

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

AMANDA SANFERARI

AVALIAÇÃO DO CONTATO ENTRE DERRAMES COMO CONDICIONANTE DA
OCORRÊNCIA DE AQUÍFEROS FRATURADOS E DA PRODUTIVIDADE DE POÇOS
TUBULARES

PORTO ALEGRE

2022

AMANDA SANFERARI

AVALIAÇÃO DO CONTATO ENTRE DERRAMES COMO CONDICIONANTE DA
OCORRÊNCIA DE AQUÍFEROS FRATURADOS E DA PRODUTIVIDADE DE POÇOS
TUBULARES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestra.

Orientador: Pedro Antonio Roehe Reginato

PORTO ALEGRE

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Sanferari, Amanda

Avaliação do contato entre derrames como condicionante da ocorrência de aquíferos fraturados e da produtividade de poços tubulares / Amanda Sanferari. -- 2022.

111 f.

Orientador: Pedro Antonio Roehe Reginato.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Aquífero fraturado. 2. Condicionante de aquíferos. 3. Contato entre derrames. I. Roehe Reginato, Pedro Antonio, orient. II. Título.

AMANDA SANFERARI

AVALIAÇÃO DO CONTATO ENTRE DERRAMES COMO CONDICIONANTE DA
OCORRÊNCIA DE AQUÍFEROS FRATURADOS E DA PRODUTIVIDADE DE
POÇOS TUBULARES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Aprovado em: Porto Alegre, 18 de maio de 2022.

Prof. Dr. Pedro Antonio Roehe Reginato – UFRGS
Orientador

Prof. Dr. Gustavo Barbosa Athayde – UFPR
Examinador

Prof. Dr. Tiago de Vargas – FSG e SAMAE
Examinador

Prof^a. Dr^a. Franciele Schwanck Carlos – UFRGS
Examinadora

Dedico este trabalho à memória do meu avô, Luiz Bevilaqua Sanferari, como agradecimento ao seu amor e presença em todas etapas da minha vida. Sei que de onde estiver, festeja comigo essa também.

RESUMO

A circulação de água em reservatórios fraturados é controlada principalmente pelo sistema estrutural das rochas, através da ocorrência e da abertura de fraturas. Em geral, aquíferos fraturados são menos produtivos que aquíferos porosos, mas ainda assim, possuem função estratégica relevante para os municípios. É o caso do nordeste do Rio Grande do Sul, que possui no Sistema Aquífero Serra Geral o mais acessível e explorado reservatório de água da região. Dessa forma, esse trabalho teve como objetivo avaliar o contato entre derrames vulcânicos como possível condicionante de aquíferos fraturados e sua influência na produtividade de poços tubulares. Para tanto, o estudo foi desenvolvido em quatro etapas principais, iniciado com uma fase de levantamento de dados já existentes e construção de inventário de poços, com informações cedidas pela CORSAN e SIAGAS. A partir da interpretação dessas informações, somadas com novas coletas realizadas em trabalho de campo e com análise de filmagens de poços, foi realizada a caracterização geológica e hidrogeológica do polígono de estudo, através de gráficos e análises estatísticas. A avaliação da produtividade foi realizada pela metodologia proposta por Diniz (2012), que através dos valores dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos, classifica os poços de acordo com classes de produtividade. Os resultados permitiram identificar as formações geológicas da região, descrevendo a Formação Gramado como predominantemente composta por rochas basálticas, com derrames marcados por topos amigdaloides e porções centrais maciças. O contato entre os seus derrames não exibe erosão acentuada, mantendo o topo preservado. A Formação Palmas/Caxias diferencia-se por ser composta de rochas ácidas, com contatos de superfície irregular causados por uma estrutura erosiva. Observou-se que as rochas ácidas geralmente se localizam em altitudes superiores a 539m, enquanto as básicas em altitudes menores que 502m, e que o contato entre ambas formações é marcado por uma estrutura erosiva e bem definida. A avaliação hidrogeológica apontou um predomínio de poços localizados entre os 500 e 700m de altitude, com profundidade média de 127m e nível estático de 21m. As entradas de água predominam em até 3 ocorrências e localizam-se entre os 50 e 100m de profundidade. Os parâmetros hidrodinâmicos corresponderam o comportamento esperado para um aquífero fraturado, com capacidade específica menor que 0,5 m³/h/m e vazão predominante entre 1 a 20 m³/h. Observou-se que poços com entradas de água em altitudes menores que 550m, possivelmente cruzando a zona de contato entre formações, apresentam maior média que poços associados exclusivamente às rochas da Formação Palmas/Caxias, localizados acima dos 550m. Quanto a produtividade, o valor médio dos parâmetros indicou Classes mais produtivas quando as entradas de água estão localizadas entre 550 e 650m. Da mesma forma, entradas de água em poços de alta vazão ocorrem entre 600 e 650m, e poços que não alcançam zonas de contato possuem vazões inferiores ou são improdutivos. Por fim, a avaliação das áreas mais produtivas, através da análise de seções geológicas, indicou que as estruturas de contato controlam as entradas de água, gerando novas estruturas e favorecendo a circulação.

Palavras-chave: Aquífero fraturado. Condicionante de aquíferos. Contato entre derrames.

ABSTRACT

The water circulation in fractured aquifers is mainly controlled by the structural system of the rocks through the occurrences and opening of fractures. In general, fractured aquifers are less productive than granular aquifers. However, despite that, they still have a relevant strategic role for municipalities. This is the case of the northeast of the Rio Grande do Sul state, where the Serra Geral Aquifer System is the most accessible and exploited water reservoir. In this way, the objective of this work is to evaluate the contact between magma flows as a possible conditioning of fractured aquifers and its influence in the productivity of wells. The study was developed in four main steps, starting with existent survey data and wells inventory, with information provided by CORSAN and SIAGAS. Accordingly interpretation of these information, in addition to new data collected in the field and analysis of well footage, the geological and hydrogeological characterization of the study area was carried out through graphs and statistics analysis. The productivity evaluation was made using the methodology proposed by Diniz (2012), which using values of the hydrodynamic parameters, classified the wells according to productivity classes. The results allowed the identification of geologic formations of the area, describing the Gramado Formation as predominantly composed of basalts, with flows marked by amygdaloids tops and massive central portions. The contact between the lava flows does not show accentuated erosion, keeping the top preserved. The Palmas/Caxias Formation is distinguished by being composed by acidic rocks, with irregular surface contacts caused by an erosion structure. The acidic rocks are usually located at altitudes above 539 m, while basic rocks are located at altitudes below 502 m. The contact between both formations is marked by a well-defined erosive structure. The hydrogeological study displays a predominance of wells located between 500 and 700 m of altitude, with an average depth of 127 m and a static level of 21 m. Water inlets predominate in 3 occurrences and are located between 50 and 100 m of depth. The hydrodynamics parameters correspond to the expected behavior for a fractured aquifer, with specific capacity less than $0.5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ and flow rate between 1 and $20 \text{ m}^3/\text{h}$. It was observed that wells with water inlets in altitudes less than 550 m, possibly crossing the contact zone between the formations, display a higher average than wells associated exclusively with the rocks of Palmas/Caxias Formation, located above 550 m. In relation to the productivity, the average value of the parameters indicated classes that are more productive when the water inlets are located between 550 and 650 m of altitude. Likewise, water inlets in high flow rate wells occur between 600 and 650 m, and wells that do not reach contact zones display lower flow rates or are unproductive. Finally, the evaluation of the most productive areas, through the analysis of geological sections, indicated that the contact structures control water inlets, generating new structures and favoring water circulation.

Keywords: Fractured aquifers; Aquifer conditioning; Contact between magma flows

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da área de estudo, nordeste do estado do RS, com áreas urbanas das principais cidades.	18
Figura 2 - Localização da área de estudo na distribuição territorial e litológica da Bacia do Paraná.....	20
Figura 3 - Litoestratigrafia da sucessão Juro-Cretácea da Supersequência Gondwana III: distribuição dos arenitos Botucatu e do magmatismo Serra Geral	21
Figura 4 - Mapa da área de estudo com distribuição das litologias aflorantes.	24
Figura 5 - Derrames básicos sotopostos por fluxos de lavas ácidas em perfil geológico entre os municípios de Antônio Prado e São Marcos, RS.....	26
Figura 6- Estruturação dos derrames vulcânicos ácidos do tipo Palmas, envolto em base e topo por basaltos maciços dos derrames básicos.....	27
Figura 7 - Representação esquemática da geomorfologia formada pelo empilhamento de derrames na Bacia do Paraná.....	28
Figura 8 - Identificação das descontinuidades horizontais em seção esquemática de derrame basáltico.....	29
Figura 9 - Esquema representativo da ocorrência das principais fraturas sub-horizontais em derrames.....	30
Figura 10- Províncias hidrogeológicas da Fm Serra Geral. Unidades hidrogeológicas: a- ácidas aplainadas; b- ácida dissecada; c- básicas mamelonadas; d- básicas densamente dissecadas; e- básicas dissecadas; f- arenitos circundesnudados; g- básicas aplainadas; ..	32
Figura 11 – Detalhe da região de estudo no Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul, com descrição da possibilidade e produtividade do aquífero.	34
Figura 12 - Modelos básicos de propagação de fraturas.	38
Figura 13 - Fluxograma da metodologia aplicada	44
Figura 14 - Visão geral do banco de dados de poços elaborado no Microsoft Excel com as informações coletadas na etapa de levantamento de dados existentes.....	45
Figura 15 - Visão geral do banco de dados de poços elaborado no Microsoft Excel com as informações de entradas de água coletadas na etapa de levantamento de dados existentes.	46
Figura 16 - Banco de dados organizado no Microsoft Excel com informações dos contatos entre derrames.....	47
Figura 17 - Distribuição das classes de produtividade de aquíferos de acordo com vazão, transmissividade, capacidade específica e condutividade hidráulica.	50

Figura 18 - Mapa geológico da área de estudo com pontos de afloramentos observados em campo.	51
Figura 19 - Intercalação de zona maciça (centro de derrame) e zona vesicular (topo e base dos derrames) dos basaltos da Formação Gramado.	53
Figura 20 - Afloramento e desenho esquemático do contato entre topo e base de derrame apresentando amígdalas alongadas e arredondadas.	53
Figura 21 - Pacote central de derrame: maciço e fraturado, com disjunções tabulares.....	54
Figura 22 - Pacote central dos derrames de rochas ácidas: maciço, extremamente fraturado e com disjunções.....	55
Figura 23 - Base de derrame, vitrófiro maciço, dobras e domo gerados pela movimentação do fluxo.....	56
Figura 24 - Detalhe de afloramento: topo de derrame com vesículas e amígdalas centimétricas, além de geodos preenchidos por zeolita e quartzo.	57
Figura 25 - Base de derrame ácido, maciço e com ocorrência de vitrófiros.....	57
Figura 26 - Contato entre derrames básicos observados em cachoeira: topo de derrame sotoposto não apresenta erosão acentuada.....	58
Figura 27 - Contato entre derrames vulcânicos em afloramento de corte de estrada, estrutura paralela à colocação dos pacotes.....	59
Figura 28 - Diferentes contatos observados entre rochas ácidas: contato erosivo com superfície irregular entre os derrames	59
Figura 29 - Afloramento localizado em estrada no interior de São Marcos. Contato entre derrame básico de topo escoriáceo e derrame ácido de fluxo sub-horizontal.....	61
Figura 30 - Afloramento de corte de estrada localizado na BR116, em Caxias do Sul. Contato entre derrame básico vesicular (Gramado) e derrame ácido com fluxo sub-horizontal (Palmas/Caxias)	61
Figura 31– Mapa hidrogeológico da área de estudo com poços que exploram estritamente o SASG.	66
Figura 32 - Filmagem do poço COR ARV 11, mudança de pacote maciço para fraturado aos 39m.	77
Figura 33 - Filmagem do Poço 4 - UCS, em Caxias do Sul, pacote estreito e fraturado aos 25m.	77
Figura 34 - Filmagem do poço UCS – Caxias do Sul, contato entre derrames e presença de aberturas.....	78
Figura 35 - Filmagem do poço GAR 12, entrada de água através do pré-filtro aos 35m e NE encontrado aos 37m	79
Figura 36 - Filmagem do poço GAR 12, segunda entrada de água aos 55m e fim do revestimento aos 57m.	79

Figura 37 - Filmagem do poço GAR 12, fim do revestimento e camada pouco fraturada aos 63m	79
Figura 38 - Filmagem do poço 5498-FAB5, entrada de água em estrutura de contato entre derrames aos 42m.....	80
Figura 39 - Filmagem do poço 5498-FAB5, entrada de água pontual com pressão hidrostática aos 45m.....	81
Figura 40 - Filmagem do poço 5498-FAB5, passagem para pacote fraturado e entrada de água.....	81
Figura 41 - Filmagem de poço em Paraí, entrada de água rasa, provavelmente proveniente do lençol freático.....	82
Figura 42 - Filmagem do poço em Paraí, 3 entradas de água seguidas em mesmo pacote.....	82
Figura 43 - Filmagem dos poços CBA 05, CBA 20 e CBA21, zonas de entradas de água. ..	83
Figura 44 - Filmagem do poço CBA39, possível contato entre derrames marcado pelo deslocamento das paredes do poço	83
Figura 45 - Filmagem do poço São Jorge, aumento da densidade de fraturas até chegar no contato	84
Figura 46 - Filmagem do poço FLC 19, zona de contato identificada aos 60m.....	85
Figura 47 - Filmagem do poço Garibaldi, zona de contato sem entradas de água.	85
Figura 48 - Filmagem do poço NBA 26, zona de contato com entrada de água descrita no perfil construtivo.....	86
Figura 49 - Mapa geológico da área de estudo com a produtividade dos poços a partir da vazão.....	90
Figura 50 - Mapa geológico da área de estudo com a produtividade dos poços a partir da Capacidade Específica.....	91
Figura 51 - Análise de detalhe em área entre os municípios de Garibaldi e Carlos Barbosa	92
Figura 52 – Seção geológica obtida através do perfil A-A', entre os municípios de Carlos Barbosa e Garibaldi	93
Figura 53 - Seção geológica obtida através do perfil A-A", entre os municípios de Carlos Barbosa e Garibaldi	94
Figura 54 - Análise de detalhe em área no município de Flores da Cunha	96
Figura 55 – Seção geológica obtida através do perfil B-B', no município de Flores da Cunha	98
Figura 56 - Seção geológica obtida através do perfil C-C', no município de Flores da Cunha	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição de altitude dos derrames identificados conforme tipo de rocha e composição.....	23
Tabela 2 - Classificação das regiões de acordo com a Potencialidade do SASG na região .	42
Tabela 3 - Informações dos poços com filmagens utilizados na caracterização hidrogeológica	48
Tabela 4 - Faixas de altitudes de zonas de contato principais	65
Tabela 5 - Análise estatística da profundidade dos poços encontrado na área de estudo	68
Tabela 6 - Análise estatística da profundidade o NE dos poços.....	69
Tabela 7 - Análise estatística dos valores de vazão.....	73
Tabela 8 - Análise estatística dos dados de capacidade específica	74
Tabela 9 - Classes de produtividade conforme vazão e q, em faixas de altitudes das entradas de água	88
Tabela 10 - Dados construtivos e hidrodinâmicos dos poços utilizados no perfil A-A'	95
Tabela 11 - Dados construtivos e hidrodinâmicos dos poços utilizados no perfil A-A"	95
Tabela 12 – Dados construtivos e hidrodinâmicos dos poços utilizados no perfil B-B'	100
Tabela 13 - Dados construtivos e hidrodinâmicos dos poços utilizados no perfil C-C'	100

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição dos contatos identificados em campo conforme sua altitude	62
Gráfico 2 - Gráficos das altitudes de Entradas de Água presentes em camadas com estruturas de contato entre derrames.	63
Gráfico 3 - Gráficos de sobreposição entre as altitudes de Entradas de Água e contatos entre derrames identificados em campo.	64
Gráfico 4 - Distribuição dos dados de profundidade dos poços.....	67
Gráfico 5 - Distribuição dos dados de altitude dos poços	68
Gráfico 6 - Distribuição da profundidade do NE dos poços.....	69
Gráfico 7 - Distribuição da quantidade de entradas de águas nos poços.....	70
Gráfico 8 - Distribuição da profundidade das entradas de água nos poços	71
Gráfico 9 - Distribuição da altitude das entradas de água dos poços	71
Gráfico 10 - Distribuição dos valores de transmissividade dos poços	72
Gráfico 11 - Concentração dos valores de vazão dos poços	72
Gráfico 12 - Distribuição dos valores de capacidade específica dos poços	74
Gráfico 13- Variação da vazão conforme o número de entradas de água identificadas nos poços.....	75
Gráfico 14 - Variação da capacidade específica conforme o número de entradas de água identificadas nos poços	75
Gráfico 15 - Dispersão dos dados de vazão conforme altitude das entradas de água	76
Gráfico 16 - Distribuição dos poços nas Classes de Produtividade, pela metodologia de Diniz (2012).....	87
Gráfico 17 - Distribuição da altitude das EA em poços de alta vazão	89
Gráfico 18 - Distribuição da altitude das EA em poços de alta CE	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas

CE - Condutividade Elétrica

EA - Entrada de Água

Fm - Formação

CORSAN - Companhia Riograndense de Saneamento

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

NE - Nível estático

Q - Vazão

q - Capacidade Específica

RS - Rio Grande do Sul

SAG - Sistema Aquífero Guarani

SASG - Sistema Aquífero Serra Geral

SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

T - Transmissividade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVOS.....	17
3 ÁREA DE ESTUDO.....	18
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
4.1 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	20
4.1.1 Grupo Serra Geral.....	22
4.1.2 Morfologia de derrames vulcânicos.....	25
4.1.3 Estrutura e contato entre derrames vulcânicos.....	28
4.2 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO.....	32
4.3 CONDICIONANTES DE AQUÍFEROS FRATURADOS.....	37
4.4 PRODUTIVIDADE DE SISTEMAS AQUÍFEROS.....	40
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
5.1 LEVANTAMENTO DE DADOS EXISTENTES E INVENTÁRIO DE POÇOS TUBULARES.....	45
5.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA.....	47
5.3 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA.....	48
5.4 AVALIAÇÃO DO CONTATO ENTRE DERRAMES COMO CONDICIONANTE DA PRODUTIVIDADE DOS POÇOS.....	49
6. RESULTADOS.....	51
6.1 AVALIAÇÃO GEOLÓGICA E DOS CONTATOS ENTRE DERRAMES.....	51
6.1.1 Formação Gramado.....	52
6.1.2 Formação Palmas/Caxias.....	55
6.1.3 Contato entre derrames.....	58
6.2 AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA.....	66
6.2.1 Entradas de Água.....	70
6.2.2 Filmagens de poços.....	76
6.3 PRODUTIVIDADE DOS POÇOS.....	87
7. CONCLUSÕES.....	102
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104

1 INTRODUÇÃO

A água subterrânea é um vantajoso componente para o abastecimento público e privado das cidades brasileiras, e sua crescente preferência quando comparada aos recursos superficiais pode ser justificada pela melhor qualidade e menor custo de captação que ela oferece (ANA, 2015). Essa importância é contrastada com a carência de conhecimento dos reservatórios subterrâneos no país, que ocasiona o mal uso da água, a deficiência na construção de poços de exploração, e muitas vezes, a ausência de estudos técnicos para o melhor aproveitamento dos sistemas aquíferos (Freire, 2002).

Os aquíferos são classificados, basicamente, por dois parâmetros básicos: a porosidade e a pressão hidráulica. A primeira leva em conta a natureza física e o arranjo estrutural dos vazios das rochas, nos quais a água pode ser armazenada, e classifica os aquíferos em três tipos: granular, fraturado e cárstico. Nos fraturados, a porosidade desenvolve-se nas estruturas, tanto primárias como secundárias, e as características dessas feições têm ligação direta com a capacidade de armazenamento e de transmissão, como consequência, com a capacidade de produção de um poço (Rosa Filho, 2004).

Em geral, os aquíferos fraturados têm produtividade inferior à média dos porosos, mas ainda assim, têm uma função estratégica relevante para o abastecimento público (ANA, 2007). Esses reservatórios são condicionados por diversos fatores, sendo o de maior importância o sistema estrutural, visto que a porosidade das rochas vulcânicas está associada à presença de fraturas e zonas de fraturas.

Conhecer o que rege a circulação da água nos aquíferos fraturados permite a elaboração de modelos conceituais, os quais são imprescindíveis para o entendimento e monitoramento do sistema aquífero (Fernandes, 2008). Dessa forma, a investigação detalhada dos condicionantes geológicos passa a ser fundamental para a gestão dos recursos hídricos.

Entre os sistemas aquíferos fraturados presentes no estado do Rio Grande do Sul, destaca-se o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), que representa um dos principais reservatórios do estado, seja pelo alto número de poços perfurados ou por abrigar em sua área de afloramento cidades com extensa participação econômica.

Quanto aos condicionantes do SASG na região de estudo, Reginato et al. (2015) identificaram as estruturas tectônicas como fator principal, entretanto, destacaram também condicionantes secundários, como o relevo, o solo e a litologia. Associados a esses fatores, os contatos entre rochas vulcânicas e zonas vesiculares, rochas vulcânicas fortemente vesiculares e as disjunções horizontais dos riocitos também influenciam na produtividade do aquífero.

