Kfs1 + Kfs2}{2} \quad (10)$$

5.5 Amostras de Solo

Junto ao ensaio de infiltração, foram coletadas amostras de solo dos poços para análise posterior (Figura 20), para colaborar na interpretação e entendimento das áreas de recarga na área de estudo. As amostras passaram primeiramente pela estufa para secagem. Após a secagem, foram desagregadas e peneiradas, ficando retidos somente os grãos com tamanho inferior a 2 mm, para que possam ser processadas no granulômetro. Após a peneiragem, foi feito o quarteamento para obtenção de uma subamostra representativa do volume total. As amostras foram então encaminhadas para o granulômetro Microtrac Retsch GmbH Analisador de tamanho de partículas S3500 (Figura 21) para análise.

A análise granulométrica realizada pelo equipamento baseia-se na teoria da difração a laser (*Laser Diffraction*) (Syvitski, 1990). O princípio físico do método consiste na passagem de um feixe de laser através das partículas da amostra dispersas em meio fluido. Esse laser é refletido em ângulos específicos, proporcionalmente inversos ao seu tamanho: grãos maiores espelham a luz em ângulos menores, enquanto grãos menores espelham a luz em ângulos maiores. O equipamento detecta a distribuição da intensidade da luz espalhada, e, usando métodos matemáticos, calcula a distribuição do tamanho das partículas. Este método proporciona alta precisão e reprodutibilidade, sendo ideal para caracterizar desde a fração argila até areias grossas.

Figura 20 - a) Amostras coletadas. b) Processo de peneiramento. c) Grãos peneirados. d) Quarteamento. e) Continuação do processo de quarteamento. f) Amostras prontas para análise.



Fonte: autor.

Figura 21 - Microtrac Retsch GmbH Analisador de tamanho de partículas S3500.



Fonte: autor.

As amostras foram classificadas segundo a classificação granulométrica de Wentworth (1922), observada na tabela 1.

Tabela 1 - Classificação granulométrica de Wentworth (1922).

Classe Wentworth	Intervalo (mm)	Intervalo (µm)
Bloco	> 256	> 256.000
Calhau muito grosso	256 – 64	256.000 – 64.000
Calhau / Seixo	64 – 2	64.000 – 2.000
Grânulo	2 – 1	2.000 – 1.000
Areia muito grossa	1 – 0,5	1.000 – 500
Areia grossa	0,5 – 0,25	500 – 250
Areia média	0,25 – 0,125	250 – 125
Areia fina	0,125 – 0,0625	125 – 62,5
Areia muito fina	0,0625 – 0,031	62,5 – 31
Silte grosso	0,031 – 0,0156	31 – 15,6
Silte médio	0,0156 – 0,0078	15,6 – 7,8
Silte fino	0,0078 – 0,0039	7,8 – 3,9
Silte muito fino	0,0039 – 0,002	3,9 – 2
Argila	< 0,002	< 2

Fonte: Wentworth (1922).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como produto, este trabalho buscou reunir dados vinculados de geologia, geofísica e permeabilidade para subsidiar a tomada de decisão de áreas favoráveis à locação de poços de captação de água, visto que a área não possui dados sobre a potencialidade de locação.

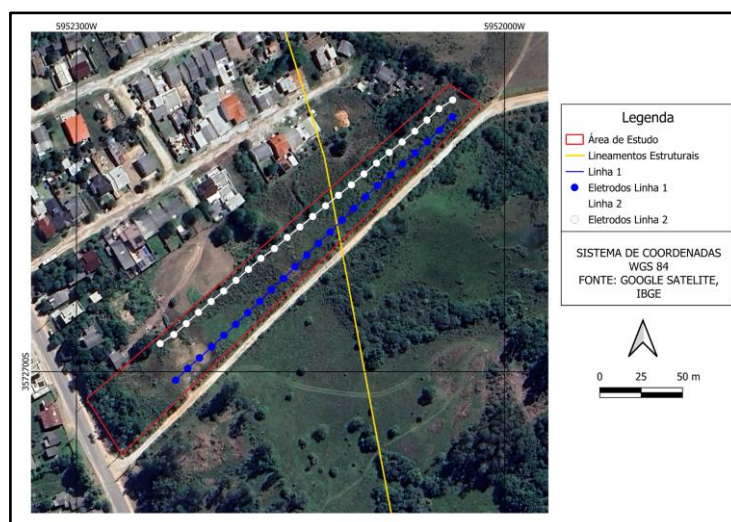
Os resultados foram subdivididos em cada um dos métodos aplicados.

6.1 Levantamento Geofísico

Como anteriormente mencionado, foram realizados dois levantamentos geofísicos, com linhas nos sentidos NE-SW.

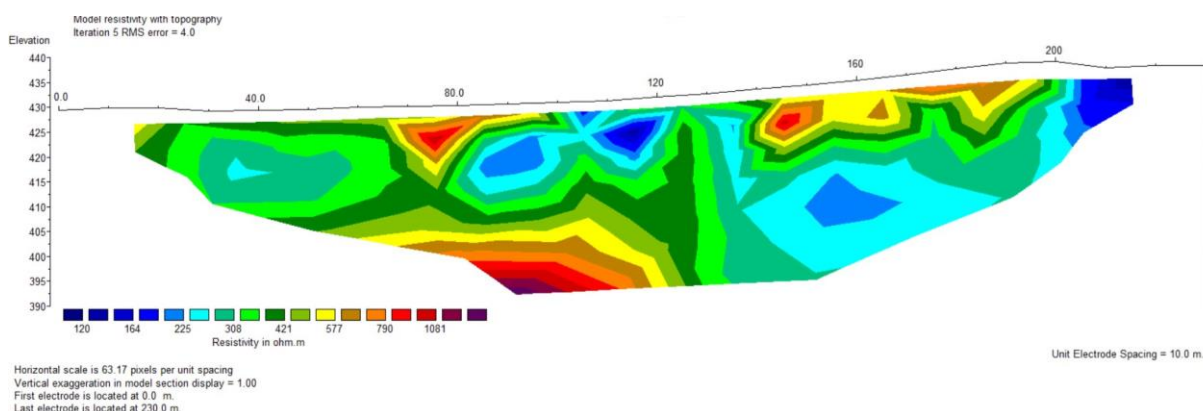
O modelo de inversão da Linha 1 (figuras 22 e 23), na direção NE-SW, possui topografia com suave declive, variando da cota 440 m para aproximadamente 430 m. Partindo da posição 230 m em direção ao marco zero, a porção inicial é marcada por valores de resistividade médios a baixos, com valores na casa de 223 ohm.m a 308 ohm.m. Na região entre 190 m e 140 m, observa-se próximo da superfície uma anomalia de alta resistividade, com valores entre 577 ohm.m e 790 ohm.m. Na porção central, entre 140 m e 100 m, é possível observar uma zona de baixa resistividade, podendo sugerir um mergulho em profundidade, com valores entre 120 e 255 ohm.m. Em contraste com essa zona condutiva, por volta dos 90 m identifica-se uma dualidade de valores verticalmente, com um núcleo de valores próximos de 1000 ohm.m na porção superior, e na base, na cota 395 m, uma anomalia com valores próximos de 1100 ohm.m. Na porção entre 50 m e o marco zero, observa-se um comportamento mais homogêneo, marcado por resistividades médias com valores entre 308 e 421 ohm.m, sem anomalias extremas.

Figura 22 - Disposição das linhas geofísicas e lineamentos estruturais.



Fonte: autor.

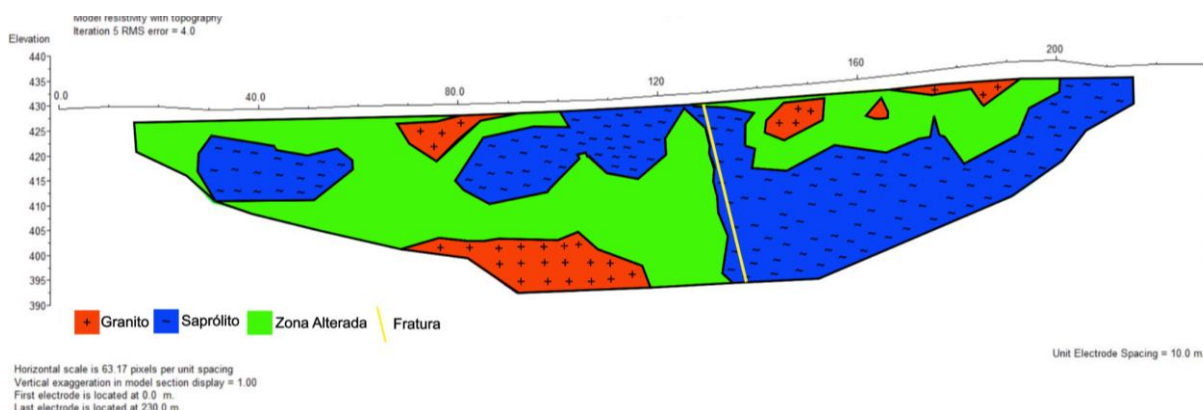
Figura 23 - Seção 2D de resistividade referente à Linha 1.



Fonte: autor

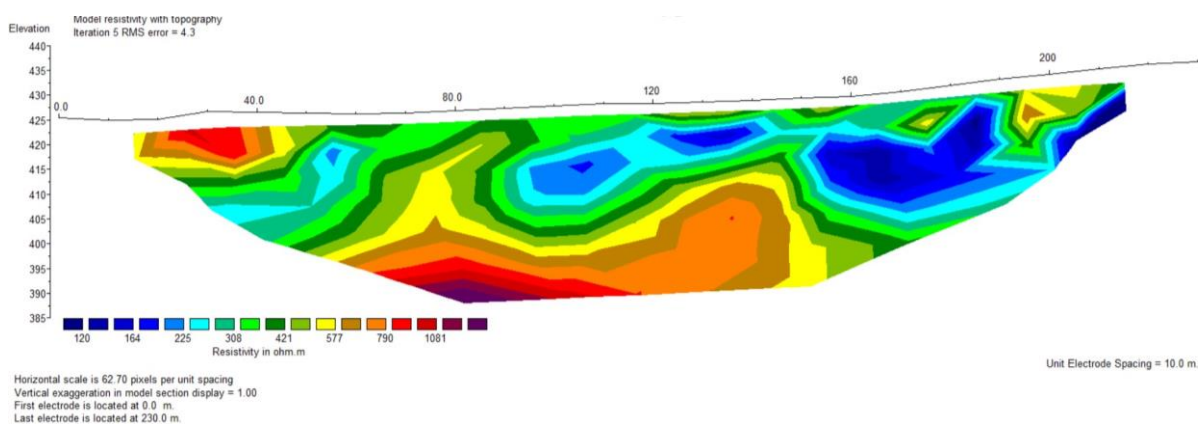
No perfil da Linha 2, (figuras 24, 25 e 26) pode-se observar uma zona de baixa resistividade entre as estações 220 m a 160 m, que se estende da superfície até a profundidade máxima da seção, registrando os menores valores do levantamento, na faixa de 120 a 225 ohm.m. Na porção central, por volta dos 140 m, ocorre uma transição abrupta em profundidade, onde na cota 415 m observa-se um corpo maciço de alta resistividade, com valores variando entre 577 e 790 ohm.m. No terço final da seção, a partir da estação 80 m ao ponto zero, o padrão de resistividade se torna mais elevado se comparado à porção inicial, com uma camada contínua de média a alta resistividade, entre as estações 308 a 421 m, e ainda uma anomalia de alta resistividade concentrado na porção dos 40 m, com valores próximos de 1081 ohm.m, sobrepondo áreas de resistividade média a baixa.

Figura 24 - Modelo Geofísico-Geológico desenvolvido a partir da integração de dados de resistividade e geológicos.



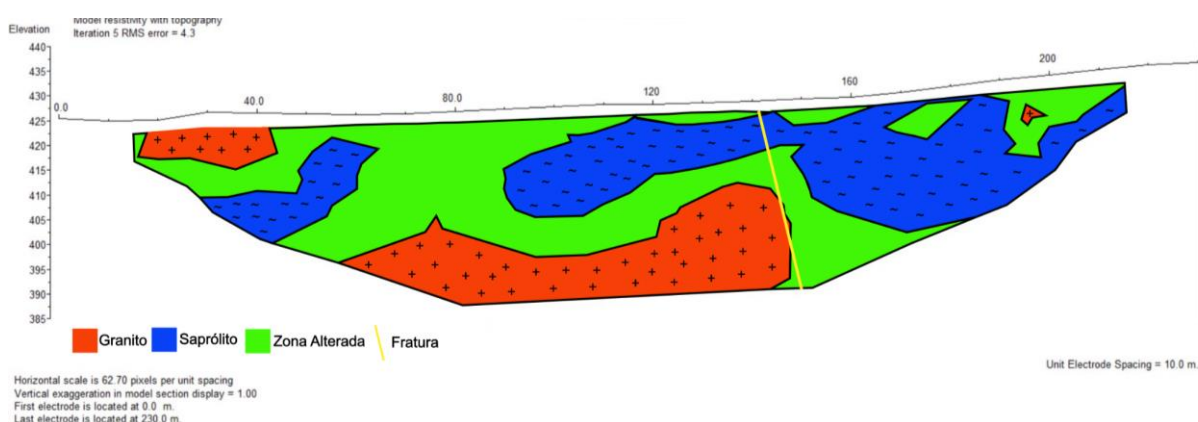
Fonte: autor.