Outros estudos também observam que o contato entre derrames vulcânicos fornece condições favoráveis para o armazenamento e circulação da água, os quais funcionariam condicionando a ocorrência dos aquíferos e ampliando a produtividade dos poços (Rebouças e Fraga, 1988; Nanni, 2008; Elsenbruch, 2017).

Dessa forma, o objetivo central desse trabalho reside em avaliar as zonas de contato entre derrames vulcânicos como possíveis condicionantes da ocorrência e da produtividade dos aquíferos fraturados.

2 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo principal analisar o contato entre derrames vulcânicos como condicionante da ocorrência e da produtividade de aquíferos fraturados. Para isso, seguirá os seguintes objetivos específicos:

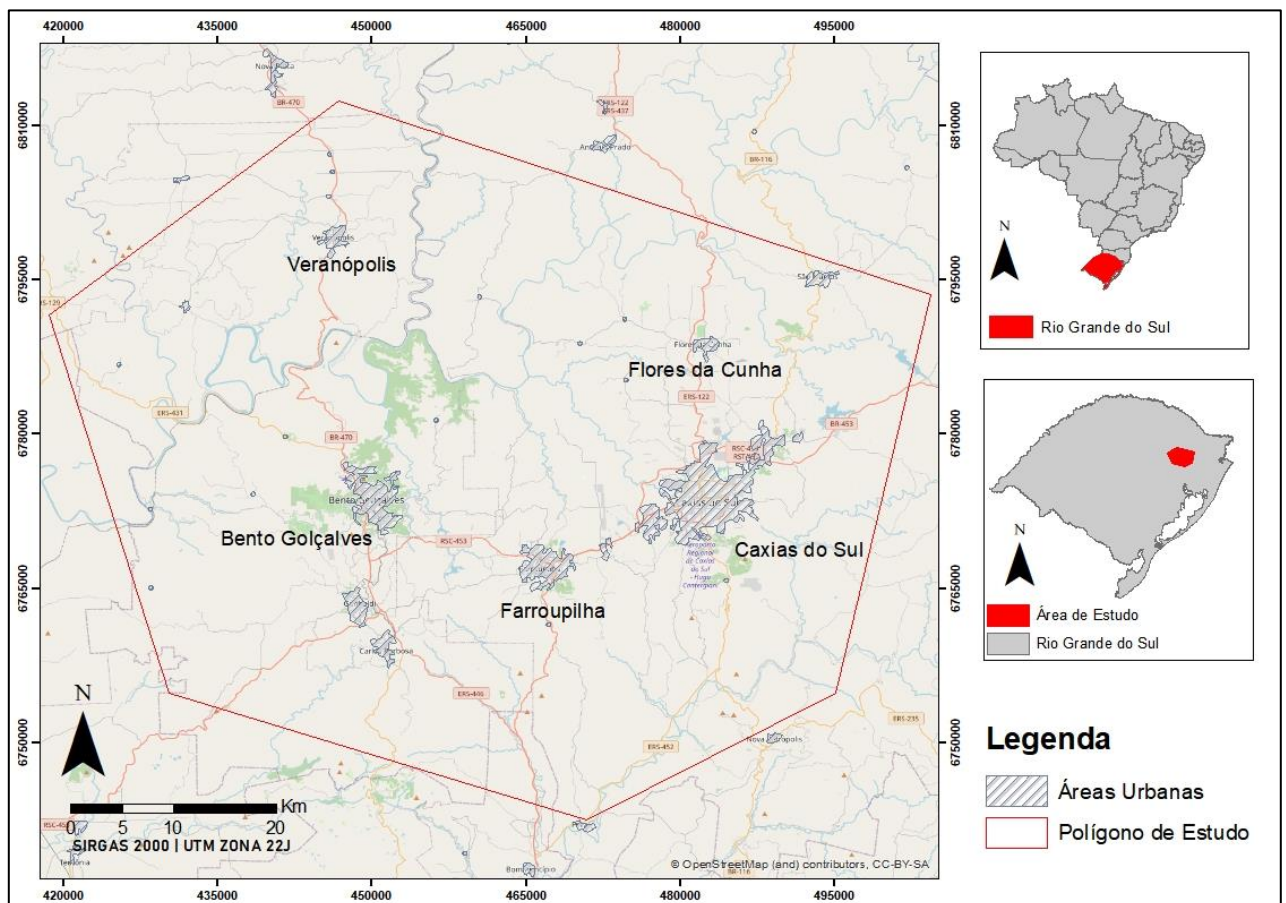
- Caracterização dos derrames vulcânicos e identificação das feições e estruturas associadas ao contato entre eles;
- Caracterização hidrogeológica do Sistema Aquífero Serra Geral na área de estudo;
- Análise e identificação da correlação entre os contatos entre derrames e a produtividade dos poços.

3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo constitui um polígono com dimensões de, aproximadamente, 4 mil km², que está posicionado no nordeste do estado do Rio Grande do Sul. Abrange os municípios de Bento Gonçalves, Caxias do Sul, Carlos Barbosa, Farroupilha, Flores da Cunha, Garibaldi e Veranópolis, além de outros pequenos municípios vizinhos (Figura 1).

A região foi escolhida por estar localizada em uma área de relevo dissecado, com abundante presença de escarpas, onde há a possibilidade de encontrar o contato dos derrames sendo interceptado pelo relevo, facilitando assim sua visualização. A escolha também foi pautada pela região apresentar uma boa quantidade de dados previamente coletados, que auxiliaram no estudo.

Figura 1 - Localização da área de estudo, nordeste do estado do RS, com áreas urbanas das principais cidades.



Fonte: Elaborado pela autora.

A porção está inserida nas bacias hidrográficas Taquari-Antas e Caí, e desempenha um importante papel no abastecimento hídrico da região para os fins de

consumo humano (68%), industrial (25%), agropecuário (5%) e recreativo (1,5%) (Reginato e Strieder, 2005).

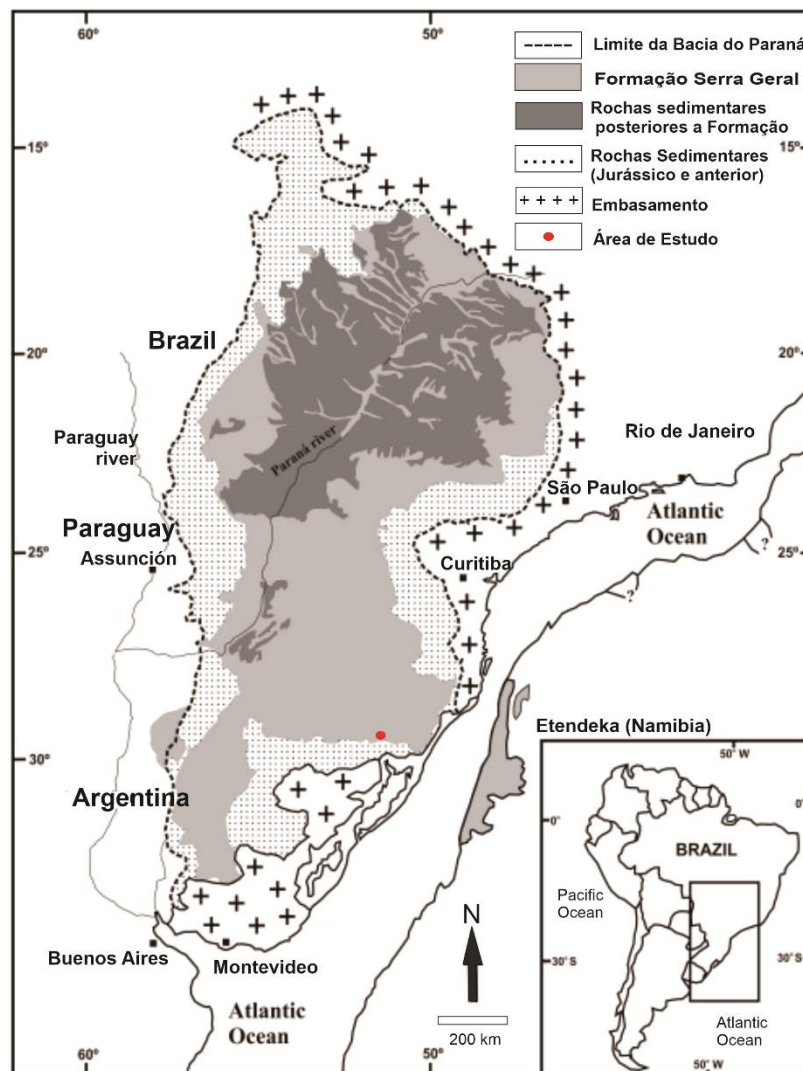
As águas também são muito utilizadas nas indústrias (vinícolas, laticínios, fábricas de sucos e refrigerantes), nas atividades comerciais, na agropecuária e no lazer (estâncias de águas termais) (Matos, 2020).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo posiciona-se na porção sudeste da Bacia do Paraná, que corresponde a uma extensa bacia sedimentar intracratônica, de formato elíptico, com eixo maior no sentido N-S (Figura 2). Seu registro estratigráfico compreende uma sequência sedimentar-magmática que abrange aproximadamente 1.500.000 km², distribuída em porções territoriais do Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai (Milani et al., 2007).

Figura 2 - Localização da área de estudo na distribuição territorial e litológica da Bacia do Paraná



Fonte: Modificado de Frank et al, 2009.

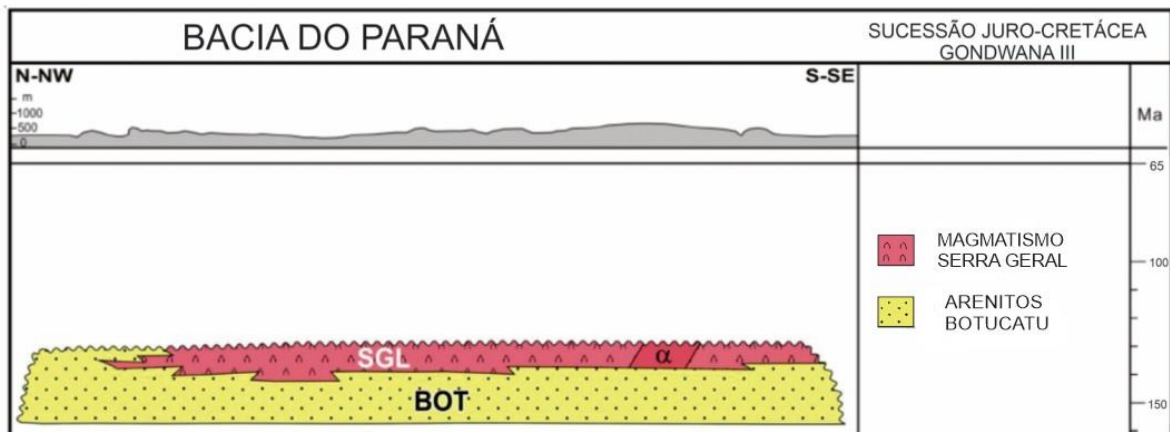
Na porção brasileira, dois terços da área da bacia estão cobertos por derrames basálticos que podem atingir isoladamente 1.300 m, e quando somados às rochas intrusivas rasas chegam a 2.000 m. Essa massa ainda é sotoposta por pacotes de rochas sedimentares, que somados aos derrames citados anteriormente, ultrapassam 7.000 m de espessura (Zalán et al. 1987).

A primeira proposta de coluna estratigráfica da Bacia do Paraná foi introduzida por White (1908) e, desde então, outros trabalhos vêm sendo feitos para identificar e descrever os diversos grupos, formações e membros que a constituem. Milani, 1997, dividiu o registro estratigráfico através da forma dos pacotes rochosos, divididos por superfícies de discordância, e os classificou em seis supersequências: (1) Rio Ivaí, (2) Paraná, (3) Gondwana I, (4) Gondwana II, (5) Gondwana III e (6) Bauru. As três primeiras correspondem a grandes ciclos transgressivos paleozóicos, enquanto as demais são representadas por pacotes de sedimentos continentais associados a rochas ígneas.

Durante o Eocretáceo, a crosta terrestre foi submetida a um fendilhamento e a um imenso magmatismo basáltico, momento em que o mega continente Gondwana se rompe e inicia a evolução do Oceano Atlântico Sul. Esse evento descrito por Milani (2007), refere-se a supersequência Gondwana III, formada a partir da associação de campos de dunas e eventos magmáticos, relacionadas ao início da ruptura do paleocontinente e consequente abertura do oceano.

A litologia formada pelos campos de dunas corresponde ao que são hoje os pacotes de sedimentos eólicos da Formação Botucatu, enquanto os eventos magmáticos representam os derrames da Formação Serra Geral, que marcam o fim dos eventos de sedimentação na área interior do megacontinente (Figura 3).

Figura 3 - Litoestratigrafia da sucessão Juro-Cretácea da Supersequência Gondwana III: distribuição dos arenitos Botucatu e do magmatismo Serra Geral



Fonte: Modificado de Milani, 2007.

A Formação Botucatu representa um imenso campo de dunas eólicas, caracterizado por estratos cruzados de grande porte (1-30m) interpretados como depósitos residuais de dunas eólicas (Scherer, 1998). Esta unidade sedimentar constitui-se por arenitos de coloração rosada, com granulometria fina a média, grãos arredondados de aspecto fosco, quartzosos. Na porção basal, são observados conglomerados e arenitos conglomeráticos depositados por inundações em lençóis e arenitos grossos a muito grossos interpretados como lençóis de areia eólicos (Scherer, 2002).

A Formação Serra Geral é composta por uma sucessão de derrames predominantemente de composição básica (toleítica), com uma espessura máxima de cerca de 1.700 m (Melfi et al., 1988).

4.1.1 Grupo Serra Geral

A Formação Serra Geral, inicialmente denominada por White (1908), agora chamada de Grupo Serra Geral por Wildner (2014), é resultado de um intenso magmatismo relacionado aos processos iniciais de distensão e quebra do Gondwana. Suas litologias consistem em basicamente basaltos toleíticos e andesitos basálticos, ocorrendo subordinadamente riolitos e riodacitos (Peate et al., 1992). O Grupo abrange uma área de 917.000 km², com um volume aproximado superior a 600.000 km³ (Frank et al., 2009).

Nardy et al. (2008), classificaram as rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral, de acordo com sua observação macroscópica, em três tipos petrográficos principais: o

majoritário, correspondente aos basaltos, exibe predominantemente textura intergranular. Os outros dois são representados por rochas de natureza ácida, denominadas de Palmas e Chapecó, sendo, respectivamente, a primeira maciça e afírica, e a segunda porfírica.

Wildner (2014), subdividiu o grande grupo de basaltos em 5 novas Formações, sendo elas: Gramado, Parapanema, Campos Novos, Cordilheira Alta e Campo Erê, além das formações ácidas já citadas: Chapecó e Palmas.

O Grupo Serra Geral ocupa no estado do Rio Grande do Sul uma área de 137.000 km², o que equivale a aproximadamente 50% da superfície do estado (Hausman, 1995). Na região nordeste, há ocorrência de, no mínimo, seis derrames de rochas básicas e três derrames principais de rochas ácidas, sendo que os níveis de vitrófiros são mais comuns nos derrames ácidos, enquanto as brechas ocorrem com mais frequência nos derrames de rochas básicas (Reginato, 2003).

Segundo Bortolin (2014), em estudo realizado no município de Carlos Barbosa, nordeste do RS, foram descritos sete tipos de derrames vulcânicos, identificados de forma que os de composição básica afloram em menor cota que os cinco restantes, de composição ácida (Tabela 1). Em estudo de Frenzel (2017), no município vizinho de Garibaldi, foi constatado que predominam rochas de composição riodacítica em afloramentos situados em altitudes de 526m ou mais, enquanto afloramentos em altitudes menores que 526m apresentam rochas de composição basáltica.

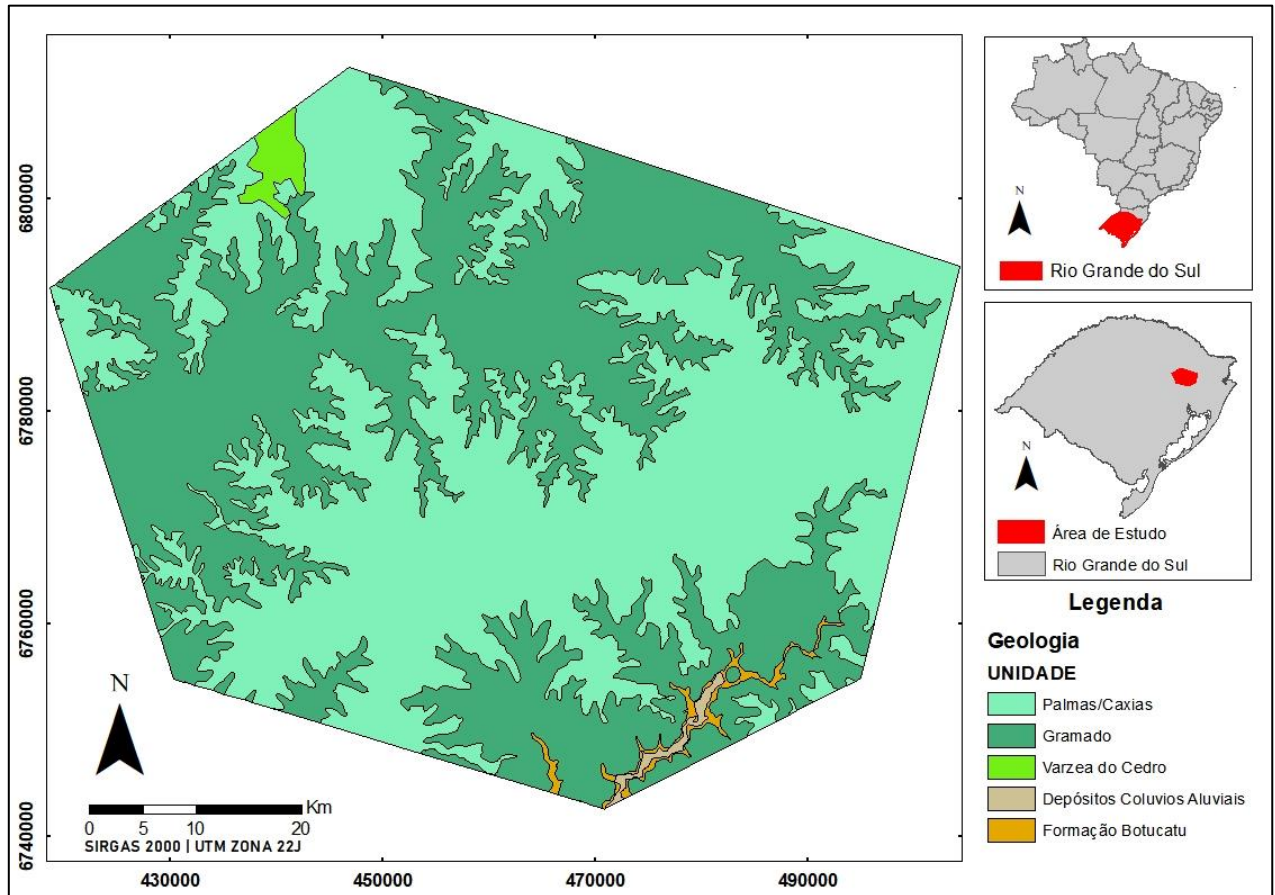
Tabela 1 - Distribuição de altitude dos derrames identificados conforme tipo de rocha e composição

Altitude Aproximada (m)	Rocha	Derrame
> 698	Riodacito	Derrame ácido 5
649 a 698	Riolito / Dacito	Derrame ácido 4
620 a 649	Riodacito	Derrame ácido 3
561 a 620	Riodacito	Derrame ácido 2
500 a 561	Riolito	Derrame ácido 1
445 a 500	Basalto	Derrame básico 2
até 445	Basalto	Derrame básico 1

Fonte: Bortolin (2014)

Conforme Figura 4, na região de estudo afloram as Formações Palmas/Caxias (ácida) e Gramado (básica).

Figura 4 - Mapa da área de estudo com distribuição das litologias aflorantes.



Fonte: Elaborado pela autora a partir de Wildner et al., 2008

As rochas vulcânicas ácidas do tipo Palmas (ATP) são caracterizadas pela coloração cinza clara, afírica, textura hipo a holohialina com marcante aspecto “sal-e-pimenta”. Exibe estruturas de resfriamento rápido, desenvolvendo formas esqueléticas, aciculares, ocas ou terminações em forma de cúspide. A matriz é composta por material semivítreo, que atinge em média 63% do volume da rocha, de coloração castanha escura, caracterizado pelo intenso intercrescimento de microlitos de quartzo e feldspato alcalino na forma de textura granofírica, que envolve por completo as fases cristalinas (Nardy et al., 2008).

As rochas vulcânicas básicas do tipo Gramado são caracterizadas pela ocorrência de basaltos e andesi-basaltos de coloração cinza escura, textura fanerítica muito fina a afanítica, dispostas em derrames de espessuras inferiores a 30 metros

(Wildner, 2014). Frequentemente apresentam horizontes vesiculares preenchidos por zeolitas, carbonatos, apresentando na porção inferior da unidade estruturas de fluxo do tipo pāhoehoe, enquanto a superior apresenta estruturas do tipo 'a'ā (Lima et al., 2012).