Figura 25 - Seção 2D de resistividade referente à Linha 2.



Fonte: autor.

Figura 26 - Modelo Geofísico-Geológico desenvolvido a partir da integração de dados de resistividade e geológicos.



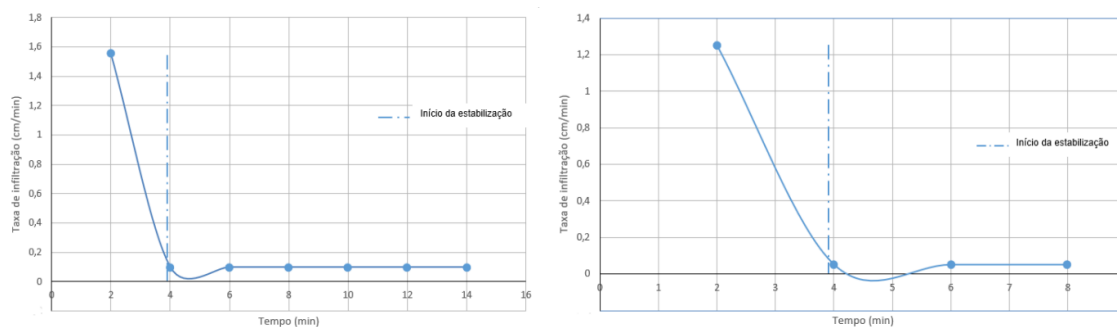
Fonte: autor.

6.2 Ensaios de Permeabilidade

Os ensaios de permeabilidade realizados com o Permeômetro de Guelph, a fim de determinar a Condutividade Hidráulica de Campo Saturada e avaliar o potencial de recarga da área de estudo mostraram valores distintos quanto à textura e estrutura do solo em cada ponto amostrado. Os valores são representados nas curvas de infiltração área cada ponto de amostragem.

No Ponto 1 (Figura 27), o cálculo final resultou num Kfs de $3,76 \times 10^{-5}$ cm/s, sendo classificado como argilo-arenoso, de permeabilidade baixa a moderada, favorecendo na percolação e recarga.

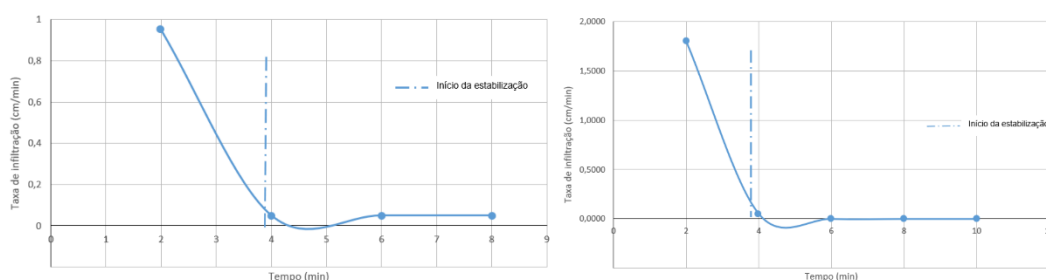
Figura 27 - Curvas de Infiltração referentes à primeira e segunda carga, respectivamente, do Ponto 1.



Fonte: autor.

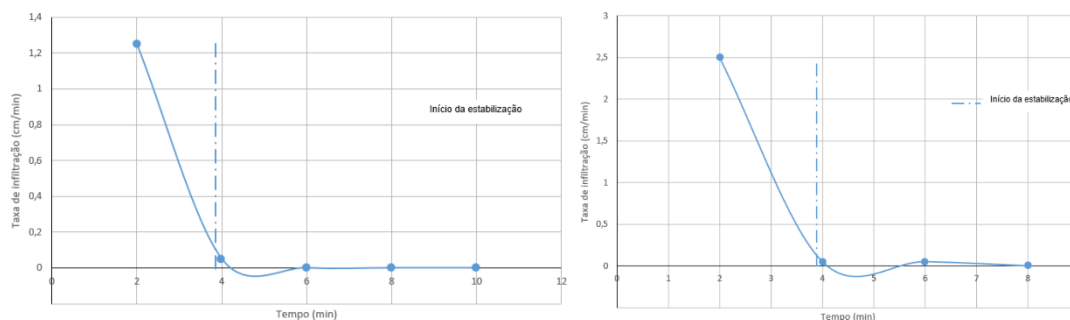
Os Pontos 2 e 3 (figuras 28 e 29) apresentaram os mesmos resultados, com Kfs de $2,33 \times 10^{-5}$, sendo classificada como baixa, relativamente menores que o Ponto 1. A maior porção de materiais finos (silte e argila) em comparação com areia acaba limitando a permeabilidade do solo. Estes resultados devem ser tratados com cautela, pois, segundo Reynolds (1985), as medições em que a primeira carga é igual ou maior que a segunda é inválida, pois o fato de dobrar a pressão da água (de 5 para 10 cm), a taxa de infiltração deveria aumentar. O fato de não ter aumentado pode ser um indicativo de problemas como compactação, colmatação dos poros durante a perfuração dos solos ou ar aprisionado nos tubos do equipamento.

Figura 28 - Curvas de Infiltração referentes à primeira e segunda carga, respectivamente, do Ponto 2.



Fonte: autor.

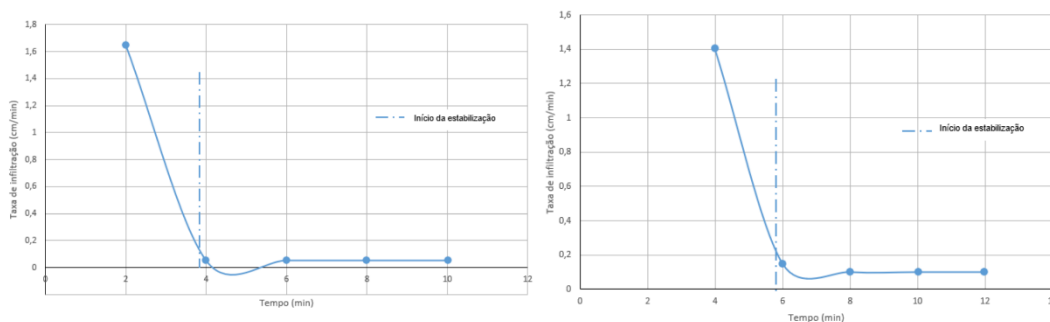
Figura 29 - Curvas de Infiltração referentes à primeira e segunda carga, respectivamente, do Ponto 3.