4.1.2 Morfologia de derrames vulcânicos

Os fluxos de lava podem apresentar uma grande variação na dimensão, geometria e nas características internas e externas. Os principais fatores que afetam a morfologia das lavas são: taxas de efusão, propriedades físicas - como a viscosidade e taxa de deformação de fluxo - e declividade do terreno (Cas e Wright, 1987).

Os derrames básicos podem ser distinguidos em 3 classes, de acordo com suas feições de superfície e estruturas: pahoehoe, 'a'a e lava em bloco (Macdonald, 1953). Derrames pahoehoe possuem superfícies lisas, onduladas ou em corda, causados por sua dinâmica que envolve um avanço na forma de lobos com pequena espessura, onde a crosta superior é rapidamente resfriada e formada (Hon et al., 1994). Os derrames tipo 'a'ā, são caracterizados por topo e base vesiculares, com zona central maciça, em função do avanço do derrame, associados a altas taxas de erupção ou deformação durante o fluxo. Lavas em bloco possuem uma porção superior formada por fragmentos angulosos que apresentam superfícies lisas e dimensões regulares, são geralmente formadas por magmas com maior viscosidade, de composição andesítica, dacítica ou riolítica (Schmincke, 2004).

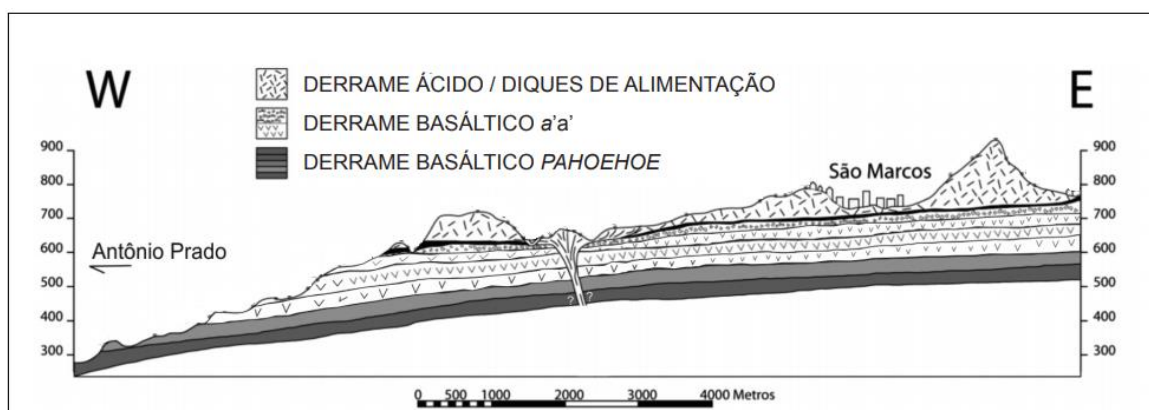
Quanto aos derrames ácidos, as lavas progridem na forma de fluxos laminares que tornam-se lobulares pela ação da viscosidade durante o deslocamento. As texturas e estruturas internas existentes, refletem a combinação de alta viscosidade e fluxo laminar. A estrutura interna de um derrame ácido, tem como características principais e distintivas a base com zonas maciças e auto-brechadas, vitrófiros no topo, e zonas intermediárias desvitrificadas com contato gradacional a convoluto (Fink e Pollard, 1983).

Os derrames de lava podem se apresentar como unidades de fluxo únicos, denominados de derrames simples, que são associados a taxas de efusão elevadas, ou como derrames compostos que são caracterizados por diversas unidades de fluxo, geralmente pequenos e pouco espessos, sobrepostos uns em relação aos outros e que se resfriaram simultaneamente (Frozza, 2015).

Os derrames do Serra Geral podem ser divididos em três porções morfológicas principais, relacionadas diretamente à alternância textural dos basaltos: basal, central e superficial. A porção basal do derrame é evidenciada por maior incidência de material vítreo e o topo é caracterizado por basalto vesicular e/ou amigdaloidal, com preenchimento por minerais secundários. A porção central do derrame é composta por basalto compacto com grau de cristalinidade variável e granulação afanítica à fanerítica grossa, com textura afírica à porfirítica.

As seções típicas do nordeste do RS apresentam espessas camadas de derrames ácidos e básicos, estando, geralmente, as unidades ácidas sobrepostas às unidades básicas. Essa distribuição é observada por Lima et al. (2012), em perfil entre os municípios de Antônio Prado e São Marcos, onde o contato é visível em uma cota de 630m e é marcado por uma lava máfica 'a'a' de topo muito vesiculado e amigdaloidal, coberto por lava félsica com foliações horizontais (Figura 5).

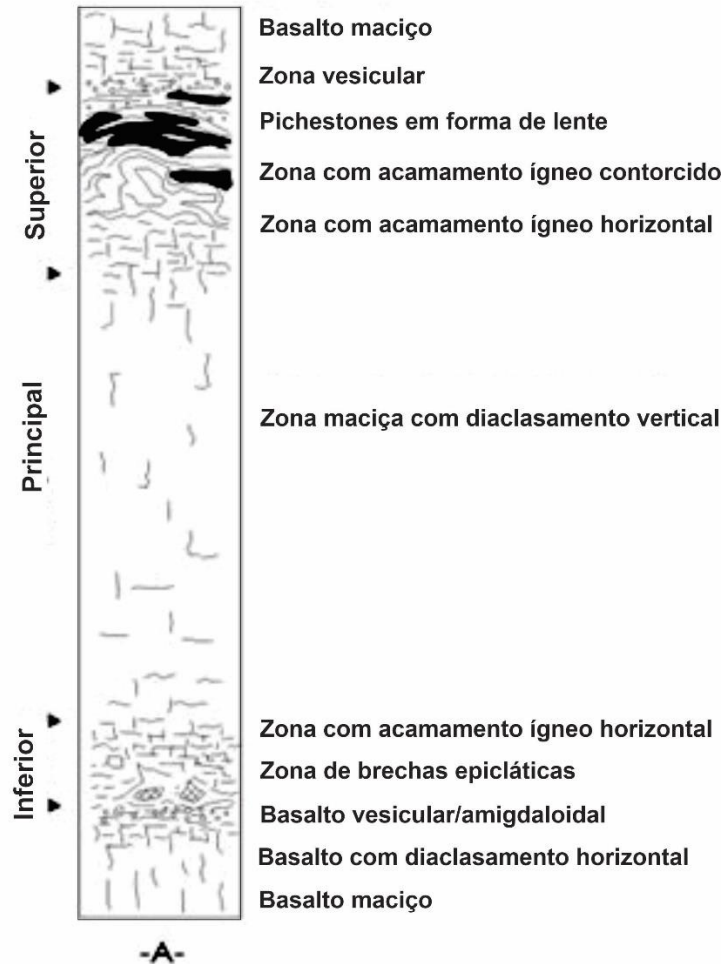
Figura 5 - Derrames básicos sotopostos por fluxos de lavas ácidas em perfil geológico entre os municípios de Antônio Prado e São Marcos, RS



Fonte: Lima et al., 2012.

A Figura 6 apresenta uma seção geológica clássica dos derrames Palmas/Caxias, com uma zona principal e mais espessa com diaclasamento vertical e vesículas e amígdalas milimétricas, estruturas clássicas de derrames ácidos. A zona de topo volta a apresentar disjunções tabulares que gradua para formas distorcidas onduladas, sobreposta por pichestones em formas de lente, intercalados às variedades hipohialinas e uma zona vesicular. O derrame ácido está limitado em base e topo por basaltos maciços, representando os derrames básicos (Nardy et al., 2008).

Figura 6- Estruturação dos derrames vulcânicos ácidos do tipo Palmas, envolto em base e topo por basaltos maciços dos derrames básicos



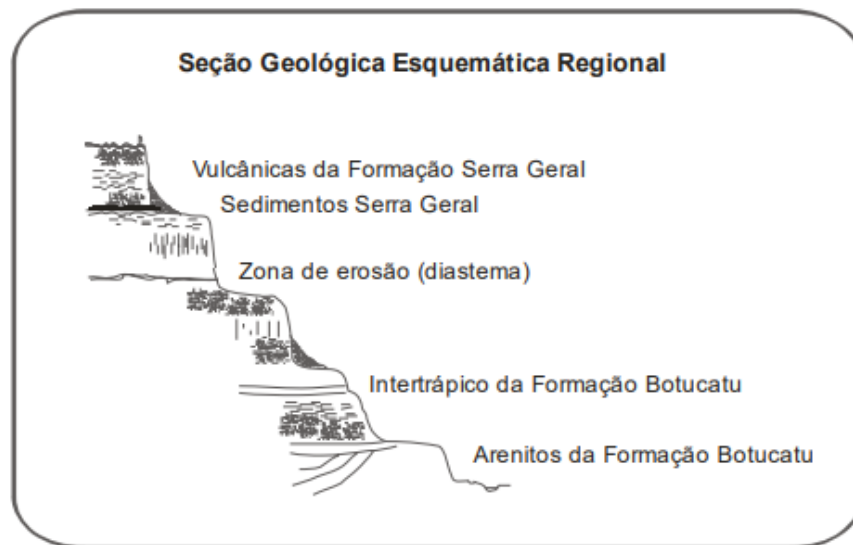
Fonte: Nardy et al., 2008.

O empilhamento e distribuição desses derrames, associados a suas estruturas primárias, afetam consideravelmente as condições geomorfológicas da região. Leinz (1949) destaca a morfologia em degraus nas regiões constituídas por derrames basálticos, onde os patamares sub-horizontais correspondem às zonas vesiculares e de fraturas horizontais; nestes, a decomposição e a erosão avançam predominantemente na horizontal. As encostas de declividade acentuada correspondem ao basalto denso com fraturas verticais, pois estas facilitariam a queda de blocos segundo essas fraturas.

As principais feições de relevo da Bacia do Paraná referem-se à formação de escarpas e patamares (Figura 7). Os Patamares da Serra Geral correspondem ao

prolongamento da região de escarpamento remanescentes, que formaram esporões interfluviais de formas alongadas e irregulares que se estendem sobre as regiões geomorfologicamente mais baixas, especialmente a planície costeira (Wildner et al., 2006).

Figura 7 - Representação esquemática da geomorfologia formada pelo empilhamento de derrames na Bacia do Paraná.



Fonte: Wildner et al. (2006)

As escarpas constituem-se do tipo Linha de Falha, com sua antiga frente já consideravelmente recuada e dissecada. Um dos agentes exógenos mais importantes na dissecação e recuo das escarpas é a drenagem, associada às linhas de fraqueza e orientação estrutural existente na área.

As áreas onde predominam formas mais dissecadas, são aquelas onde o relevo se desenvolve em rochas efusivas básicas. O relevo dissecado favorece a descarga junto às escarpas, da mesma forma que diminui o potencial de armazenamento, resultando em um local onde ocorrem muitas surgências (Wildner et al., 2006).

4.1.3 Estrutura e contato entre derrames vulcânicos

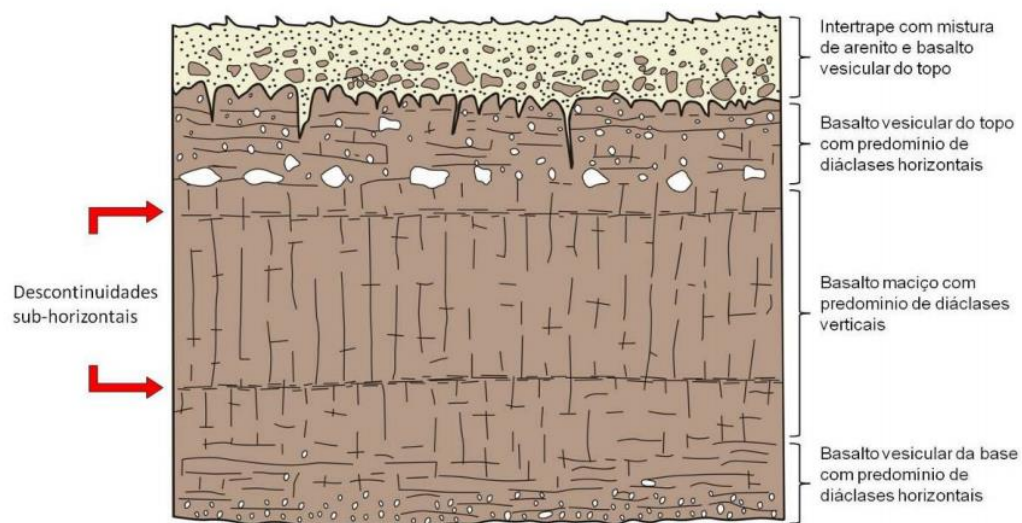
O resfriamento do derrame básico ocorre a partir das extremidades para o centro do derrame e durante esse processo podem ser geradas juntas de contração por resfriamento. As juntas de resfriamento são normalmente sub-verticais e formam disjunções colunares em forma de prismas alongados, que se desenvolvem

preferencialmente em um sistema hexagonal (Spry 1962). Ao longo das disjunções colunares podem ocorrer juntas transversais, que interceptam as colunas e correspondem a juntas planares de pequena extensão (Lyle 2005).

As fraturas sub-horizontais de grande continuidade lateral são típicas de derrames básicos, e em geral, dos derrames pahoehoe, pois esses geram um padrão topográfico horizontalizado em sua colocação (Hon et al., 1994). As primeiras definições das estruturas sub-horizontais apresentam grande divergência de nomenclatura e definição. Inicialmente chamada de “juntas-falhas”, Guidicini e Campos (1968) descreveram que as fraturas sub-horizontais de grande continuidade lateral dentro do derrame se limitavam a zona de basalto maciço das zonas vesiculoso-amigdaloidal de topo e base, definindo assim, estruturas de contato entre derrames.

Posteriormente, Guidicini (1979) observou que essas fraturas poderiam estar presentes em diversas partes do derrame, e não apenas delimitando diferentes zonas morfológicas do pacote (Figura 8). Além disso, estão geralmente dispostas sub-paralelamente ao topo e a base do derrame, são planares e encontram-se abertas ou com preenchimento milimétrico.

Figura 8 - Identificação das descontinuidades horizontais em seção esquemática de derrame basáltico.



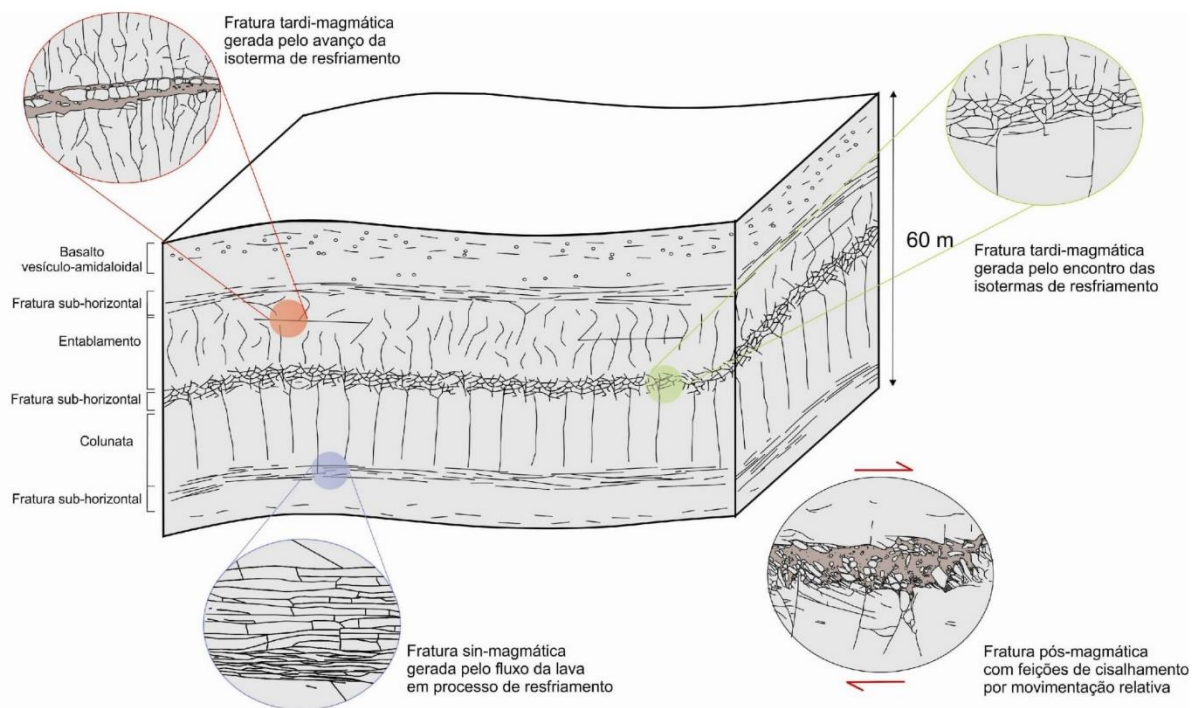
Fonte: Retirado de Curti (2011) apud Guidicini e Campos (1968)

Individualmente, os planos de falha possuem grande continuidade lateral e comportamento espacial complexo, ora se confundindo com o contato entre derrames, ora se ramificando. Por apresentarem grande continuidade lateral, essas estruturas

comumente apresentam-se associadas a outras feições do derrame, como bolsões de brecha, disjunções colunares de resfriamento e diferenças texturais do basalto.

Curti (2011) propõe uma classificação das fraturas sub-horizontais, de acordo com suas principais características e agrupadas segundo os diferentes processos genéticos, nomeando-as em sin, tardi e pós magmáticas (Figura 9).

Figura 9 - Esquema representativo da ocorrência das principais fraturas sub -horizontais em derrames.



Fonte: Modificado de Curti (2011)

As fraturas sin-magmáticas (feição de fluxo) estão localizadas abaixo da zona vesicular do topo e próximo a base do derrame, sendo geralmente paralela a base e topo, e de espessura variável. São condicionadas pela superfície de deslocamento e capazes de promover um rápido resfriamento e aumento da viscosidade da lava nessa porção. As fraturas tardi-magmáticas são representadas pelas juntas de resfriamento, e são caracterizadas por serem estruturas longas (dezenas de metros), pouco espessas (centímetros) e pouco onduladas (Guidicini e Campos, 1968). Representam os estágios progressivos de resfriamento do magma. Já as fraturas pós-magmáticas são responsáveis pela geração e fraturas por alívio e por cisalhamento, e podem ocorrer desde uma única junta persistente até uma família de juntas sub-horizontais pouco espaçadas. Em geral, ocorrem próximo à superfície, e podem se apresentar

abertas ou preenchidas por material de alteração do basalto (Dunne e Hancock, 1994).

As estruturas sub-horizontais podem representar zonas de percolação de fluidos preferenciais, condicionando a existência de uma permeabilidade horizontal, que quando aliadas às camadas intertrapeadas, pode representar uma permeabilidade até duas vezes maior que a vertical (Rebouças, 1978; Lastoria et al., 2006).

A quantidade e existência de fluxo de água subterrânea através de rocha são de baixa porosidade primária depende inicialmente da densidade, conectividade e abertura das fraturas presentes (Domenico & Schwartz, 1990). Os sistemas de fraturas presentes nos derrames basálticos constituem descontinuidades de grande importância como rotas de percolação de fluidos (Fernandes et al. 2010).

Os basaltos podem ter produção bastante independente da presença de fraturas tectônicas, já que apresentam feições de resfriamento sub-horizontais abundantes e permeáveis que, no entanto, devem estar fechadas em maiores profundidades (Fernandes, 2008). Morin e Savage (2003) mostram que a diminuição da abertura de fraturas com a profundidade é significativa para fraturas sub-horizontais, pois a transmissividade a partir de 10-25 m diminui muito. No entanto, para fraturas de alto mergulho, a transmissividade é independente da profundidade, mas é dependente da sua orientação em relação ao campo de esforços atual.

Em termos de implicações para o fluxo, quando esse for transversal às camadas, poderá ser inibido e fazer com que sua permeabilidade paralela seja muito maior que a transversal. Exemplo marcante deste caso corresponde aos basaltos do Grupo Serra Geral, cujas principais descontinuidades permeáveis foram bem caracterizadas nos estudos desenvolvidos para a construção de barragens principalmente nos estados de São Paulo e Paraná. Estes estudos demonstram que as estruturas permeáveis correspondem, na grande maioria das vezes, a zonas de fraturas sub-horizontais, muitas vezes próximas aos contatos entre derrames, mas também situadas em meio às porções centrais de basaltos densos (Rebouças, 1978).

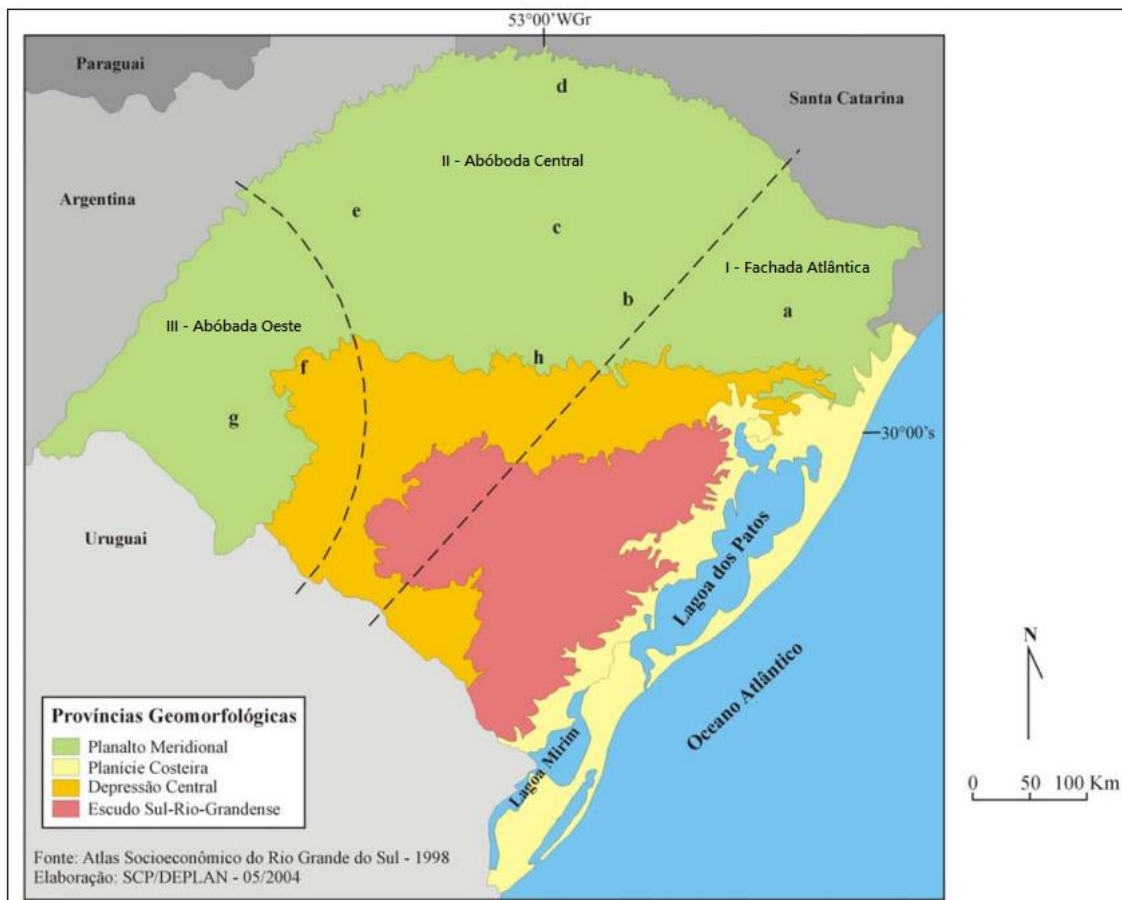
4.2 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

De maneira geral, a área de estudo está inserida na Bacia Sedimentar do Paraná, onde os aquíferos estão associados às rochas sedimentares e vulcânicas. Os principais sistemas aquíferos são o Guarani (representado principalmente pelas Formações Botucatu e Pirambóia), Serra Geral (associados às rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral) e Bauru (associados às rochas sedimentares do Grupo Bauru), com volume estimado de 50.000 km³ (Rebouças, 1988).

Em escala regional, Lisboa (1993) classifica o estado do Rio Grande do Sul em oito unidades hidrogeológicas, condicionadas por três principais unidades morfotectônicas. O oeste do estado ocupa as unidades hidrogeológicas (a) ácidas aplainadas e (b) ácidas dissecadas, controladas pela Unidade Morfotectônica Fachada Atlântica (Figura 10).

A província hidrogeológica Ácidas Aplainadas é descrita por rochas vulcânicas ácidas, de relevo pouco dissecado e um manto de alteração de espessura média. Os lineamentos ocorrem de médio e pequeno porte com orientação principal à nordeste, que, em conjunto com o relevo, proporciona um bom potencial aquífero. A província Ácidas Dissecadas também apresenta lineamentos de pequeno e médio porte, porém fragmentados pelo alto grau de dissecção do relevo, e por isso, apresentam um baixo potencial hidrogeológico (Lisboa, 1996).

Figura 10- Províncias hidrogeológicas da Fm Serra Geral. Unidades hidrogeológicas: a- ácidas aplainadas; b- ácida dissecada; c- básicas mamelonadas; d- básicas densamente dissecadas; e- básicas dissecadas; f- arenitos circundesnudados; g- básicas aplainadas;



Fonte: Modificado de Machado (2005; Lisboa (1993)

O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) abrange no Brasil os estados de São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, apresentando águas de boa qualidade que são utilizadas para o abastecimento de diversas atividades em função das demandas locais e características do aquífero.

No estado do Paraná, o sistema aquífero costuma apresentar excelentes vazões com águas de boa qualidade. Embora sofra grande variação, a vazão tem em média $25\text{m}^3/\text{h}$ e capacidade específica de $2,46\text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (Athayde, 2013). As entradas de água predominam em altitudes mais superficiais, com mediana em 77 metros e poços com profundidades entre 100 e 150m (Athayde e Muller-Athayde, 2016).

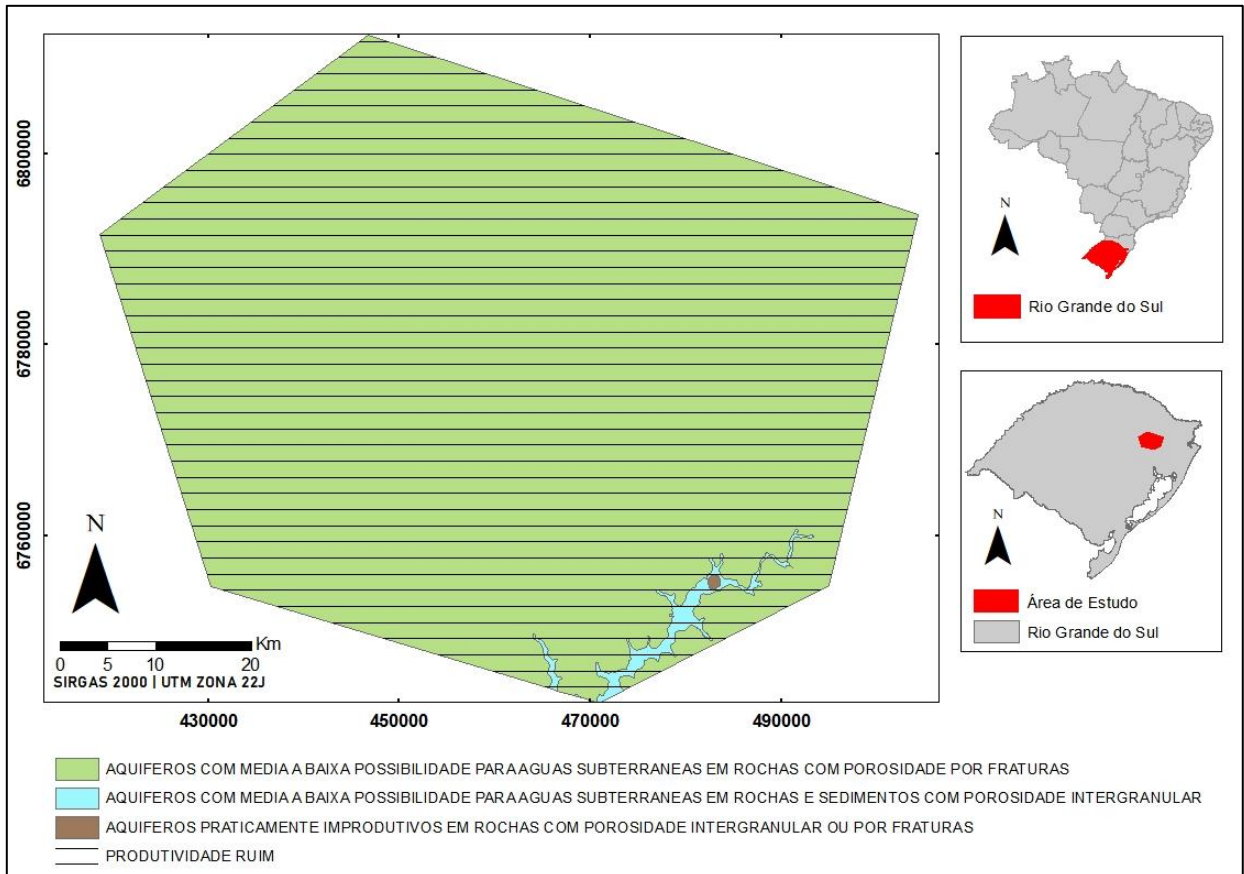
Já para o estado de Santa Catarina, em estudo com 2729 poços, foi observado um predomínio em perfurações de 100 à 150m de profundidade e entradas de águas localizadas entre 20 e 100m. O aquífero no estado diferencia-se por apresentar vazões inferiores, com 30% das ocorrências abaixo de $1\text{ m}^3/\text{h}$ e 20% entre 1 e $5\text{m}^3/\text{h}$ (Freitas et. al., 2002).

O Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul (Machado e Freitas, 2005) identifica a ocorrência de dois tipos básicos de aquíferos no estado: poroso intergranular e poroso por fraturamento, compostos por sistemas aquíferos diferenciados por suas semelhanças litoestratigráficas e hidrodinâmicas.

O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) é constituído por aquíferos fraturados associados a estruturas presentes em rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral, que proporcionam naturalmente um ambiente heterogêneo e anisotrópico para a circulação de água.

Machado e Freitas (2005) ainda dividem o SASG em 3 zonas principais de acordo com sua possibilidade de água: o SASG I, II e III. A região de estudo aqui explorada é ocupada pelo SASG II, referente a “aquíferos com média a baixa possibilidade para águas subterrâneas em rochas com porosidade por fraturas” (Figura 11). Apresenta capacidade específica comumente inferior a 0,5 m³/h/m e salinidade inferior a 250 mg/l, valores que se alteram quando associados a áreas mais fraturadas ou com arenitos na base do sistema, influenciados pelas descargas ascendentes do Sistema Aquífero Guarani.

Figura 11 – Detalhe da região de estudo no Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul, com descrição da possibilidade e produtividade do aquífero.



Fonte: Elaborado pela autora a partir de Machado e Freitas, 2005.

Segundo Reginato (2003), nessa região, o Sistema Aquífero ocorre de duas formas distintas: o livre, localizado no manto de alteração formado sobre as rochas efusivas da Formação Serra Geral, e o fraturado, localizado nas rochas vulcânicas. Devido às suas características de armazenamento, o aquífero fraturado é heterogêneo e anisotrópico, condicionado principalmente por descontinuidades físicas da rocha, como fraturas, falhas e contatos interderrames e, em segundo plano, pela estruturação primária da rocha.

Em estudo realizado com 302 poços tubulares na região noroeste do estado do RS, Freitas et al. (2012) identificaram que as vazões dos poços instalados nesta região variam no intervalo de nulos até 78 m³/h, com uma média de 15,31 m³/h e mediana de 10,7 m³/h, sendo que as vazões mais comuns variam entre 5 e 10 m³/h. A capacidade específica média dos poços fica em 1,14 m³/h/m e a mediana 0,64 m³/h/m. A profundidade média dos poços é de 131 m, sendo os dados mais frequentes entre 100 e 150 m, e a profundidade máxima de 470 m. Os poços mais produtivos ficam em um intervalo de profundidade de 50 a 100 m, apresentando uma queda na produtividade conforme o aumento da profundidade, principalmente após os 150 m.

Esses dados corroboram o estudo de Reginato e Strieder (2004), em uma caracterização do SASG na mesma região, que indica que, dentre 283 poços analisados, 72,1% possuem vazões abaixo de 10 m³/h, com profundidade média dos poços de 110 m, havendo poços produtivos com profundidades acima de 150m.

Já Bortolin et al. (2014), realizaram uma caracterização hidrogeológica da região, que permitiu identificar que os poços tubulares possuem profundidades inferiores a 150 metros (76%), 1 a 3 entradas de água (80%) e que estão localizadas, na sua maioria no intervalo entre 1 e 100 metros de profundidade (84%).

Conforme Betiollo (2006), os dados de 166 poços apontam uma vazão específica média de 0,7212 m³/h/m, sendo máxima e a mínima igual à 10,2272 e 0,0015 m³/h/m, respectivamente. Além disso, o autor ressalta que o poço com maior vazão específica se situa próximo a um lineamento de médio porte NW, com cerca de 50km de extensão.

Em estudo na região nordeste da escarpa basáltica no Rio Grande do Sul, Silva (2009) trabalhou com 99 poços, onde sete apresentaram vazões superiores a 30 m³/h, sendo a maior vazão igual a 66 m³/h, no município de Morro Reuter. A capacidade específica varia de 0,1 a 1,0 m³/m/h, com valores superiores a 2 registrados em 14 poços. Frenzel e Reginato (2018), em estudo no município de Garibaldi, identificaram através de 162 poços, dados predominantes de nível estático menor que 10 metros, vazão entre 5 e 10 m³/h e entradas de água entre 25 e 50 metros.

Recentemente, Trevisan (2019) analisou dados de 51 poços tubulares localizados na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul e identificou uma vazão média de 28,23 m³/h para os poços associados à unidade Gramado e de 18,34 m³/h para poços associados à Palmas/Caxias, além de um NE mais raso na unidade ácida.

4.3 CONDICIONANTES DE AQUÍFEROS FRATURADOS

Os sistemas aquíferos são condicionados por uma série de fatores físicos, geológicos e estruturais que exercem controle sobre a ocorrência e circulação da água subterrânea. Em aquíferos fraturados, onde a litologia correspondente apresenta baixa porosidade e permeabilidade, a tectônica predomina como principal fator condicionante.

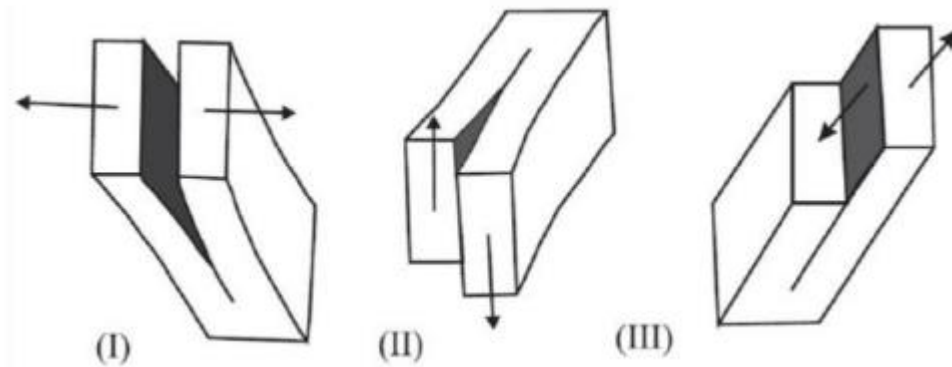
A tectônica age como condicionante principalmente por controlar a circulação da água, gerando caminhos de fluxo e controlando características geométricas das estruturas. A característica que exerce o maior controle sobre a condutividade hidráulica de fraturas, bem como a sua conectividade e a intersecção de lineamentos, é a abertura de falhas e fraturas (Fernandes & Rouleau, 2008).

Em aquíferos fraturados associados às rochas vulcânicas, o fluxo de água subterrânea irá ocorrer por meio da existência de fraturas, juntas, falhas, e em alguns casos específicos, de porções vesiculares do derrame e zonas de decomposição (Feitosa e Manoel Filho, 2000).

De acordo com Lastoria et al. (2006) as juntas associadas ao sistema de diaclasamento horizontal, juntas horizontais e o contato entre os derrames, são os principais condicionadores do fluxo e armazenamento das águas subterrâneas.

A abertura das fraturas se define como a distância entre as paredes da rocha ao longo do plano onde ocorreu a quebra, que pode ser condicionada de acordo com três modelos básicos de deslocamento da superfície de fissura: separação normal das paredes de fratura sob a ação das tensões de tração (I), deslizamento paralelo à superfície de fratura (II) e perpendicular à frente de propagação da ruptura (III) (Figura 12).

Figura 12 - Modelos básicos de propagação de fraturas.



Fonte: Lawn e Wilshaw, 1975.

As fraturas do tipo I propagam-se perpendicularmente ao esforço, e podem ser de extensão, limitadas a profundidades rasas, e hidrofraturas, que se formam em qualquer profundidade por pressão de fluidos. As fraturas extensionais são as que possuem maior abertura hidráulica, e fraturas abertas são as mais transmissivas. Essas propriedades condicionam o contexto hidrogeológico, pois influenciam favoravelmente para a criação de caminhos preferenciais de percolação de fluidos (Fernandes 2008).

Fernandes (2008) destaca, além da tectônica, outros 5 elementos condicionantes: lineamentos, manto inconsolidado, compartimento topográfico, litologia e profundidade do aquífero.

Os lineamentos atuam regendo a conectividade das fraturas, variando conforme sua proximidade, direção, densidade e intersecção. Apesar de sua análise ser uma forma direta de avaliar a influência de fraturas, sua densidade não é necessariamente correlacionável à densidade dessas, pois sofre influência de outros fatores, como a morfologia do terreno e a presença de coberturas (Fernandes, 2008).

O manto inconsolidado exerce uma importante função na recarga do aquífero de rocha fraturada, e quanto maior for sua permeabilidade (menos argiloso for o solo), maior será sua capacidade de armazenamento e circulação de água. Porém, esse fator não é identificado como uma forte influência sobre a variação da produção de poços, estando mais vinculada a lineamentos, mesmo quando o aquífero explorado é o manto inconsolidado saturado (Fernandes, 1997).

O compartimento topográfico atua de forma relevante, pois as áreas mais dissecadas do relevo oferecem uma maior descarga e menor potencial de

armazenamento, controlados pelas quebras do terreno. Em regiões de vale e terreno suavizado, o nível da água está mais próximo da superfície e apresenta melhores condições de armazenamento de água (Reginato e Strieder, 2006).

Quanto a profundidade do aquífero, as fraturas horizontais em altas profundidades (geralmente superiores a 300m) sofrem com o aumento da pressão litostática, fazendo com que as fraturas horizontais tendam a diminuir ou fechar suas aberturas, o que torna praticamente nula a circulação de água (Hausman, 1995).

Por último, a litologia possui influência mais discreta quando relacionada a sua classificação, e mais forte quando relacionada a gênese ou estrutura. A presença de descontinuidades, contatos, estruturas de resfriamento e estruturas primárias, quando conectadas à rede de fraturas, podem influenciar na circulação da água. Nos basaltos, as feições de resfriamento sub-horizontais abundantes e permeáveis podem corresponder como melhores feições de permeabilidade do que sua estrutura tectônica (Fernandes e Rouleau, 2008).

Quanto às estruturas que condicionam o SASG, Reginato et al. (2007) identificaram o padrão estrutural como principal fator. Além disso, observaram que estruturas primárias de resfriamento de rochas vulcânicas estão relacionadas com as zonas mais produtivas. Dessa forma, a circulação de água é controlada principalmente por disjunções horizontais associadas a riodacitos, zonas de disjunção horizontal cortadas por fraturas verticais, zonas vesiculares, amigdaloides e zonas de brechas associadas a contato entre derrames (Reginato et al., 2015).

Reginato et al. (2010) em estudo realizado na região nordeste do estado, identificaram que há ocorrências de poços tubulares que captam água de aquíferos fraturados associados a estruturas tectônicas, bem como de aquíferos fraturados associados a estruturas de resfriamento das rochas vulcânicas.

A mesma observação é feita por Freitas et al. (2016) e Bongioiolo et al. (2014), onde sugerem que a circulação de água tende a se ampliar pela presença de disjunções horizontais e de zonas vesiculares e amigdaloides, além de intertraps.

Bortolin et al. (2014), indicaram que a circulação de água do SASG no município de Carlos Barbosa é condicionada por fraturas e estruturas de resfriamento dos derrames de rochas vulcânicas, de modo que a circulação ocorre em diferentes profundidades, o que pode influenciar também nas características hidroquímicas das águas. Nanni (2008), observa que o fluxo de água também ocorre por meio das descontinuidades que existem no contato entre os derrames.

Em estudo no SASG, Elsenbruch (2017) cita as fraturas tectônicas como essenciais na permeabilidade do aquífero, pois permitem circulação de água vertical através das mesmas. Além disso, observa que os poços mais produtivos são aqueles que ultrapassam as descontinuidades horizontais, identificados por ela como juntas e contatos de derrames, que seriam ótimas estruturas armazenadoras de água.

Os sistemas de descontinuidades - tanto em estruturas tectônicas quanto em interfaces de derrames e em estruturas internas - têm relação direta com a dinâmica de circulação de água nos basaltos (Lastoria, 2002). Nesse sentido, Hausmann (1974) afirma que o fluxo das águas em rochas fraturadas é orientado pelo padrão de disjunção do basalto e, em geral, são as juntas verticais que permitem uma circulação mais franca pela ação da gravidade.

Rebouças e Fraga (1988) individualizam a região do topo dos derrames como zona preferencial para a circulação de águas, caracterizada pela ocorrência de estruturas vesicular e fraturamento horizontal. Assim como Lastoria (2002), que propõe um modelo hidrogeológico conceitual para o SASG no Estado de Mato Grosso do Sul, indicando a predominância de fluxo nas superfícies de contato entre os derrames, onde ocorrem níveis vesículo-amigdaloidais e zonas de descontinuidades horizontais de grande extensão.