Fonte: autor.

Já o Ponto 4 (Figura 30), apresentou Kfs de $3,23 \times 10^{-5}$ cm/s, sendo classificado como arenoso, de permeabilidade baixa a moderada, ligeiramente maior que no Ponto 1. Segundo Freeze & Cherry (1979), é um bom resultado no contexto da rocha cristalina, onde valores nesta faixa são frequentemente considerados favoráveis para a recarga.

Figura 30 - Curvas de Infiltração referentes à primeira e segunda carga, respectivamente, do Ponto 4.



Fonte: autor.

Segundo Freeze & Cherry (1979), a os valores obtidos na faixa de 10^{-7} m/s classificam o meio superficial como tendo baixa permeabilidade. Pode-se ligar diretamente a baixa permeabilidade observada com a granulometria fina do solo. A pequena variação entre os resultados dos ensaios sugere uma significativa presença de silte e/ou argila em todos os horizontes superficiais testados, sendo um fator limitante para o fluxo de água.

A Kfs é fortemente controlada pela porosidade primária e pela conexão de poros (Hillel, 1998). Os valores de baixa magnitude indicam que a infiltração da água da chuva para a recarga do aquífero pela matriz do solo será lenta, com potencial para escoamento superficial ou acúmulo na zona não saturada.

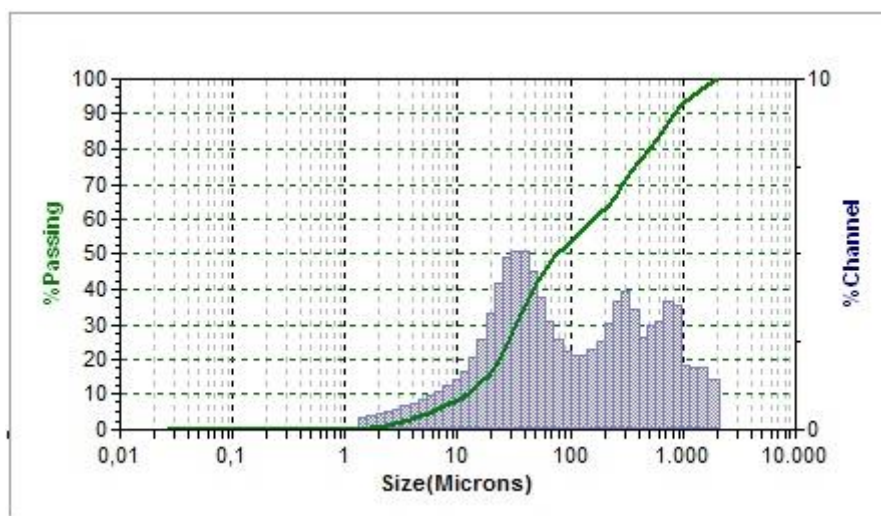
Porém, num estudo locacional como o presente trabalho, os resultados de baixa permeabilidade superficial têm menor peso do que a presença de fraturas ou contatos geológicos que permitam o armazenamento e circulação de água. Apesar dos resultados, os Pontos 1 e 4 possuem Kfs ligeiramente maiores, indicando áreas com uma capacidade de infiltração um pouco melhor.

6.3 Análises de Solo

As quatro amostras analisadas no equipamento Microtrac Retsch GmbH S3500 contribuíram na caracterização e interpretação das frações granulométricas.

A amostra P1 (Figura 31) possui distribuição granulométrica polimodal, tendo um pico principal de concentração na faixa de 20 μm a 60 μm (silte grosso), um pico secundário entre 200 μm e 400 μm (areia média) e um terceiro pico entre 700 μm e 900 μm (areia grossa).

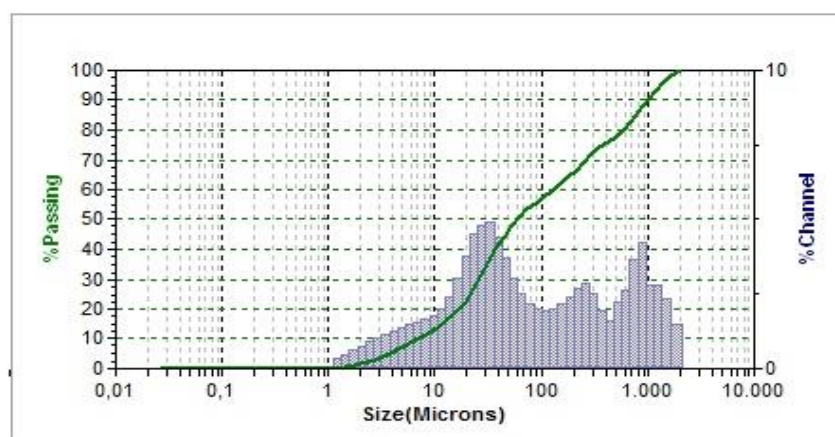
Figura 31 - Distribuição granulométrica do Ponto 1, com distribuição polimodal, predominando Silte Médio/Areia Fina.



Fonte: autor.

A amostra P2 (Figura 32) mostrou comportamento semelhante, também apresentando distribuição granulométrica polimodal, com pico principal de concentração na faixa dos 30 μm a 50 μm , na faixa dos silte grosso, pico secundário de menor concentração na faixa dos 100 μm a 300 μm (areia fina a média), e uma terceira concentração significativa de partículas mais grossas, entre 600 μm e 1500 μm .

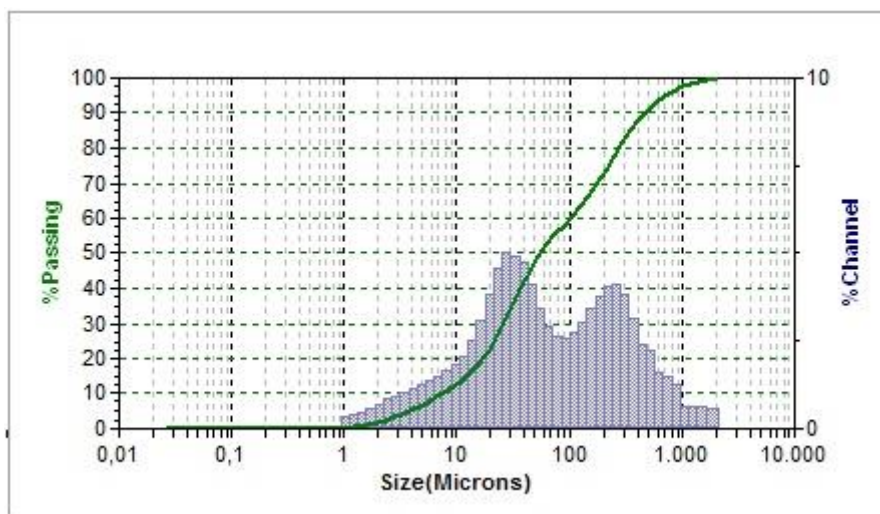
Figura 32 - Distribuição granulométrica do Ponto 2, com distribuição polimodal predominando Silte Médio, Silte Grosso e Areia Média.



Fonte: autor.

A amostra do P3 (Figura 33) apresentou uma distribuição granulométrica bimodal, com uma moda predominante na faixa dos 30 μm a 60 μm (silte grosso) e uma distribuição secundária na faixa dos 200 μm a 300 μm , na faixa das areias médias.

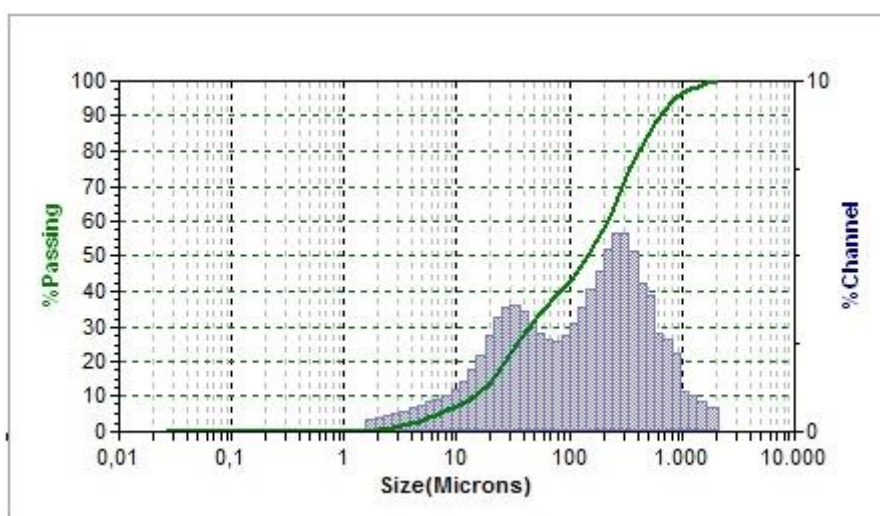
Figura 33 - Distribuição granulométrica do Ponto 3, com distribuição bimodal predominando Silte Médio/Grosso e Areia Fina.



Fonte: autor.

A amostra do P4 (Figura 34) diferenciou-se ligeiramente das demais, apresentando também uma distribuição granulométrica bimodal, mas com pico entre 20 μm e 40 de silte grosso μm e um pico principal na faixa entre 100 μm e 300 μm (areia muito fina a areia média), além de uma extensão considerável para areias grossas.

Figura 34- Distribuição granulométrica do Ponto 4, com distribuição polimodal, predominando Areia Fina e Silte Médio/Grosso.



Fonte: autor.

Segundo a classificação textural de Wentworth (1922), as amostras P1, P2 e P3 classificam-se como Siltes Grossos Arenosos, devido à sua concentração de partículas na faixa dos 30 μm a 60 μm , associados à uma fração arenosa menor. Já a amostra P4, por sua maior proporção de concentração de grãos entre 60 μm e 500 μm , se enquadra como Areia Siltosa. A ampla distribuição dos diâmetros analisados, abrangendo desde o silte médio até o cascalho fino, dá a classificação de todos os solos como Mal Seleccionados.

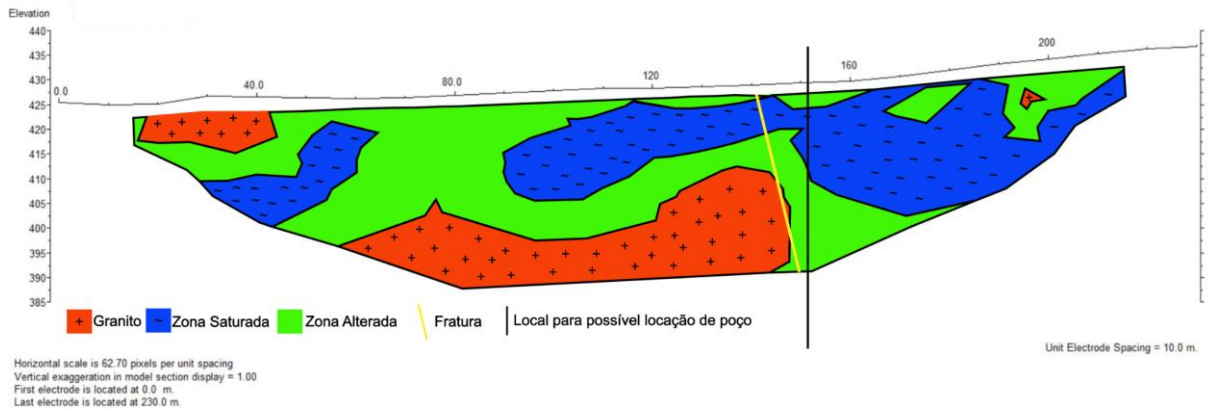
A caracterização granulométrica do material está diretamente relacionada com a dinâmica hidrogeológica de aquíferos em rochas cristalinas. Segundo Silva (2014), tais ambientes possuem dupla porosidade, sendo compostos por um aquífero granular superficial (saprólito) e um aquífero fissural nas porções mais profundas, e a recarga do sistema fissural, ou seja, a rocha fraturada, ocorre principalmente de forma indireta, condicionada pela infiltração da água por meio do manto de intemperismo.