4.4 PRODUTIVIDADE DE SISTEMAS AQUÍFEROS

O primeiro mapa hidrogeológico do país foi elaborado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (1983), e para classificação dos aquíferos foi adotada a importância hidrogeológica, dividida entre as classes relativa grande, relativa média e relativa pequena. Posteriormente, no ano de 2005, o Sistema Geológico Brasileiro juntamente com o Governo do Estado do Rio Grande do Sul, publicaram o Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul, o primeiro mapa moderno, com a presença da classificação das produtividades aquíferas.

De acordo com Struckmeier & Margat (1995) várias maneiras podem ser utilizadas para avaliar a produtividade de um aquífero: (1) a permeabilidade de corpos rochosos que pode ser estimada entre a litologia e a hidrogeologia; (2) a capacidade ou vazão específica, que é a vazão dividida pelo rebaixamento do nível da água; (3) os valores da recarga, que podem ser utilizados para estimar a produtividade aquífera, representando uma aproximação do limite máximo desta produtividade; e (4) valores

da vazão, que podem ser utilizados na ausência de valores das propriedades hidráulicas dos aquíferos.

Baseado nessas considerações, Diniz (2012) propõe que a avaliação da produtividade hidrogeológica de uma região seja realizada através do cruzamento de informações hidrodinâmicas do aquífero. Para isso, utiliza os dados de capacidade específica, transmissividade, condutividade hidráulica e vazão para classificar o aquífero em seis classes, dependendo dos intervalos de valores dos parâmetros analisados.

A capacidade específica pode ser considerada como o parâmetro que melhor representa a produtividade de poços tubulares (Celligoi, 1993). O Departamento de Águas e Energia Elétrica sugere que para a análise ser mais adequada, deve ser preterido dados de capacidade específica aos de vazão do poço, pois apresenta melhor correlação com a transmissividade do aquífero (DAEE, 1982).

Para Kassune et al., (2018), a diferença na intensidade de intemperismo, grau de fraturamento e interconectividade das fraturas nos derrames de rocha vulcânica resulta na variação da condutividade hidráulica e da transmissividade. A presença de fraturas verticais e horizontais aumenta significativamente a circulação de água e a capacidade de armazenamento no basalto afanítico e porfirítico. No entanto, as mesmas rochas mostram diferença na propriedade hidráulica dependendo do espaçamento da fratura, extensão, aberturas e interconectividade. Assim, a permeabilidade torna-se alta em áreas onde os basaltos são intensamente afetados por intemperismo e intersecção por fraturas em rede.

Para aquíferos fraturados, Holland e Witthüser (2011) apontam que estes apresentam diferenças importantes de outros tipos de aquíferos, estabelecendo que se tenham conhecimentos e técnicas específicas para um gerenciamento eficiente deste recurso hídrico, destacando ainda que um dos maiores desafios da hidrogeologia de meios fraturados é a compreensão e conhecimento dos fatores que controlam a ocorrência e a produtividade hídrica.

Quanto ao SASG, seus diferentes condicionantes ocasionam um comportamento hidráulico de difícil previsão e uma grande variação da potencialidade. Conforme Reginato e Strieder (2004), as características hidrodinâmicas do SASG evidenciam um comportamento fortemente anisotrópico, em função disso, a potencialidade do aquífero é intensamente variada.

As áreas mais produtivas do sistema Serra Geral estão condicionadas a fraturamentos e zonas vesiculares resultantes do resfriamento dos derrames basálticos. A deformação dútil afetou posteriormente essas estruturas primárias, gerando fraturas que ampliaram as possibilidades de armazenamento e circulação de água (ANA, 2005).

Para ocorrências do SASG no estado do Paraná, observou-se que poços tubulares perfurados em regiões com fraturamento regional nas direções norte-sul e leste – oeste, tendem a ser mais produtivos, sendo que tais direções são associadas a eventos tectônicos recentes que atuaram e atuam na placa sul-americana, próximo ao estado do Paraná (Athayde e Athayde, 2016).

Segundo Reginato e Strieder (2005), a potencialidade do sistema aquífero fraturado está relacionada com o comportamento hidrogeológico e hidrodinâmico, e irá alterar conforme os fatores condicionantes variam em cada região.

Os mesmos autores classificam algumas cidades do estado em três classes de produtividade: alta, média e baixa; de acordo com o sistema estrutural, a litologia, o relevo e os solos (Tabela 2). Os maiores valores para os parâmetros transmissividade, capacidade específica e vazão são encontrados no município de Farroupilha que, por esses motivos, possui a maior potencialidade.

Tabela 2 - Classificação das regiões de acordo com a Potencialidade do SASG na região

POTENCIALIDADE	REGIÕES
Alta	Farroupilha, Flores da Cunha, Antônio Prado e Bento Gonçalves
Média	Caxias do Sul e São Marcos
Baixa	Cotiporã, Monte Belo do Sul, Nova Pádua, Nova Roma do Sul e Veranópolis

Fonte: Reginato e Strieder (2005)

Fernandes (2006) correlacionou lineamentos com capacidade específica na região de São Paulo e encontrou dados mais produtivos para estruturas de orientação N10W-N5E.

Para o estado do Rio Grande do Sul, Reginato & Strieder (2006) observaram estruturas principais de orientação NE e NW, estando os poços mais produtivos

(>20m³h) relacionados a lineamentos noroeste. Para uma área mais detalhada no município de Garibaldi, Frenzel (2017) identificou que os lineamentos associados a poços de melhor produção situam-se nos intervalos de orientação N60-90E e N60-90W, seguidos dos intervalos N30-60W e N30-60E.

De acordo com Betiollo (2006), a potencialidade aquífera na região nordeste do RS não apresenta relação direta com a densidade de lineamentos ou com os blocos tectono-estruturais da área, porém apresenta uma conexão com os lineamentos de médio porte a NE e especialmente a NW.

Em estudo no SASG, Elsenbruch (2017) cita as fraturas tectônicas como essenciais na permeabilidade do aquífero, pois permitem circulação de água vertical através das mesmas. Além disso, observa que os poços mais produtivos são aqueles que ultrapassam as descontinuidades horizontais, identificados por ela como juntas e contatos de derrames, que seriam ótimas estruturas armazenadoras de água.

A produtividade também está relacionada com a profundidade do poço e das entradas de água. Hausman (1995) considera que, em profundidades superiores a 140 metros, ocorre uma diminuição da circulação de água em função da pressão do maciço. No entanto, observa-se na região, a existência de poços produtivos com profundidades acima de 150 metros e, em alguns casos, acima de 200 metros (Reginato e Strieder, 2006; Bortolin, 2014).

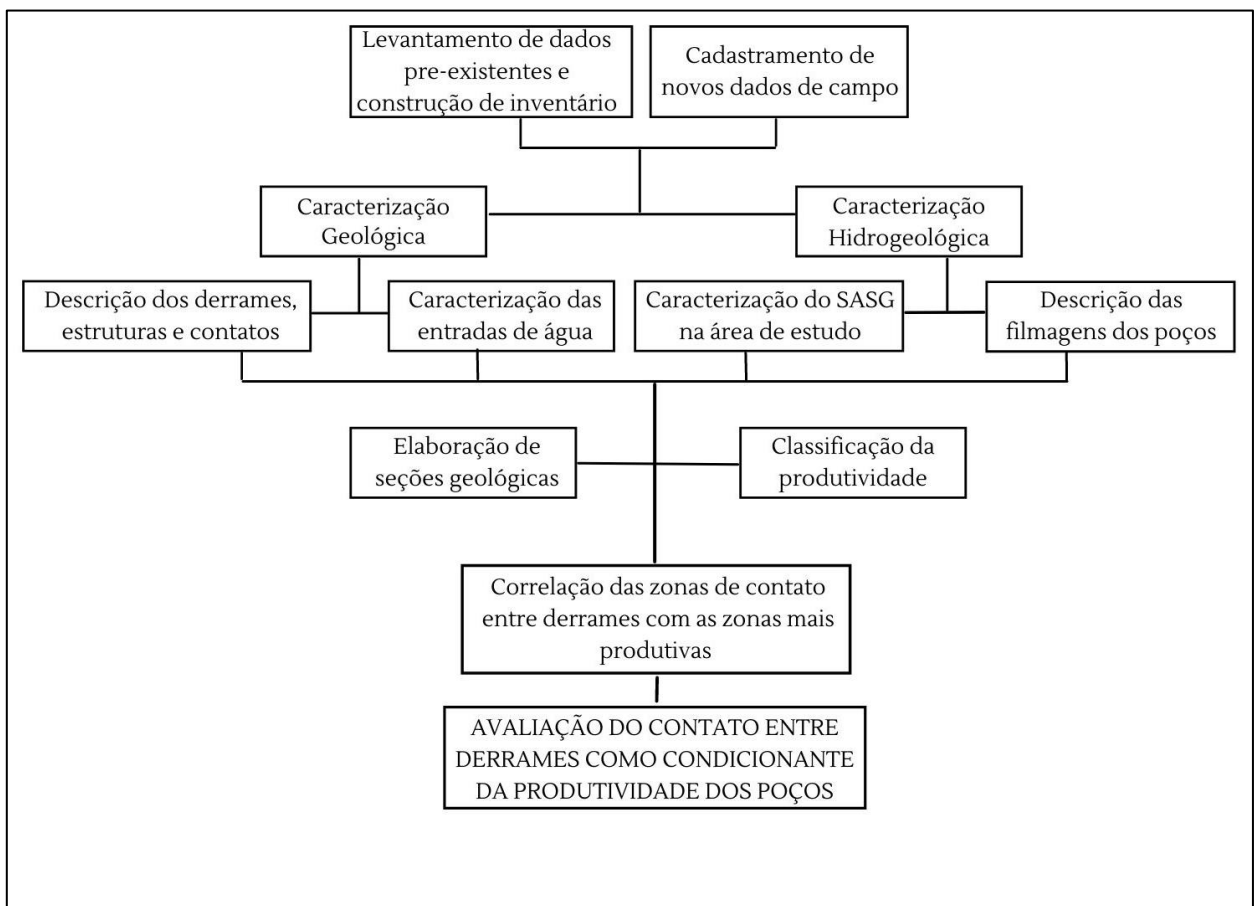
Segundo Rebouças e Fraga (1988) a potencialidade não é um valor fixo, podendo variar com: desenvolvimento dos meios técnicos e financeiros da exploração, mudanças no balanço hídrico e das condições econômicas do projeto.

No Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul, Freitas e Machado (2005), agrupam os sistemas aquíferos em 6 blocos conforme a possibilidade de água e a similaridade geológica. O SASG divide-se em SASG I, alta a média possibilidade de água, SASG II, média a baixa possibilidade e SASG III, improdutivo. Os autores também destacam que as capacidades específicas do SASG são muito variáveis, existindo poços não produtivos próximos de outros com excelentes vazões.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma apresentado na Figura 13 sistematiza os passos da construção desse estudo. A pesquisa inicia por uma etapa de cadastramento de dados secundários que é complementada com uma coleta de novos dados de campo. Esses dados são processados a fim de caracterizar as estruturas geológicas e hidrogeológicas da área de estudo. A partir dos dados interpretados, é analisada a relação dos contatos presentes nos derrames com as zonas mais produtivas do aquífero. A descrição de cada etapa é melhor apresentada nos tópicos abaixo.

Figura 13 - Fluxograma da metodologia aplicada



Fonte: Elaborado pela autora.

5.1 LEVANTAMENTO DE DADOS EXISTENTES E INVENTÁRIO DE POÇOS TUBULARES

A primeira etapa consiste em um levantamento de dados pré-existentes na bibliografia, enfocando os temas de geologia e hidrogeologia da região estudada, a ocorrência de aquíferos fraturados, seus condicionantes e sua relação com a produtividade, além da ocorrência e estruturação dos derrames vulcânicos.

Essas informações coletadas permitiram a produção de um inventário de poços tubulares, o qual contém informações cedidas pela CORSAN (198 poços) e pelo SIAGAS (1181 poços). Os poços que se apresentavam repetidos foram unificados, e quando possuíam dados divergentes, foi dada preferência para as informações da CORSAN. Da mesma forma, foram descartados poços que alcançavam as camadas areníticas do Sistema Aquífero Guarani e valores extremos considerados incorretos.

Quanto aos parâmetros extraídos do SIAGAS, foram utilizadas as informações dadas por “Vazão Após estabilização (m^3/h)”, “Transmissividade (m^2/h)” e “Vazão específica ($m^3/h/m$)”, chamada nesse trabalho de Capacidade Específica.

Após organização e seleção dos dados, foi construído um inventário de poços em planilha Excel, contendo informações construtivas, geográficas (coordenadas e altitude), e de parâmetros hidrodinâmicos (capacidade específica, vazão e transmissividade) (Figura 14).

Figura 14 - Visão geral do banco de dados de poços elaborado no Microsoft Excel com as informações coletadas na etapa de levantamento de dados existentes.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	MUNICIPIO	PONTO	LOCALIDADE	COTA	UTM E	UTM N	PROF.	NE	q	Q	T
2	Antonio Prado	4300001366	PROXIMO PREFEITU	640	472430	6807850	79	7,9		0,3	
3	Antonio Prado	4300001368	ANTONIO PRADO, R	625	472525	6807825	59,7	0,32		0,5	
4	Antonio Prado	4300001369	AVENIDA DOS IMIGI	653	472638	6807799	122	26,76	0,848	1,067	
5	Antonio Prado	4300001370	ANTONIO PRADO	620	472670	6807685	112	42		2	
6	Antonio Prado	4300001371	AVENIDA DOS IMIGI	632	472764	6807735	75	16,59	0,279	2,061	
7	Antonio Prado	4300001372	AVENIDA DOS IMIGI	616	473029	6807762	75	8,1	0,7	2,834	
8	Antonio Prado	4300001373	RUA VITORINO MOI	710	471843	6808680	90	0,33	2,995	3	
9	Antonio Prado	4300001374	RUA VITORINO MOI	705	471713	6808851	45,5	8,77	0,728	3,14	
10	Antonio Prado	4300001375	RUA RAMIRO BARC	662	472219	6808425	102,5			3,49	
11	Antonio Prado	4300001376	ESTRADA JULIO DE	716	470947	6807985	104	0,23	0,53	3,5	
12	Antonio Prado	4300001377	SAIDA PARA NOVA F	646	470020	6807629	194	6,58	0,038	3,69	
13	Antonio Prado	4300001378	SAIDA PARA NOVA F	720	471325	6807900	116	13,87		3,8	
14	Antonio Prado	4300001379	ANTONIO PRADO	640	473200	6808000	129			4	
15	Antonio Prado	4300001380	PROX PONTE DO AF	640	473200	6808325	278			4,5	
16	Antonio Prado	4300001381	SAIDA PARA VILA IP	620	473275	6808200	180			4,865	
17	Antonio Prado	4300001382	LINHA CAMARGO	680	473937	6810337	264	1,56	1,429	5	
18	Antonio Prado	R APR 17 (4300001	ESTRADA VELHA	705	472810	6809585	174	1,75	0,192046	9,3	0,82
19	Antonio Prado	4300001384	RUA 15 DE OUTUBR	720	471591	6808565	90	14,48	0,192	5,8	
20	Antonio Prado	4300001385	ANTONIO PRADO	698	472021	6808725	143	4,05	0,16	5,857	

Fonte: elaborado pela autora

Na mesma planilha foram registradas a profundidade, quantidade e litologia referente às entradas de água. As ocorrências que se apresentavam em possíveis estruturas de contato, como amígdalas, vesículas e brechas, foram individualizadas afim de identificar possíveis zonas de contato (Figura 15).

Figura 15 - Visão geral do banco de dados de poços elaborado no Microsoft Excel com as informações de entradas de água coletadas na etapa de levantamento de dados existentes.

	A	L	M	N	O	P
1	MUNICIPIO	E.A	E.A. Litologia	Qtidade EA	Amig/ves/brec	Altitude Entrada de
2	Antonio Prado	16m; 29m;	Basalto amigdaloide	2	2	624; 611;
3	Antonio Prado	2m; 7m	Basalto	2		623; 618;
4	Antonio Prado	15m, 50m	15m - Basalto albitizado, cinza claro, fr	2		638; 603;
5	Antonio Prado	42m; 130m;	Diabásio cinza	2		578; 490;
6	Antonio Prado	m; 29m; 30m; 32m; 4	Basalto amigdaloide	5	5	12; 603; 602; 600; 58
7	Antonio Prado	17m; 36m	17m - basalto fraturado; 36m- basalto	2	1	599; 580;
8	Antonio Prado	7m; 14m; 56m	7m - Basalto vítreo muito fraturado; 14	3		703; 696; 654;
9	Antonio Prado	13m; 39m;	13m - Basalto muito fraturado; 39m - a	2		692; 666;
10	Antonio Prado	6m	6m - regolito	1		656;
11	Antonio Prado	12m	Basalto amigdaloide com brecha	1	1	704
12	Antonio Prado	2m; 37m; 56m; 117m	2m - Regolito; 37m 56m 117m - Basalt	4	3	644; 609; 590; 529;
13	Antonio Prado	4m; 35m; 65m; 98m	35m 65m e 98m - Basalto amigdaloide	3	3	716; 685; 655; 622
14	Antonio Prado	4m	Solo argiloso	1		636;
15	Antonio Prado	12m; 30m	Basalto albitizado e amigdaloide, brech	2	2	628; 610;
16	Antonio Prado			0		
17	Antonio Prado	4m; 11m; 23m; 75m	11m - Regolito; 23m - Basalto albitizad	4	2	676; 669; 657; 605
18	Antonio Prado	9m; 11m; 70m;	9m e 11m - Basalto vesicular a amigda	3	3	696;694;635;
19	Antonio Prado	37m; 52m	37m - Riolito amigdaloide marrom ave	2	2	683; 668
20	Antonio Prado	36m; 70m	36m - BASALTO AMIGDALÓIDE, POUCA	2	2	
21	Antonio Prado	32m; 40m	32m - Basalto amigdaloide; 40m - Basa	2	1	

Fonte: elaborado pela autora

Um outro banco de dados foi organizado envolvendo informações apenas de campo. Foram utilizados dados anteriormente coletados, retirados de perfis construtivos de poços e contatos identificados em etapa de campo. Nesse, estão presentes a coordenada dos afloramentos e uma pequena descrição do contato com as informações que foram possíveis observar (altitude, estrutura e descrição geológica) (Figura 16).

Figura 16 - Banco de dados organizado no Microsoft Excel com informações dos contatos entre derrames

	A	B	C	D	
1	MUNICÍPIO	ALTITUDE	UTM E	UTM N	DESCRIÇÃO
3	Bento Gonçalves	166	444531	6786487	Rocha Vesicular a amigdalóide
4	Bento Gonçalves	212	443769	6786273	Brecha Vulcânica
5	Bento Gonçalves	245	443308	6786261	Brecha Vulcânica
6	Bento Gonçalves	262	442654	6786403	Rocha vesicular a amigdalóide
7	Bento Gonçalves	284	442101	6786411	Rocha vesicular a amigdalóide
8	Bento Gonçalves	435	443491	6784971	Brecha Vulcânica
9	Bento Gonçalves	462	443833	6784543	Brecha vulcânica
10	Bento Gonçalves	495	442839	6783384	Brecha Vulcânica e rocha vesicular a amigdalóide
11	Bento Gonçalves	502	442839	6783384	Vitrófiro Passagem Gramado -Palmas
12	Carlos Barbosa	445	455147	6757531	Rocha Vesicular a Amigdalóide
13	Carlos Barbosa	520	454435	6758423	Rocha Vesicular a Amigdalóide Passagem Gramado
14	Carlos Barbosa	649	451318	6757764	Rocha vesicular a amigdalóide
15	Carlos Barbosa	698	451516	6755708	Rocha Vesicular a Amigdalóide e Brecha vulcânica
16	Caxias do Su	617	490431	6785451	Brecha Vulcânica
17	Caxias do Sul	515	491213	6787943	Brecha Vulcânica Passagem Gramado - Palmas
18	Caxias do Sul	520	491246	6787093	Brecha Vulcânica
19	Caxias do Sul	551	490710	6786354	Brecha Vulcânica
20	Caxias do Sul	604	490614	6785578	Brecha Vulcânica
21	Caxias do Sul	680	490514	6784947	Vitrófiro

Fonte: elaborado pela autora

5.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

Utilizando como referência o mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul (Wildner, 2014) e os relatórios de perfuração dos poços da região, foram inicialmente identificadas e descritas as principais litologias e estruturas da área de estudo.

A descrição foi complementada com os levantamentos de campo obtidos em etapa realizada durante os dias 27 e 28 de novembro de 2021, em 14 municípios da região. Com objetivo de catalogar novos contatos, foram visitados 100 pontos de afloramentos, os quais foram brevemente descritos conforme sua petrografia, textura e morfologia, juntamente com localização. Quando visualizados contatos entre os derrames, esses foram registrados e descritos conforme altitude e gênese.

Os dados de campo organizados permitiram a caracterização das formações predominantes na área de estudo, diferenciando-as conforme sua litologia, morfologia dos derrames e estruturas dos contatos. Os contatos identificados em campo ainda foram organizados em um gráfico de distribuição conforme sua altitude, afim de demonstrar os intervalos principais de ocorrência.

Por fim, esse gráfico foi cruzado com as altitudes das entradas de água identificadas nos perfis construtivos de poços, a fim de que as sobreposições

indicassem possíveis estruturas em comum. Os gráficos foram gerados no Microsoft Excel e para melhor resolução, foram individualizados em intervalos de altitude de 50m.

5.3 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

A caracterização do SASG na região foi realizada através da integração dos dados hidrodinâmicos e hidrogeológicos organizados no banco de dados citado anteriormente, além do Mapa Hidrogeológico do RS (Machado e Freitas, 2005).

Através de análises estatísticas e gráficos gerados no Microsoft Excel, foram avaliadas as variações de profundidade, altitude, nível estático e o comportamento de alguns parâmetros como transmissividade, capacidade específica e vazão. A análise estatística foi feita de acordo com a altitude das entradas de água, individualizando poços que captam água antes e depois dos 550m, considerado o contato entre os derrames ácidos e básicos.

Inicialmente, as entradas de água foram caracterizadas individualmente, analisando sua altitude, profundidade e quantidade de ocorrência. Posteriormente, e em gráficos, foram analisadas conforme sua relação com a variação dos parâmetros.

Ainda para avaliar as entradas de água, foram utilizadas filmagens de poços visando a identificação das estruturas e também dos contatos entre os derrames. A etapa foi realizada através de 13 filmagens, cedidas pela CORSAN e realizadas em outros estudos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa. Os poços utilizados estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Informações dos poços com filmagens utilizados na caracterização hidrogeológica

Município	Poço	Prof. Poço	Prof. Filmagem	Data filmagem
Arvorezinha	ARV 11	151	120	Nov/2020
Carlos Barbosa	CBA 05	216	84	Fev/2019
Carlos Barbosa	CBA 20	120	110	

Carlos Barbosa	CBA 21	96	55	Set/2016
Carlos Barbosa	CBA 39	114	70	Set/2016
Caxias do Sul	Poço 4 – UCS	172	90	Ago/2021
Flores da Cunha	FLC 19	132	62	Fev/2020
Garibaldi	GAR 12	115	68	Abr/2019
Garibaldi	Garibaldi	216	23	
Nova Bassano	COR NBA 26	180	35	Julho/2014
Paraí	Paraí	214	214	Outubro/2021
São Jorge	São Jorge		50	
Vespasiano Correa	5498 FAB 05	142	88	Set/2019

Fonte: elaborado pela autora.

5.4 AVALIAÇÃO DO CONTATO ENTRE DERRAMES COMO CONDICIONANTE DA PRODUTIVIDADE DOS POÇOS

Nessa etapa, todos resultados previamente obtidos foram integrados a fim de avaliar a relação das estruturas de contato entre derrames com a produtividade dos poços.

A avaliação da produtividade foi realizada através dos resultados obtidos anteriormente, utilizando como base a metodologia proposta por Diniz (2012), que classifica a produtividade em seis classes, de acordo com os intervalos de valores de capacidade específica, transmissividade, condutividade hidráulica e vazão (Figura 17). Para o aquífero em questão, e a partir dos dados coletados para o estudo, foi escolhido utilizar os parâmetros de capacidade específica e vazão.

Figura 17 - Distribuição das classes de produtividade de aquíferos de acordo com vazão, transmissividade, capacidade específica e condutividade hidráulica.

Q/s ($m^3/h/m$) ⁺	T (m^2/s)	K (m/s)	Vazão (m^3/h)	Produtividade (**)	Classe
$\geq 4,0$	$\geq 10^{-02}$	$\geq 10^{-04}$	≥ 100	Muito Alta: Fornecimentos de água de importância regional (abastecimento de cidades e grandes irrigações). Aquíferos que se destaquem em âmbito nacional.	(1)
$2,0 \leq Q/s < 4,0$	$10^{-03} \leq T < 10^{-02}$	$10^{-05} \leq K < 10^{-04}$	$50 \leq Q < 100$	Alta: Características semelhantes à classe anterior, contudo situando-se dentro da média nacional de bons aquíferos.	(2)
$1,0 \leq Q/s < 2,0$	$10^{-04} \leq T < 10^{-03}$	$10^{-06} \leq K < 10^{-05}$	$25 \leq Q < 50$	Moderada: Fornecimento de água para abastecimentos locais em pequenas comunidades, irrigação em áreas restritas.	(3)
$0,4 \leq Q/s < 1,0$	$10^{-05} \leq T < 10^{-04}$	$10^{-07} \leq K < 10^{-06}$	$10 \leq Q < 25$	Geralmente baixa, porém localmente moderada: Fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado.	(4)
$0,04 \leq Q/s < 0,4$	$10^{-06} \leq T < 10^{-05}$	$10^{-08} \leq K < 10^{-07}$	$1 \leq Q < 10$	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa: Fornecimentos contínuos dificilmente são garantidos.	(5)
$< 0,04$	$< 10^{-06}$	$< 10^{-08}$	$< 1,0$	Pouco Produtiva ou Não Aquífera: Fornecimentos insignificantes de água. Abastecimentos restritos ao uso	(6)

Fonte: Removido de Diniz (2012)

Foram utilizados os parâmetros encontrados na caracterização hidrogeológica para classificar os poços dentro dos intervalos de produtividade. Também foi observado seu comportamento através de gráficos e análises estatísticas, conforme variação da altitude das entradas de água.

Com a organização e combinação desses dados em mapas cartográficos, gerados no software ArcMap, foram escolhidas áreas pontuais que indicavam uma concentração de poços produtivos. Com base nessas regiões, e utilizando o levantamento da altitude dos contatos e da altitude do terreno, foram geradas seções geológicas que possibilitaram analisar a influência das estruturas através de uma relação das entradas de água com contatos entre derrames. Além disso, foi possível correlacionar as unidades vulcânicas, observar suas variações de espessura e litologia, e a continuidade das estruturas. Para a elaboração dessas seções, foi utilizado o Google Earth e o software gráfico Corel Draw.

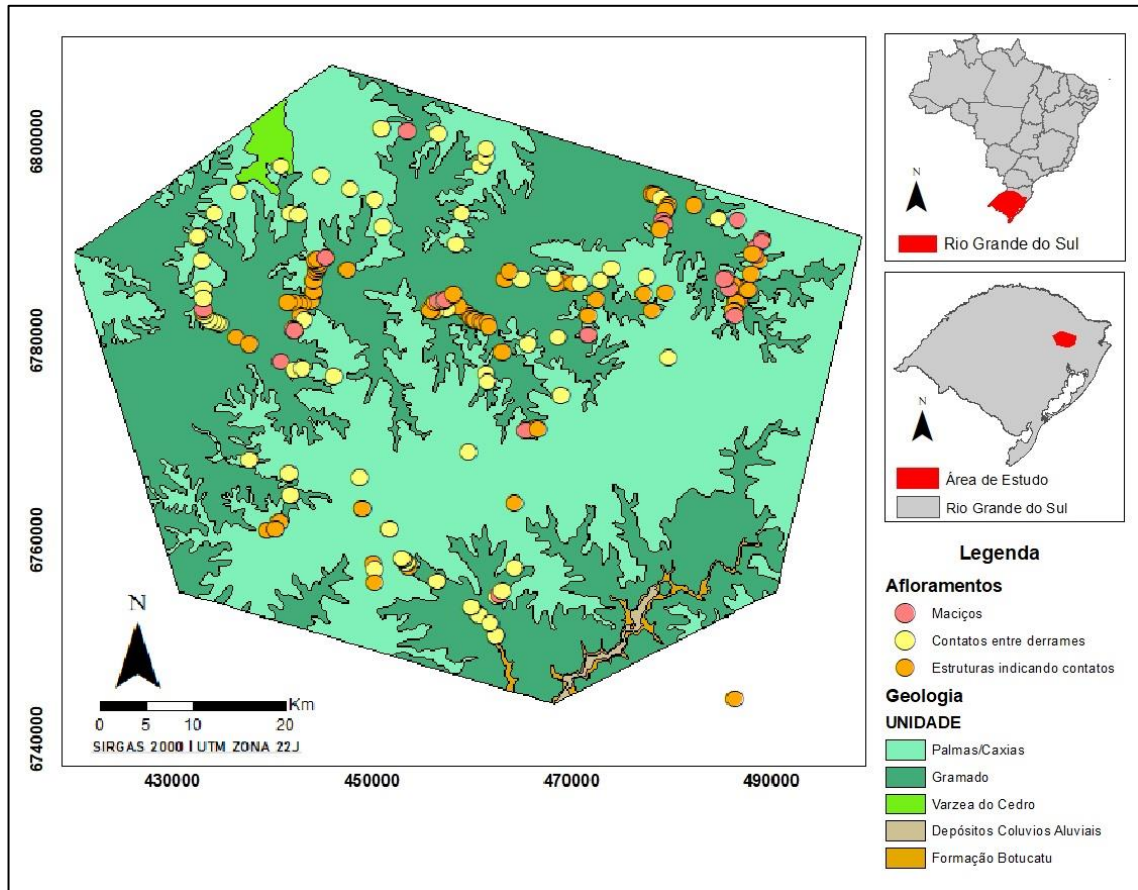
6. RESULTADOS

6.1 AVALIAÇÃO GEOLÓGICA E DOS CONTATOS ENTRE DERRAMES

A partir do levantamento de dados bibliográficos e posterior trabalho de campo, foi realizada a caracterização geológica das principais unidades identificadas na área de estudo: Formação Gramado e Formação Palmas/Caxias, representantes do registro magmático do Grupo Serra Geral. A Fm Gramado é predominante em termos de área de exposição, com 2220 km² aflorantes (55% do polígono), constituída essencialmente por basaltos, enquanto a Palmas/Caxias (43%), predomina nas áreas altas e é composta por riolitos e dacitos.

Os pontos de campo referem-se a 225 afloramentos localizados em 21 municípios (Figura 18), onde foram descritos pacotes de derrames, contatos, litologias, feições e estruturas de resfriamento.

Figura 18 - Mapa geológico da área de estudo com pontos de afloramentos observados em campo.



Fonte: Elaborado pela autora a partir de Wildner et al., 2008

Identificou-se o predomínio de rochas de composição ácida em afloramentos situados em altitudes maiores que 539m, enquanto afloramentos em altitudes menores que 502m apresentam rochas de composição basáltica. Na área de estudo, com observações feitas em campo, as zonas de contato entre as formações ácidas e básicas concentram-se em altitudes entre 500 e 600m.

6.1.1 Formação Gramado

A Formação Gramado, sotoposta pelas rochas da Formação Palmas/Caxias, apresenta composição basáltica, de coloração cinza escura quando são, modificando para marrom quando alterada. Os derrames possuem espessuras de dimensões variadas, sendo geralmente maiores que 5 metros.

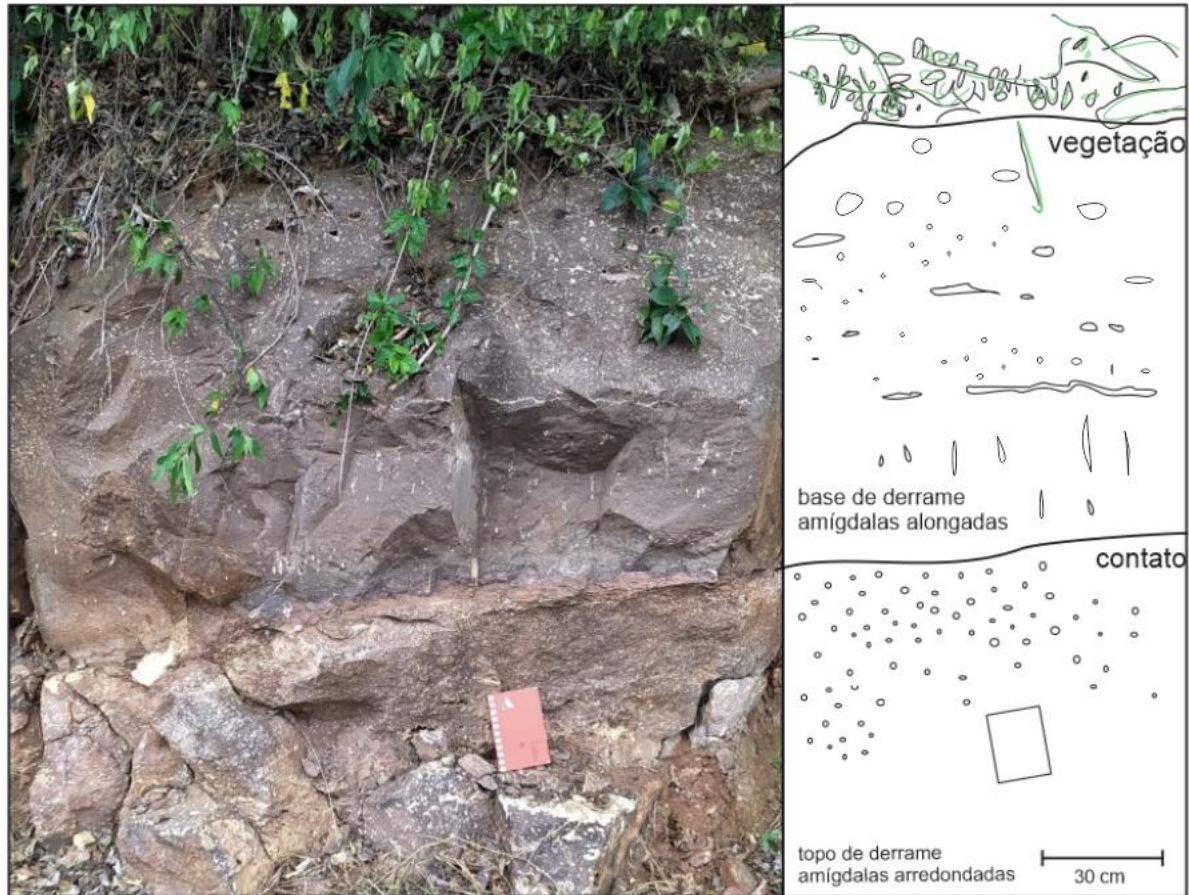
As porções de topo e base possuem textura afanítica, apresentando uma zonação caracterizada por um topo muito vesicular, estrutura interna maciça e porção basal ainda vesiculada, não tão intensa quanto o topo (Figura 19).

Figura 19 - Intercalação de zona maciça (centro de derrame) e zona vesicular (topo e base dos derrames) dos basaltos da Formação Gramado.



O topo do derrame é marcado pela presença de vesículas e/ou amígdalas milimétricas a centimétricas, com formas arredondadas, preenchidas por quartzo, calcedônia e zeolita. As mesmas feições quando encontradas em porções basais, encontram-se mais dispersas e em menor quantidade, podendo apresentar formas alongadas, que demonstram a estrutura dos fluxos (Figura 20).

Figura 20 - Afloramento e desenho esquemático do contato entre topo e base de derrame apresentando amígdalas alongadas e arredondadas.



Geralmente, os pacotes basálticos apresentam estruturas tectônicas (fraturas isoladas ou em zonas) que cortam as estruturas de resfriamento (disjunções verticais, zonas maciças e vesiculares). Com isso, mesmo a zona central maciça, frequentemente apresenta-se fraturada, podendo haver ocorrência de disjunção tabular (Figura 21).

Figura 21 - Pacote central de derrame: maciço e fraturado, com disjunções tabulares



6.1.2 Formação Palmas/Caxias

O pacote de rochas ácidas aflora em altitudes maiores, não sendo recoberto por nenhuma unidade vulcânica mais nova na região de estudo. São característicos de coloração cinza quando são e de tons avermelhados quando alterados. A alteração tende a aumentar próximo aos contatos.

Os derrames ocorrem com estruturação marcada por disjunções tabulares, sub-horizontais a verticais, maciços na porção central e basal, com dimensões variáveis (Figura 22). Onde há ocorrência de riodacitos, a parte central é marcada pelas disjunções horizontais. Ocasionalmente, formam expressivas dobras e domos produzidos pelo fluxo vulcânico (Figura 23).

Figura 22 - Pacote central dos derrames de rochas ácidas: maciço, extremamente fraturado e com disjunções.



Figura 23 - Base de derrame, vitrófiro maciço, dobras e domo gerados pela movimentação do fluxo.



Nas porções de topo, apresentam grande quantidade de vesículas e amígdalas centimétricas, além de geodos de, em média, 10 cm de diâmetro preenchidos por quartzo, zeolita e carbonatos (Figura 24). Na base, podem ocorrer porções maciças de vidro vulcânico (vitrófiros) e níveis de brechas peperíticas (Figura 25).

Figura 24 - Detalhe de afloramento: topo de derrame com vesículas e amígdalas centimétricas, além de geodos preenchidos por zeólita e quartzo.



Figura 25 - Base de derrame ácido, maciço e com ocorrência de vitrófiros.



6.1.3 Contato entre derrames

Os contatos entre derrames foram inferidos em perfis de poços tubulares e identificados durante a etapa de campo. Nos perfis de poços, foram individualizadas entradas de água em estruturas que pudessem identificar topo, núcleo e base de derrame. Sendo assim, porções maciças foram classificadas como núcleo, e as porções amigdaloides, vesiculares, brechas e vidros foram consideradas limitantes dos derrames.

Nas observações de campo, os contatos entre derrames básicos não exibem erosão acentuada, apesar de frequentemente apresentar aberturas de até 2 metros. O topo do derrame sotoposto é preservado, indicando um fluxo laminar na colocação destes (Figura 26 e Figura 27).

Figura 26 - Contato entre derrames básicos observados em cachoeira: topo de derrame sotoposto não apresenta erosão acentuada.

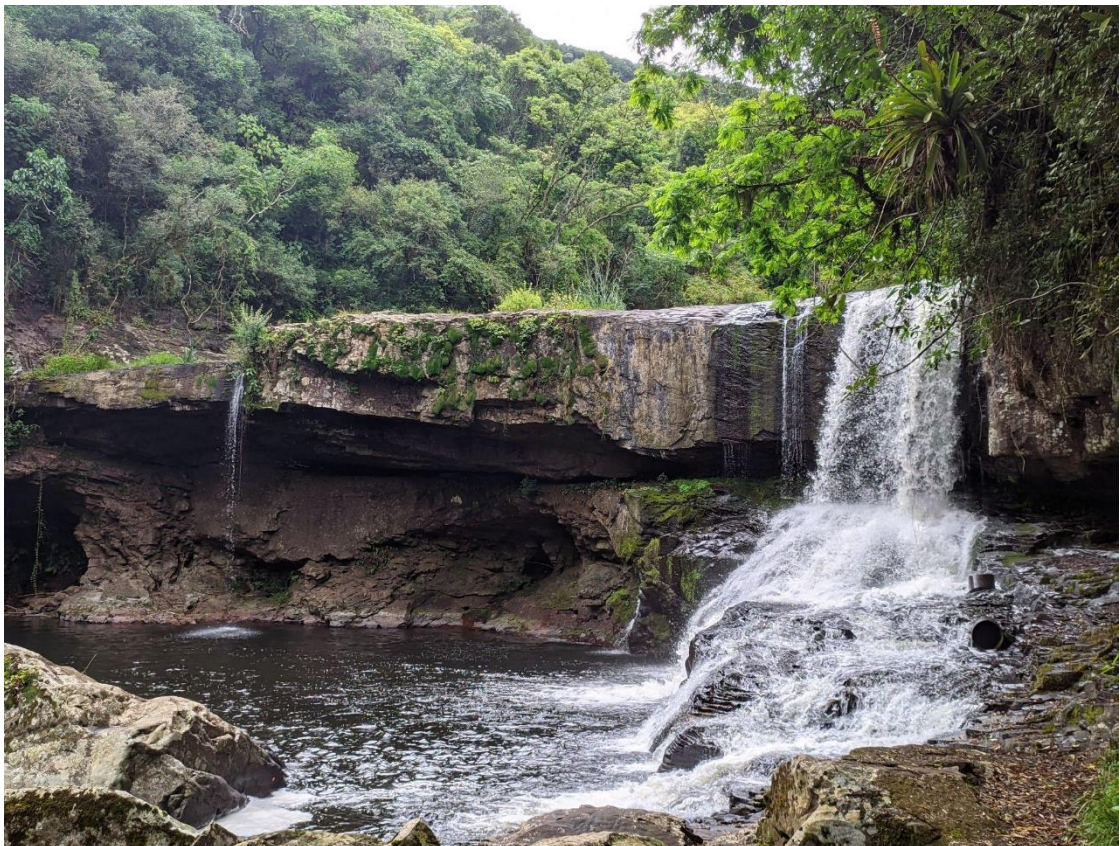


Figura 27 - Contato entre derrames vulcânicos em afloramento de corte de estrada, estrutura paralela à colocação dos pacotes.



Entre os derrames ácidos, foi observado uma superfície irregular causada por um contato erosivo. As camadas geralmente apresentam-se fraturadas, alteradas e de coloração avermelhada (Figura 28).