Neste contexto, segundo Craig (2007), a distribuição granulométrica é uma das principais propriedades no que se diz respeito ao controle do comportamento hidráulico do material, e a ausência da camada de argila é determinante. Ainda segundo Craig (2014), a permeabilidade dos solos varia exponencialmente com o tamanho dos grãos: solos arenosos e siltosos possuem coeficientes de permeabilidade significativamente superior a solos argilosos, que atuam como camadas seladoras. A textura identificada neste trabalho garante que o manto de intemperismo tenha alta condutividade hidráulica, facilitando a infiltração rápida de água da chuva e minimizando o escoamento superficial, permitindo, então, que a água possa alimentar a fratura da rocha sã.

O local mais favorável para a perfuração de um poço deve considerar todos os testes feitos no presente trabalho, visando interceptar uma estrutura de alta permeabilidade que seja alimentada por uma zona de recarga eficiente, garantindo tanto vazão quanto permeabilidade. A análise da Linha 2 mostrou condições estruturais favoráveis, essenciais em aquíferos cristalinos: boa permeabilidade, com o poço sendo locado próximo a fratura inferida na metragem 140 m; armazenamento e recarga: a fratura possivelmente está conectada ao maior corpo da zona saturada do levantamento, por volta das metragens 160 m a 230 m, possivelmente representando um grande volume d'água que alimentará a fratura, garantindo a sustentabilidade do poço; e acesso à rocha sã: a fratura intercepta o granito em profundidade, fator que garantirá maior vazão e menor suscetibilidade à seca se comparado com poços que captam a água somente no saprólito.

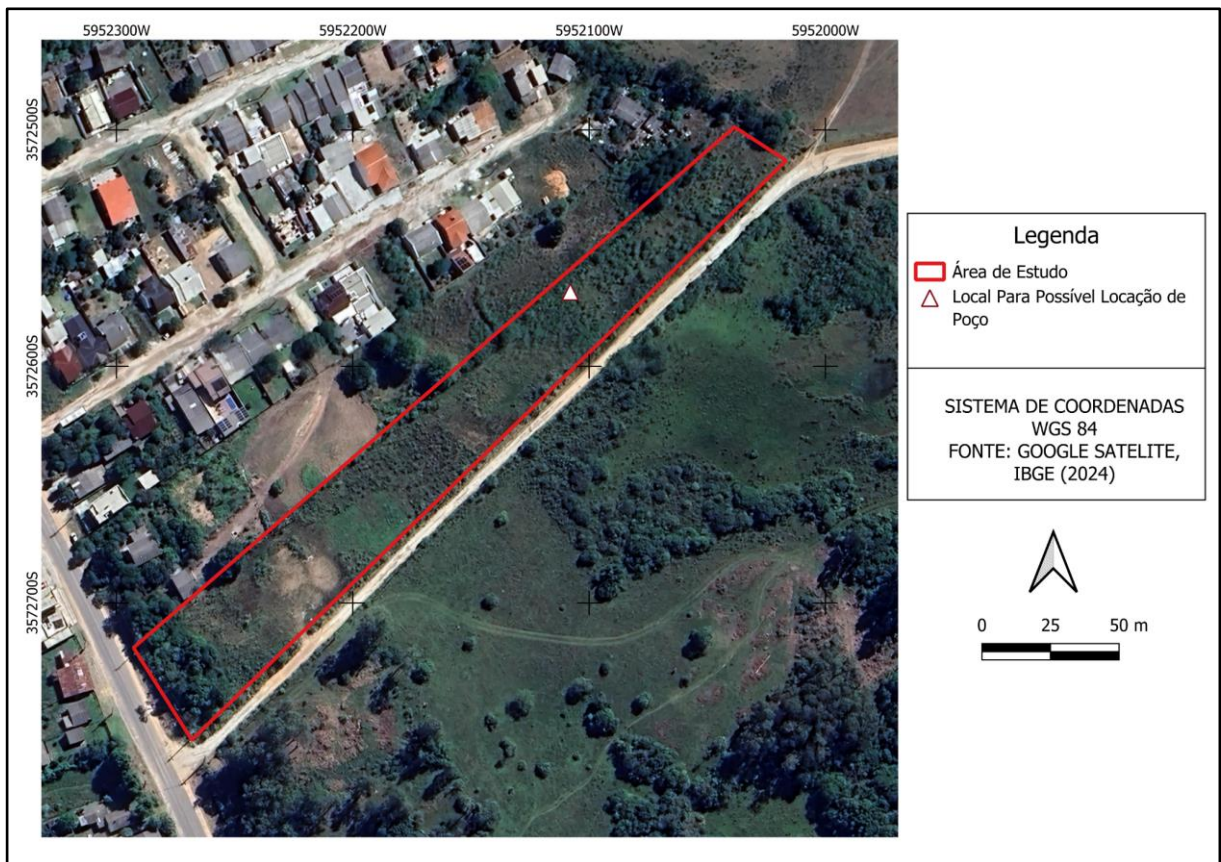
As figuras 35 e 36 mostram a localização para a perfuração no perfil geofísico e na área de estudo, respectivamente.

Figura 35 - Sugestão de localização de poço tubular profundo.



Fonte: autor.

Figura 36 - Sugestão para localização de poço tubular profundo na área de estudo.



Fonte: autor.

7. CONCLUSÕES

O presente trabalho atingiu os objetivos propostos, confirmando a eficácia da metodologia geofísica na prospecção de águas subterrâneas em rochas fraturadas. A interpretação dos perfis de eletrorresistividade permitiu a compartimentação do meio em três domínios: sienogranito maciço (alta resistividade), saprólito (resistividade intermediária) e zonas de baixa resistividade, se mostrando cruciais por serem representativas de material saturado e/ou altamente fraturado. Essa distinção foi fundamental para a identificação de uma fratura hidrogeologicamente relevante, localizada nas estações entre 120 m e 140 m em ambos os perfis. Os resultados obtidos fornecem um bom subsídio na gestão de recursos hídricos. Os dados granulométricos e de permeabilidade, demonstrando o favorecimento à infiltração e recarga devido ao manto de intemperismo predominantemente arenoso-siltoso, somam-se aos dados geofísicos que confirmam a instalação do nível freático nas zonas de baixa resistividade.

Desta forma, integrando todas as evidências, culmina-se na indicação da região próxima da estação de 150 m da Linha 2, visto que este ponto reúne os critérios essenciais de seleção: conexão direta com a zona saturada e proximidade com a fratura mais expressiva, concluindo a proposta inicial de forma satisfatória e tecnicamente embasada.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras**. Edição Especial. Brasília: ANA, 2015. 162 p.