Figura 28 - Diferentes contatos observados entre rochas ácidas: contato erosivo com superfície irregular entre os derrames



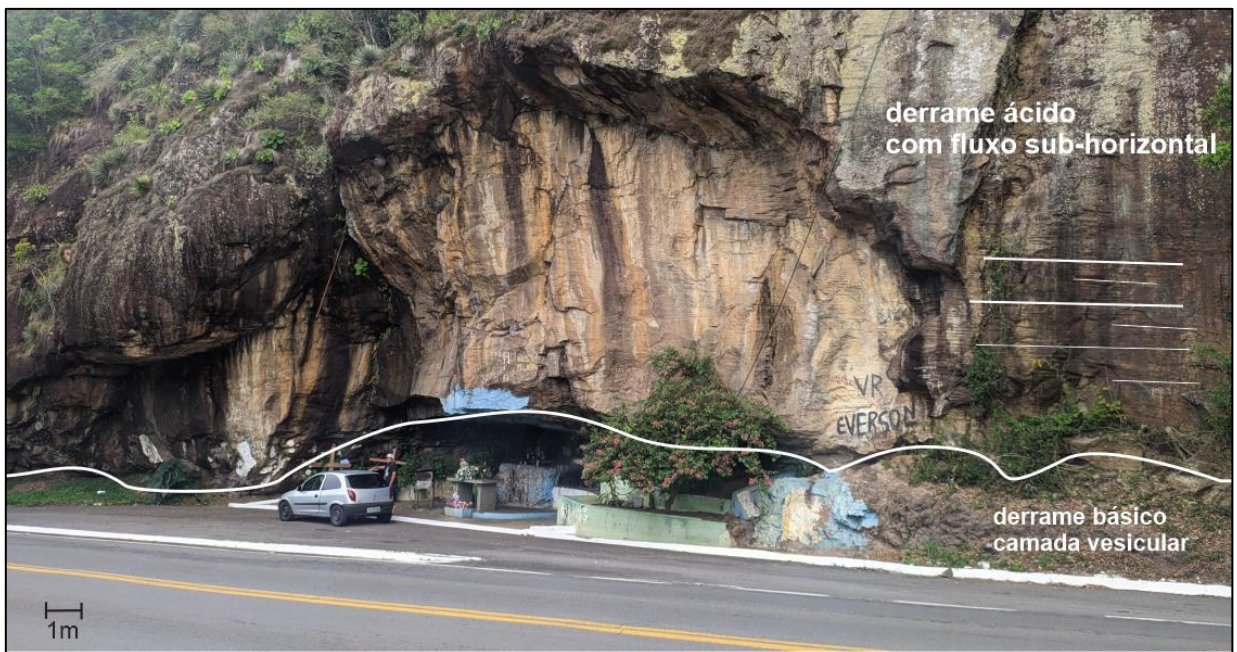
Ao longo da área estudada, as rochas ácidas Palmas/Caxias assentam-se diretamente sobre as rochas básicas tipo Gramado, sendo que o contato entre as unidades se dá por uma importante zona de erosão, nítida e bem destacada, variando entre 500 e 620m.

O pacote básico é marcado por um topo escoriáceo de uma lava a'a', coberto por uma lava ácida com estruturas horizontais e uma zona de contato com aproximadamente 2m de espessura. Esse contato é uma zona de atrito marcada por brechas formadas por fragmentos angulosos de basalto vesiculado (Figura 29 e Figura 30).

Figura 29 - Afloramento localizado em estrada no interior de São Marcos. Contato entre derrame básico de topo escoriáceo e derrame ácido de fluxo sub-horizontal

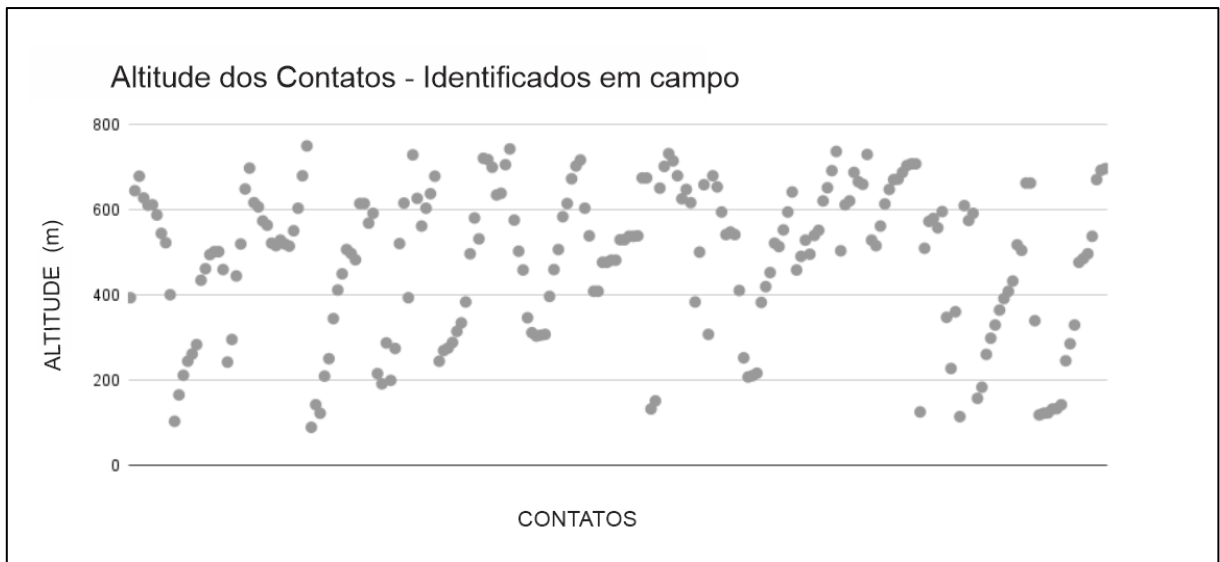


Figura 30 - Afloramento de corte de estrada localizado na BR116, em Caxias do Sul. Contato entre derrame básico vesicular (Gramado) e derrame ácido com fluxo sub-horizontal (Palmas/Caxias)



Os contatos identificados em campo foram organizados em um gráfico de distribuição conforme sua altitude e de forma aleatória para melhor visualização da dispersão. Observa-se a presença dessas estruturas entre 150 e 750m, com intervalo principal de ocorrência entre 500 e 650m (Gráfico 1).

Gráfico 1 - Distribuição dos contatos identificados em campo conforme sua altitude



Fonte: elaborado pela autora.

Nos perfis de poços, as ocorrências mais comuns de entradas de água são em camadas basálticas amigdalóides ou vesiculares. Ocorrem com menor frequência em camadas de rochas ácidas vesiculadas, em brechas vulcânicas e, ocasionalmente, em porções vitrófiras.

As entradas de água foram organizadas em gráficos conforme a variação de sua altitude e a partir da união de várias ocorrências em mesma faixa, foram interpretados como possíveis zonas de contatos de derrames. Essas zonas foram destacados em faixas vermelhas (Gráfico 2).

Gráfico 2 - Gráficos das altitudes de Entradas de Água presentes em camadas com estruturas de contato entre derrames.

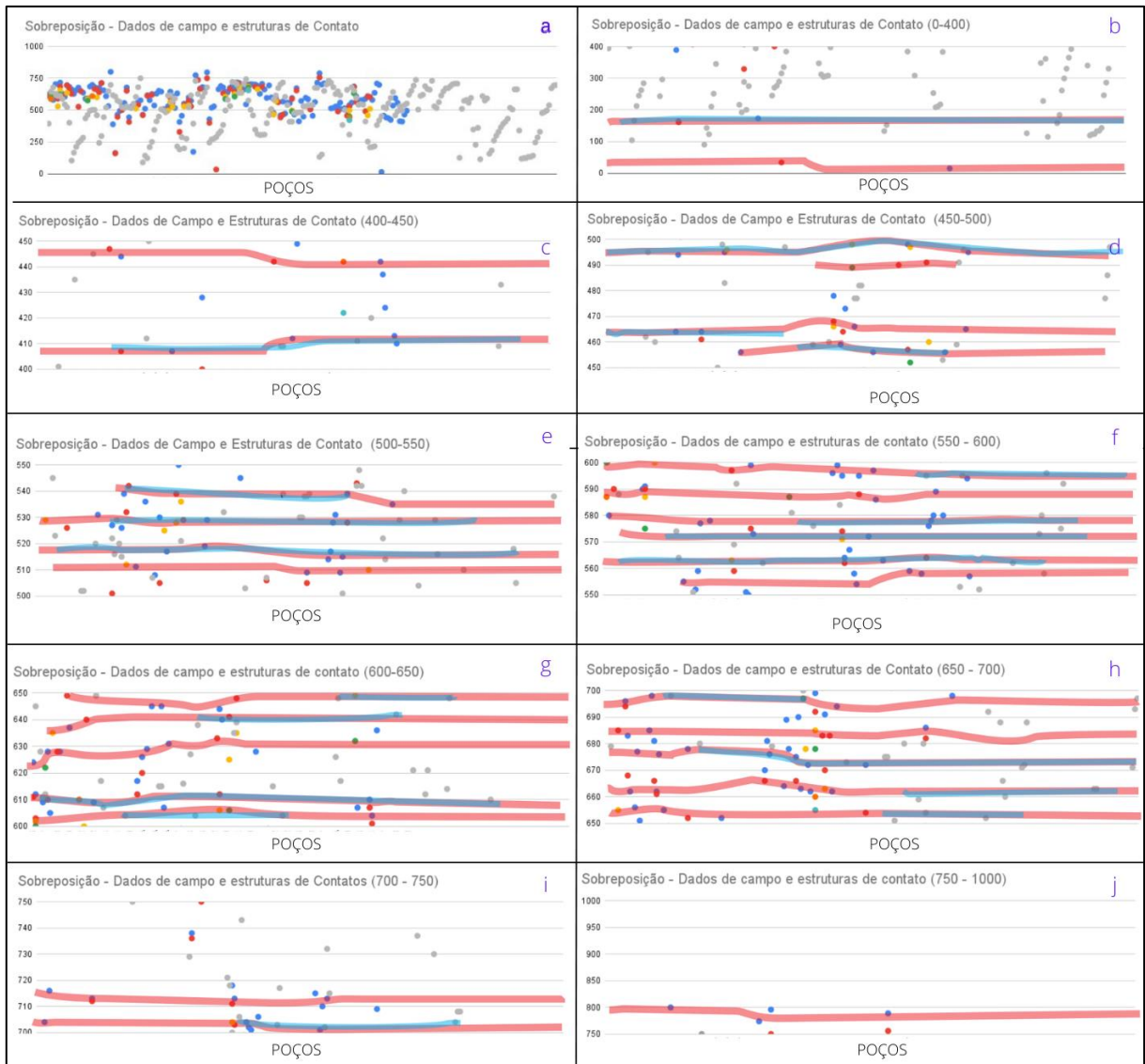


Fonte: elaborado pela autora.

No Gráfico 2a, observa-se a distribuição geral das entradas de água, presentes entre 25 e 800m, com o predomínio na faixa entre 500 e 700, demonstrado nos gráficos 2e-h. Já os contatos inferidos situam-se a partir de 190m (Gráfico 2b) com maior concentração entre 500 e 700 e última ocorrência em 800m (Gráfico 2j).

Os gráficos acima foram cruzados com as altitudes dos contatos visualizados em campo a fim de identificar estruturas em comum. Os pontos onde ocorreu a sobreposição dos dados foram destacados em faixas azuis (Gráfico 3).

Gráfico 3 - Gráficos de sobreposição entre as altitudes de Entradas de Água e contatos entre derrames identificados em campo.



Fonte: elaborado pela autora.

O Gráfico 3a, demonstra o predomínio de ocorrência entre 500 e 700m, assim como nas estruturas de contato. Observa-se também que os contatos identificados em campo foram observados em uma variação maior de altitude, já apresentando boa concentração antes dos 200m. Nessa faixa, para os poços da área de estudo, não é comum ocorrer entradas de água devido a localização dos poços em altitudes maiores, estando assim também as entradas em altitudes maiores. Por isso, estudos envolvendo regiões mais baixas e com uma maior quantidade de dados de poço seriam importantes para uma melhor avaliação dessa constatação.

Com a análise dos gráficos demonstrados acima, foram identificadas zonas de contato principais, classificadas em intervalos de altitude, onde esses apresentam maior concentração de estruturas. Essas zonas, a partir da sua altitude, foram interpretadas referindo-se a 2 contatos entre derrames da Fm Gramado, 1 da passagem Gramado para Palmas/Caxias, e mais 4 entre pacotes da Fm Palmas/Caxias (Tabela 4).

Tabela 4 - Faixas de altitudes de zonas de contato principais

Altitude (m)	Derrame
450 - 460	Básico 1
520 - 530	Básico 2
560 - 575	Possível passagem Básico/Ácido
600 - 610	Ácido 1
640 - 650	Ácido 2
680 - 690	Ácido 3
700 - 710	Ácido 4

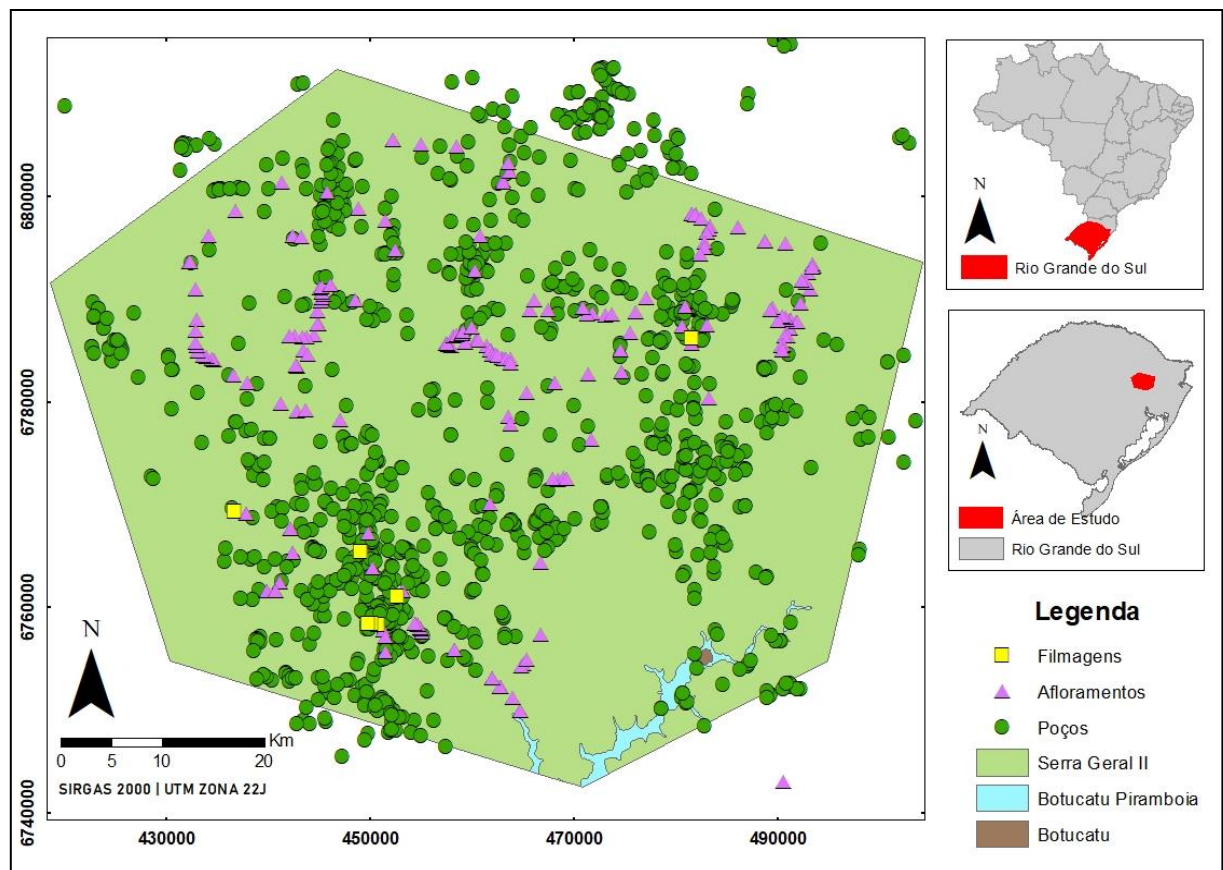
Fonte: elaborado pela autora.

6.2 AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

O Sistema Aquífero Serra Geral abrange quase totalmente a área de estudo, sendo que os aquíferos fraturados estão associados ao sistema de fraturas das rochas vulcânicas. Além desse, o Sistema Aquífero Guarani (unidades hidroestratigráficas Botucatu e Botucatu Pirambóia), está presente numa pequena porção ao sul da área de estudo, onde afloram arenitos finos a muito finos.

Para a avaliação hidrogeológica e a partir do levantamento de dados, foram analisados 1379 poços que exploram estritamente o SASG, além de 15 filmagens e 225 pontos de campo (Figura 31).

Figura 31– Mapa hidrogeológico da área de estudo com poços que exploram estritamente o SASG.



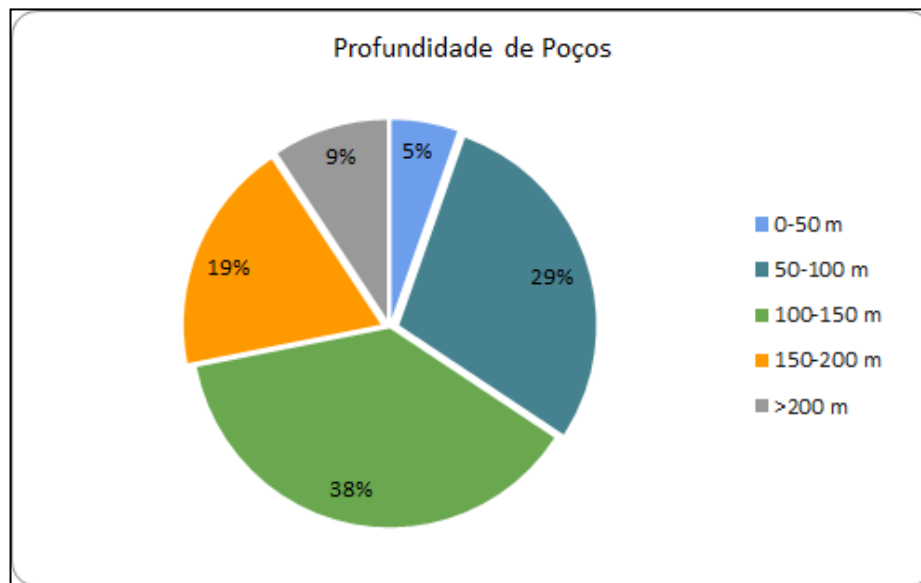
Fonte: Elaborado pela autora a partir de Machado e Freitas (2005)

A avaliação hidrogeológica foi realizada a partir da totalidade dos poços, sendo que desses, 1181 apresentavam dados de altitude, 1110 de nível estático, 1119 de vazão, 816 de capacidade específica e apenas 88 de transmissividade. Além disso,

668 possuíam dados de quantidade, profundidade e litologia das entradas de água, as quais foram utilizadas juntamente com as perfilagens óticas para caracterizar as estruturas.

A análise da profundidade dos poços identificou que 38% possuem entre 100 e 150m e 29% entre 50 e 100m, enquanto poços rasos, menores que 50m, indicam a menor ocorrência, com 5% (Gráfico 4).

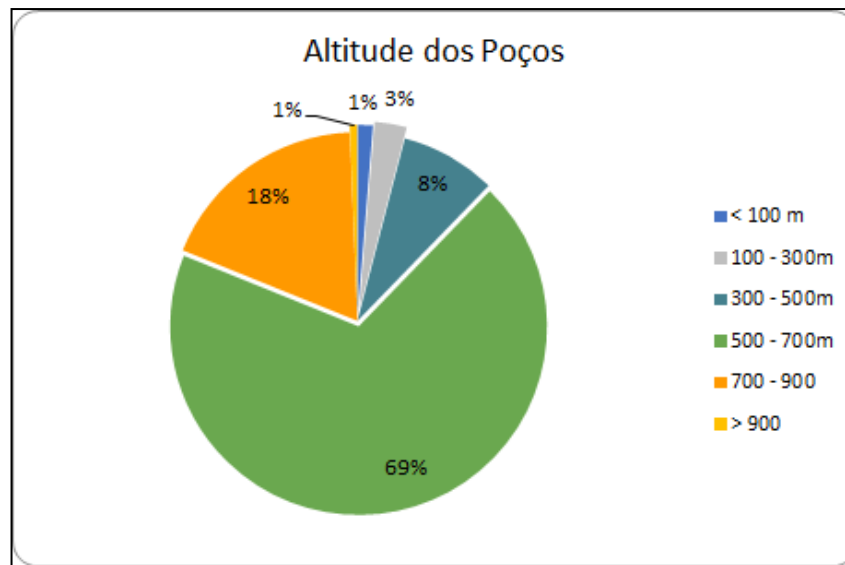
Gráfico 4 - Distribuição dos dados de profundidade dos poços



Fonte: Elaborado pela autora

Os poços estão, em sua maioria, distribuídos em altitudes entre 500 e 700m (69%), cota predominante na geomorfologia da região. A faixa entre 700 e 900m apresenta a segunda maior distribuição, e os extremos (menor que 100 e maior que 900m) representam apenas 1% cada (Gráfico 5).

Gráfico 5 - Distribuição dos dados de altitude dos poços



Fonte: Elaborado pela autora

O poço mais profundo que capta água estritamente do SASG possui 530m e está localizado a uma altitude de 653m. O poço mais raso bombeando possui 13m, e a profundidade média é de 127,9m. Quanto a faixa de altitude, os poços estão localizados entre 80 e 973m, tendo sua média igual a 606, a qual encontra-se dentro do intervalo predominante de ocorrência de 500-700m (Tabela 5).