ALVARES, C. A. et al. **Köppen's climate classification map for Brazil**. *Meteorologische Zeitschrift*, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AZAMBUJA, E.; CANCELIER, D. B.; NANNI, A. S. **Contaminação de solos por LNAPL: discussão sobre diagnósticos e remediação**. 2000. Disponível em: <http://www.azambuja.com.br/acervo/geosul2000.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2025.

BITENCOURT, M. **Geologia, petrologia e estrutura dos metamorfitos da região de Caçapava do Sul, RS**. 1983. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1983.

BOHN, N.; GOETTEN, W. J. Governança da água subterrânea no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista de Gestão de Águas da América Latina**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 33–43, jan./jun. 2014.

BOMFIM, L. F. C. Mapa de domínios/subdomínios hidrogeológicos do Brasil em ambiente SIG: concepção e metodologia. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA*, 16.; *ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS*, 17., 2010, São Luís. **Anais [...]**. São Paulo: ABAS, 2010. p. 8–10.

BORTOLOZZO, R. A. **Reconhecimento geofísico em aquífero fraturado em Caçapava do Sul (RS): análise comparativa entre arranjos de tomografia elétrica**. 2017. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2017.

CHEMALE JUNIOR, F. Evolução geológica do Escudo Sul-rio-grandense. *In: HOLZ, M.; DE ROS, L. F. (org.)*. **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CIGO/UFRGS, 2000. p. 13-64.

CRAIG, R. F. **Mecânica dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 365 p.

DALL'AGNESE, B. S. **Caracterização geológica-geofísica em uma área da Falha Açotéia-Piquiri aplicada à hidrogeologia, Santana da Boa Vista, RS**. 2015. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2015.

DE TONI, G. B.; DA COSTA, J. A. L. Kinematic analysis of the Caçapava do Sul Granitic Complex, southern Brazil: Ediacaran syntectonic magmatism and strain partitioning during inclined ductile extrusion along a transpressional shear zone, Dom Feliciano Belt. **Journal of South American Earth Sciences**, [S. l.], v. 133, p. 104996, 2024.

ESPINDOLA CANATA, R.; FERREIRA, F. J. F.; STEVANATO, R.; SOUZA FILHO, O. A. Integração dos métodos geofísicos de eletrorresistividade, polarização induzida e eletromagnético: Aterro Sanitário de Guaratuba-PR. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, v. 74, n. 1, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5380/geo.v74i1.45234>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/geociencias/article/view/45234>. Acesso em: 24 jun. 2025.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Brasília: CPRM, 2008.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979.

FREIRE, M. B. S.; PORTO, M. F. A.; HIRATA, R.; BRITO, A. L. **Diagnóstico da utilização de água subterrânea no Brasil**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral: Banco Mundial, 1998.

GALLAS, J. D. F. Prospecção de água subterrânea em aquíferos cristalinos com o emprego de métodos indiretos. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 24, n. 1/2, p. 43-51, 2003.

GIAMPÁ, C. E. Q.; GONÇALVES, V. G. **Águas subterrâneas e poços tubulares profundos**. São Paulo: Signus Editora, 2006. 502 p.

HARTMANN, L. A.; CHEMALE JUNIOR, F.; PHILIPP, R. P. Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no Precambriano. *In*: IANUZZI, R.; FRANTZ, J. C. (org.). **50 anos de Geologia: Instituto de Geociências**. Porto Alegre: Editora Comunicação e Identidade, 2007. p. 97–123.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An introduction to geophysical exploration**. 3. ed. United Kingdom: Blackwell Publishing Company, 2002.

KEYS, W. S. **Borehole geophysics applied to ground-water investigations**. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey, 1990.

KIRSCH, R. (org.). **Groundwater geophysics: a tool for hydrogeology**. 2. ed. Berlin: Springer, 2009

LOKE, M. H. **Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys**. [S. l.]: Geotomo Software, 2004.

LOKE, M. H. **Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys**. [S. l.]: Geotomo Software, 2017.

LOPES, C. G.; PIMENTEL, M. M.; PHILIPP, R. P.; GRUBER, L.; ARMSTRONG, R.; JUNGES, S. Provenance of the Passo Feio Complex, Dom Feliciano Belt: implications for the age of supracrustal rocks of the São Gabriel Arc, southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, [S. l.], v. 58, p. 9–17, 2015. DOI: 10.1016/j.jsames.2014.11.004.

LUIZ, J. G. Groundwater through geophysics: review and examples. **Brazilian Journal of Geophysics**, Rio de Janeiro, v. 40, supl. 1, p. 59–74, 2022. DOI: <https://doi.org/10.22564/brjg.v40i5.2147>. Disponível em: <https://sbgf.org.br/brazilian-journal-of-geophysics/index.php/BJGF/article/view/2147>. Acesso em: 22 jun. 2025.

LUSA, M. **Laudo geológico da área localizada na Chácara Grande, 1º Distrito, junto à Avenida Santos Dumont, Setor 10, Quadra 609, Caçapava do Sul, RS**. Caçapava do Sul: [s. n.], 2017. 23 p. Inédito.

MANZIONE, R. L. **Águas subterrâneas: conceitos e aplicações sob uma visão multidisciplinar**. Jundiaí: Paco Editorial, 2015.

MICROTRAC RETSCH GMBH. **Analisador de tamanho de partículas S3500**: manual. [S. l.]: Microtrac Retsch GmbH, [20--?]. Disponível em: <http://asi-team.com/asi%20team/Microtrac/Microtrac%20S3500.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2025.

NASCIMENTO, M. V. **Prospecção geofísica de água subterrânea na região da Picada Grande, Caçapava do Sul, RS**. 2024. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2024.

NWANKWOALA, H. O.; UDOM, G. J. Hydrogeophysics: an overview of general concepts, applications and future perspectives. *Scientia Africana*, Port Harcourt, v. 7, n. 2, p. 54–63, 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/317007229>. Acesso em: 22 jun. 2025.

PARASNIS, D. S. **Principles of applied geophysics**. 4. ed. Dordrecht; Londres; Nova Iorque: Springer; Chapman & Hall, 1997.

PHILIPP, R. P.; PIMENTEL, M. M.; CHEMALE JUNIOR, F. Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: geological relationships and U-Pb geochronology. *Brazilian Journal of Geology*, São Paulo, v. 46, supl. 1, p. 83–104, 2016.

REBOUÇAS, A. C. Água doce no mundo e no Brasil. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; CONICELLI, B. P.; HIRATA, R. Novos paradigmas na gestão das águas subterrâneas. *Águas Subterrâneas*, [S. l.], 2017. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28712>. Acesso em: 12 jun. 2025.

REGINATO, P. A. R.; MICHALSKI, E. Z.; PAIM, R. A. Água subterrânea. In: SCHÄFER, A.; LANZER, R.; SCUR, L. (org.). **Atlas socioambiental do município de Osório**. Caxias do Sul: EDUCS, 2017. p. 209–218.

REMUS, M. V. D.; HARTMANN, L. A.; MCNAUGHTON, N. J.; GROVES, D. I.; FLETCHER, I. R. The link between hydrothermal epigenetic copper mineralization and the Caçapava Granite of the Brasiliano Cycle in southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, [S. l.], v. 13, n. 3, p. 191–216, 2000.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. Infiltration using a Guelph permeameter. *Journal of Soil Science*, Oxford, v. 36, n. 4, p. 665-674, 1985.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. **Relatório anual sobre a situação dos recursos hídricos no estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: SEMA, 2007.

ROISENBERG, A.; VIERO, A. P.; FREITAS, M. A.; MACHADO, J. L. F. Os recursos hídricos subterrâneos no Rio Grande do Sul: uma visão sobre a saúde das águas e implicações na saúde das populações. In: IANUZZI, R.; FRANTZ, J. C. (org.). **50 anos de Geologia: Instituto de Geociências, Contribuições**. Porto Alegre: Editora Comunicação e Identidade, 2007.

SALVI, M. M. **Geologia e significado tectônico do Complexo Batoví, Terreno Taquarembó, Cinturão Dom Feliciano, São Gabriel – RS**. 2014. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SENDRÓS, A.; CABRERA, M. C.; CASAS-PONSATÍ, A. Application of geophysical methods for hydrogeology. *Water*, Basel, v. 17, n. 1, p. 98, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/w17010098>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/1/98>. Acesso em: 22 jun. 2025.

SILVA, D. B. da. **Análise da recarga e da conexão hidráulica do sistema aquífero granular-fissural no Campus Pampulha da UFMG, Belo Horizonte**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SILVA, J. L. da. **Caracterização hidrogeológica de aquíferos fraturados**: aplicação de métodos geofísicos e hidrogeológicos na região de São Carlos (SP). 2017. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/150778>. Acesso em: 20 jun. 2025.

SILVA HERNÁNDEZ, A.; SOARES DIAS, F. Estudo hidrogeológico e geofísico do aquífero fissural no Campus da UFMT-Cuiabá-MT. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 34, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v34i1.29771>. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29771>. Acesso em: 24 jun. 2025.

SOTO, M. A. A. **Estudo da condutividade hidráulica em solos não saturados**. 1996. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

SYVITSKI, J. P. M. (ed.). **Principles, methods, and application of particle size analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E.; KEYS, D. A. **Applied geophysics**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

WENTWORTH, C. K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. **The Journal of Geology**, Chicago, v. 30, n. 5, p. 377–392, 1922.

ANEXOS

Reservoir Cross-sectional area in cm²
 (enter "35.22" for Combined and "2.16" for Inner reservoir): **35,22**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **5**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **6,4**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **3**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0,1000**

Res Type	35,2	
H	5	
a	6,4	$\alpha^* = 0,12 \text{ cm}^{-2}$
H/a	0,78	
a*	0,12	C = 0,46668
CO.01	0,5	Q = 0,0587
CO.04	0,52	
CO.12	0,47	K_{fs} = 5,72E-05 cm/sec
CO.36	0,47	3,43E-03 cm/min
C	0,47	5,72E-07 m/sec
R	0,100	1,35E-03 inch/min
Q	0,06	2,25E-05 inch/sec
pi	3,14	
		Φ_m = 4,77E-04 cm²/min

Reservoir Cross-sectional area in cm²
 (enter "35.22" for Combined and "2.16" for Inner reservoir): **35,22**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **10**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **6,4**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **3**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0,0500**

Res Type	35,22	
H	10	
a	6,4	$\alpha^* = 0,12 \text{ cm}^{-2}$
H/a	1,5625	
a*	0,12	C = 0,76752
CO.01	0,778	Q = 0,02935
CO.04	0,8082	
CO.12	0,7675	K_{fs} = 1,80E-05 cm/sec
CO.36	0,7675	1,08E-03 cm/min
C	0,7675	1,80E-07 m/sec
R	0,050	4,25E-04 inch/min
Q	0,0294	7,09E-06 inch/sec
pi	3,1415	
		Φ_m = 1,50E-04 cm²/min

K_{fs} = 3,76E-05 cm/sec
2,26E-03 cm/min
3,76E-07 m/s
8,88E-04 inch/min
1,48E-05 inch/sec

Φ_m = 3,13E-04 cm²/min

Reservoir Cross-sectional area in cm²
 (enter "35.22" for Combined and "2.16" for Inner reservoir): **35,22**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **5**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **6,4**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **3**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0,0500**

Res Type	35,2	
H	5	
a	6,4	$\alpha^* = 0,12 \text{ cm}^{-2}$
H/a	0,78	
a*	0,12	C = 0,46668
CO.01	0,5	Q = 0,02935
CO.04	0,52	
CO.12	0,47	K_{fs} = 2,86E-05 cm/sec
CO.36	0,47	1,72E-03 cm/min
C	0,47	2,86E-07 m/sec
R	0,050	6,76E-04 inch/min
Q	0,03	1,13E-05 inch/sec
pi	3,14	
		Φ_m = 2,38E-04 cm²/min

Reservoir Cross-sectional area in cm²
 (enter "35.22" for Combined and "2.16" for Inner reservoir): **35,22**
 Enter water Head Height ("H" in cm): **10**
 Enter the Borehole Radius ("a" in cm): **6,4**

Enter the soil texture-structure category (enter one of the below numbers): **3**

1. Compacted, Structure-less, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.
2. Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.
3. Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.
4. Coarse and gravely sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropors, etc

Steady State Rate of Water Level Change ("R" in cm/min): **0,0500**

Res Type	35,22	
H	10	
a	6,4	$\alpha^* = 0,12 \text{ cm}^{-2}$
H/a	1,5625	
a*	0,12	C = 0,76752
CO.01	0,778	Q = 0,02935
CO.04	0,8082	
CO.12	0,7675	K_{fs} = 1,80E-05 cm/sec
CO.36	0,7675	1,08E-03 cm/min
C	0,7675	1,80E-07 m/sec
R	0,050	4,25E-04 inch/min
Q	0,0294	7,09E-06 inch/sec
pi	3,1415	
		Φ_m = 1,50E-04 cm²/min