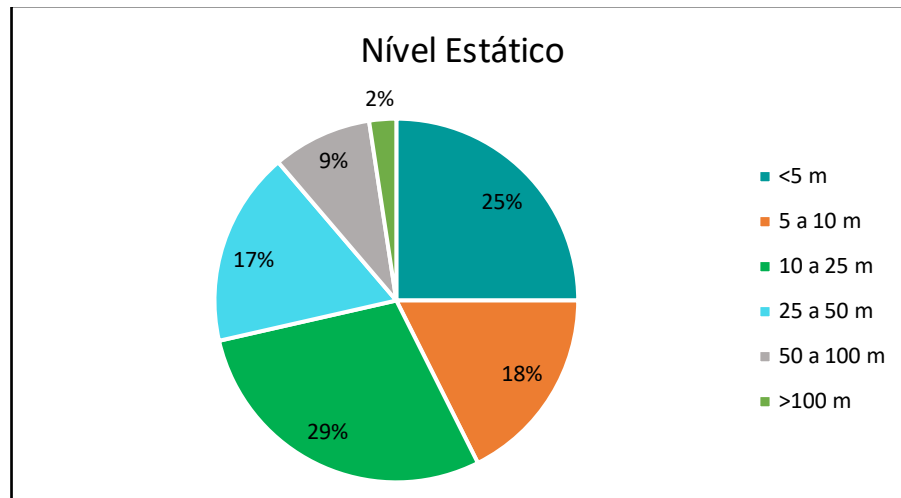
Tabela 5 - Análise estatística da profundidade dos poços encontrado na área de estudo

	Profundidade (m)	Altitude (m)
Mínima	13	80
Máximo	530	973
Média	127,98	607,39

Fonte: Elaborado pela autora

O nível estático (NE) está localizado, em 90% dos poços, antes dos 50m, sendo a maior distribuição entre 10 a 25 m (29%). Apresenta uma boa concentração também em níveis rasos, menores que 5m com 25% dos casos, e 18% entre 5 a 10m (Gráfico 6). O NE refletiu um comportamento esperado para aquíferos confinados, onde a pressão que a água sofre enquanto circula pelo sistema de fraturas, faz com que o nível se eleve a cima da profundidade das entradas de água identificadas.

Gráfico 6 - Distribuição da profundidade do NE dos poços



Fonte: Elaborado pela autora

A análise estatística do NE demonstra uma profundidade média geral de 22,37m, enquanto poços que captam água apenas das rochas ácidas apresentam uma profundidade maior, com média igual 28,6m. O nível médio mais raso, de 9,80m, encontra-se em poços que captam água em estruturas a cima dos 550m (Tabela 6).

Tabela 6 - Análise estatística da profundidade o NE dos poços

Nível Estático (m)	Altitude < 550m	Altitude > 550m	Geral
Mínimo	0,13	0,1	0,1
Máximo	283	125	283
Média	28,60	17,42	22,37
Mediana	17,04	9,84	12,405
Desvio Padrão	35,89	20,89	29,03
Dados	257	323	580

Fonte: Elaborado pela autora

Os gráficos citados acima demonstram que mesmo que os poços da região possuam profundidades variadas, o NE é raso e a água que se encontra sob pressão, tende a subir além da entrada da água após a perfuração. Dessa forma, há uma tendência em estruturas que captam água estarem localizadas entre 50 e 150m, mais favorável à fraturas abertas.

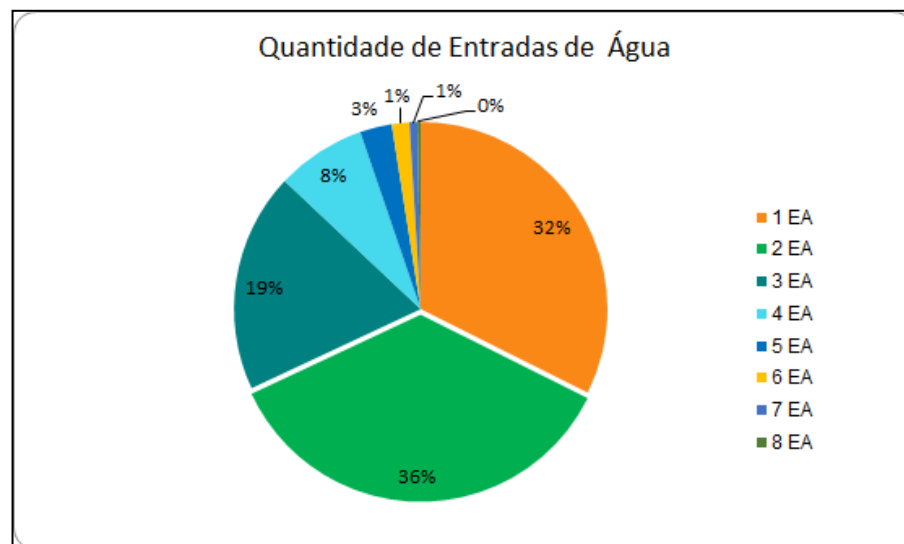
6.2.1 Entradas de Água

As entradas de água foram analisadas através de 668 poços que possuíam informações sobre quantidade, profundidade e litologia associada. Os perfis construtivos apontam que desses, 358 captam água em estruturas localizadas a cima dos 550m de altitude, consideradas pertencentes aos derrames da Formação Palmas/Caxias. Abaixo dessa altitude, e avaliadas como as rochas básicas da Formação Gramado, 310 poços possuem estruturas de entradas de água.

Quando descrita a litologia associada, as entradas encontradas em rochas básicas predominam em zonas fraturadas, alteradas e geralmente próxima a contatos (camada amigdalóide ou vesicular). Já em rochas ácidas, é comum em camadas de riolito amigdalóide, ou em porções de contato com o basalto.

A análise dos dados permitiu verificar que 87% dos poços possuem entre 1 e 3 entradas de água, identificando casos com até 8 e sendo 2 entradas a ocorrência mais comum (36%) (Gráfico 7).

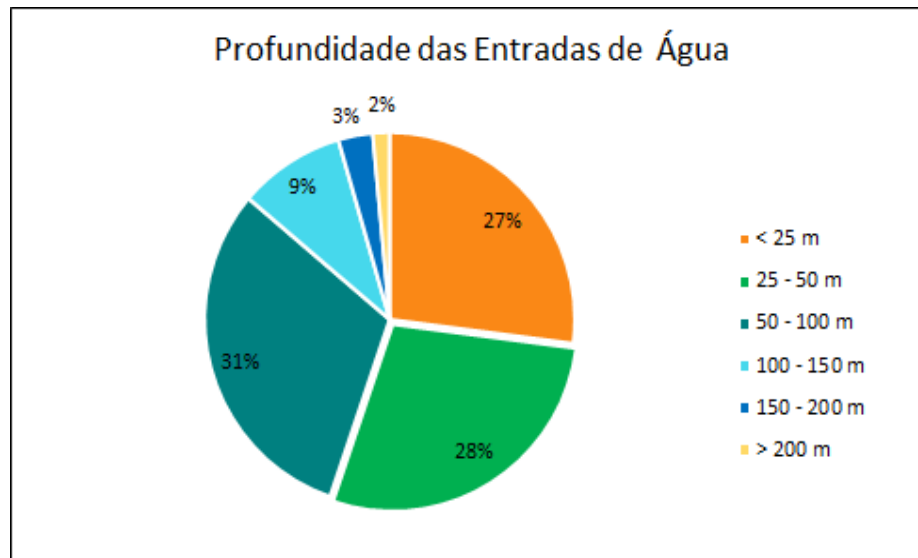
Gráfico 7 - Distribuição da quantidade de entradas de águas nos poços



Fonte: Elaborado pela autora

Quanto a profundidade, estão distribuídas de forma semelhante entre 0 a 100m, onde 86% dos casos estão dentro desse intervalo. Com o aumento da profundidade e em decorrência da pressão litostática sobre a abertura das fraturas (horizontais a sub-horizontais), a tendência é de fechamento, e com isso, entradas após os 150m somam apenas 5% dos casos (Gráfico 8).

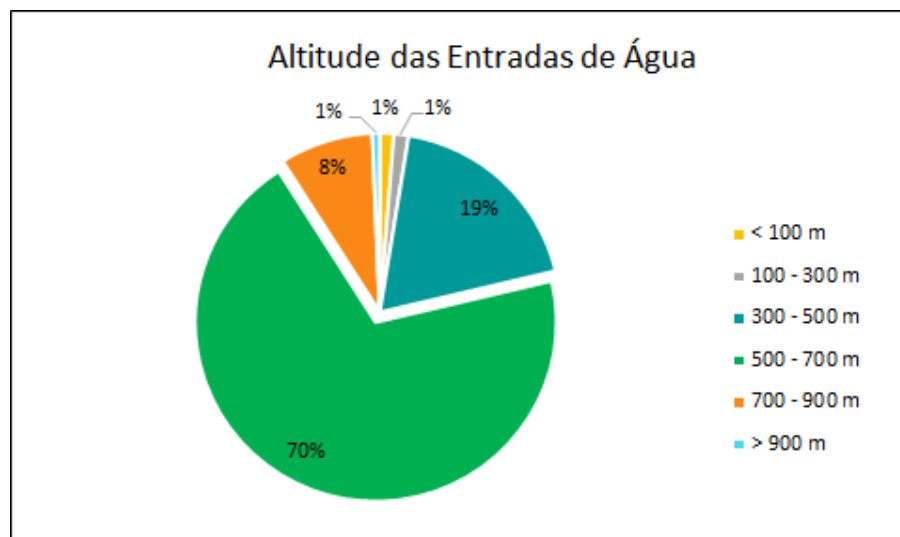
Gráfico 8 - Distribuição da profundidade das entradas de água nos poços



Fonte: Elaborado pela autora

Seguindo o mesmo padrão da altitude dos poços, as entradas de água estão predominantemente distribuídas entre 500 e 700m de altitude (70%), com boa distribuição também entre 300 e 500m (19%) (Gráfico 9).

Gráfico 9 - Distribuição da altitude das entradas de água dos poços

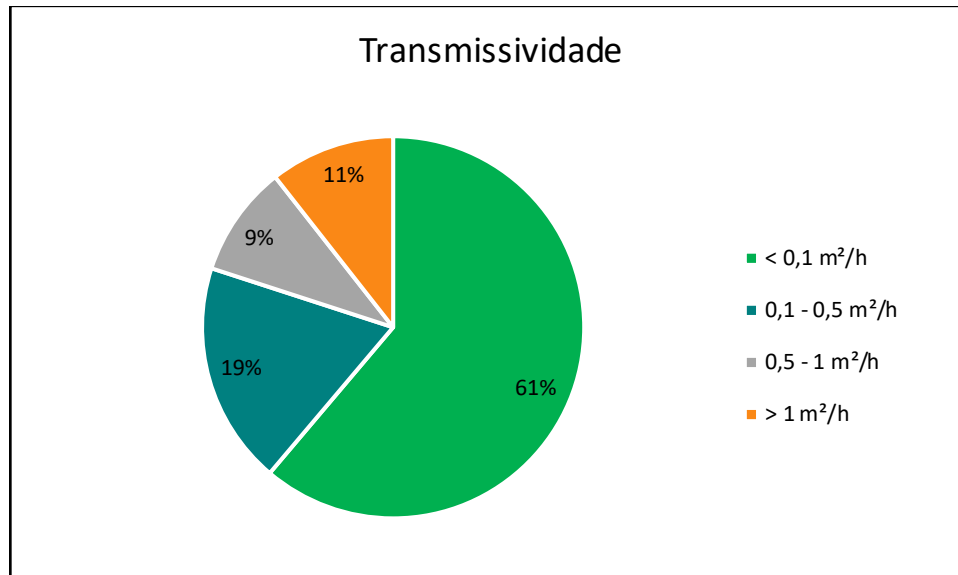


Fonte: Elaborado pela autora

Apesar da baixa quantidade de informações de transmissividade disponíveis, a análise dos dados indicou um comportamento já esperado para aquíferos

anisotrópicos, com forte variação e predomínio de valores baixos. No Gráfico 10, observa-se o intervalo menor que $0,1 \text{ m}^2/\text{h}$ como predominante, ocorrendo em 61% dos casos, seguido pelo intervalo entre $0,1$ e $0,5 \text{ m}^2/\text{h}$, em 19%.

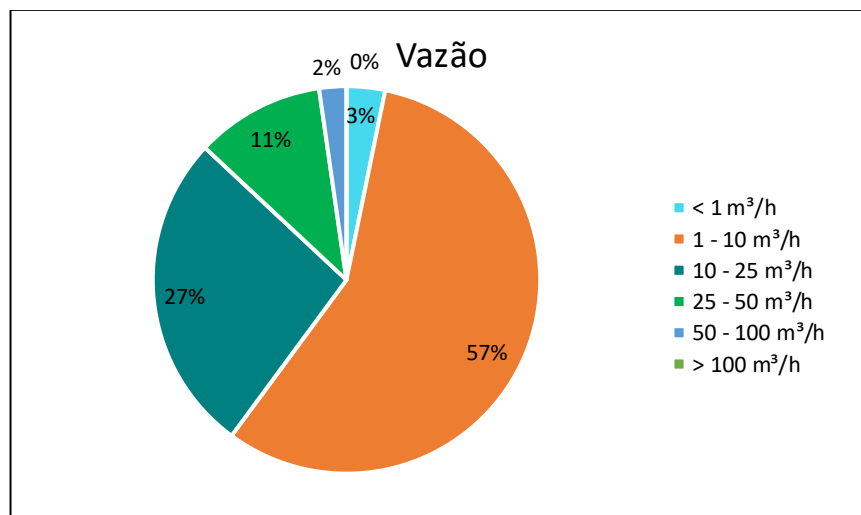
Gráfico 10 - Distribuição dos valores de transmissividade dos poços



Fonte: Elaborado pela autora

Quanto à vazão, os poços apresentam predomínio em intervalos entre $1-10 \text{ m}^3/\text{h}$ (57%), e $10-25 \text{ m}^3/\text{h}$ (27%). Não há ocorrência de poços com vazão maior que $100 \text{ m}^3/\text{h}$ e apenas 3% inferiores a $1 \text{ m}^3/\text{h}$ (Gráfico 11).

Gráfico 11 - Concentração dos valores de vazão dos poços



Fonte: elaborado pela autora

O poço de maior vazão, 85,7 m³/h, refere-se a um poço da CORSAN em Garibaldi, com 4 entradas de água, sendo três em camadas de basalto amigdalóide. A vazão média geral é de 12,91 m³/h, com mediana de 8 m³/h, a qual está dentro do intervalo mais representativo (Tabela 7).

Tabela 7 - Análise estatística dos valores de vazão

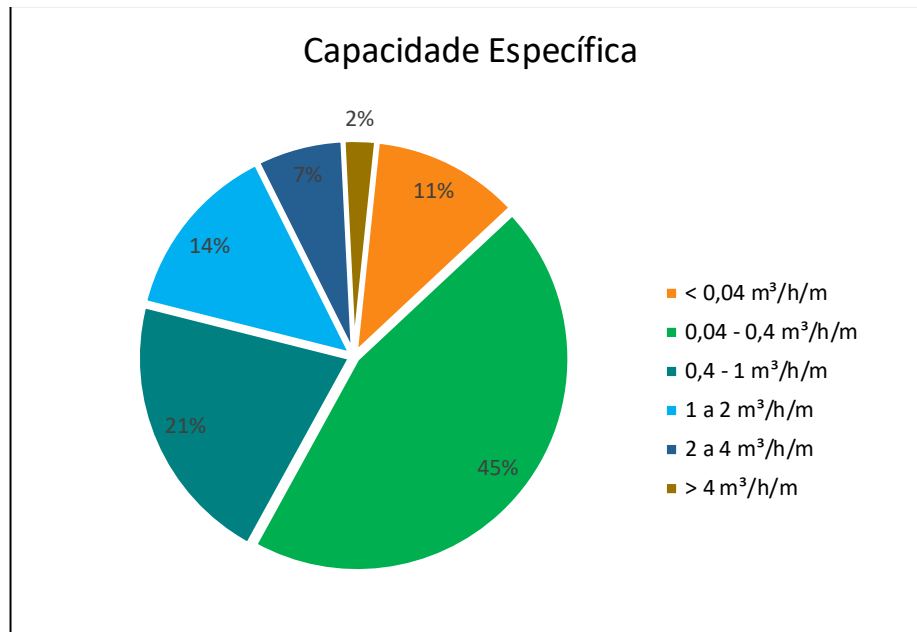
Vazão (m³/h)	Altitude < 550m	Altitude > 550m	Geral
Máximo	85,7	70	85,7
Mínimo	0,2	0,1	0,1
Média	13,480	12,454	12,919
Mediana	8	8,665	8
Desvio Padrão	14,854	12,118	13,425
Dados	270	326	596

Fonte: elaborado pela autora

Observa-se também que poços que captam água de aquíferos fraturados associados exclusivamente as rochas vulcânicas da Fm Palmas/Caxias, em altitudes maiores que 550m, possuem vazão média menor que a geral. Da mesma forma, poços em altitudes menores, que possivelmente ultrapassam a zona de contato entre as formações ácidas e básicas, apresentam a maior média, igual a 13,4 m³/h.

Com base no banco de dados construído para o estudo, 77% dos poços que apresentam dados de capacidade específica encontram-se abaixo de 1 m³/h/m (Gráfico 12). Por ser um parâmetro que exprime a capacidade de produção dos poços, sendo essa atrelada as características dos aquíferos fraturados, são comuns valores menores para esse parâmetro. Apresenta padrão similar ao Mapa Geológico do RS, onde na região é esperado valores inferiores a 0,5 m³/h/m, com exceção de áreas mais fraturadas ou com arenitos na base do sistema, onde podem ser encontrados valores superiores a 2 m³/h/m (Machado e Freitas, 2005).

Gráfico 12 - Distribuição dos valores de capacidade específica dos poços



Fonte: elaborado pela autora

A capacidade específica média em todos os poços é de 0,722 m³/h/m, variando de 0,002 até 9,80 m³/h/m (Tabela 8). Poços que captam água de estruturas a cima de 550m apresentam a maior capacidade específica média e mediana, igual a 0,747 e 0,353 m³/h/m, respectivamente. O valor máximo, igual a 9,801 m³/h/m, está localizado em estruturas localizadas a baixo dos 550m.

Tabela 8 - Análise estatística dos dados de capacidade específica

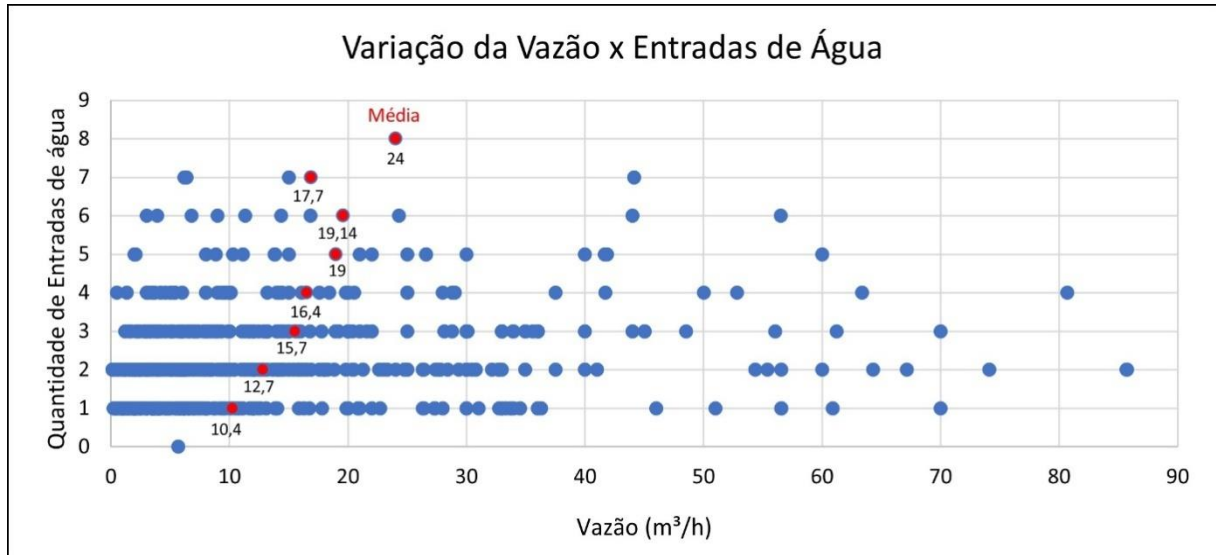
Capacidade Específica (m³/h/m)	Altitude < 550m	Altitude > 550m	Geral
Mínimo	0,003	0,002	0,002
Máximo	9,801	8,718	9,801
Média	0,690	0,747	0,722
Mediana	0,281	0,353	0,311
Desvio Padrão	1,157	1,084	1,116
Dados	224	285	509

Fonte: elaborado pela autora

Ambos os parâmetros não apresentam relação direta com a variação de quantidade de entradas de água. No gráfico abaixo, é observado apenas um leve aumento na vazão média, conforme um maior número de entradas, caindo após a

sexta ocorrência. A mesma relação não é vista na variação dos valores máximos, estando as maiores vazões nos poços com 2 e 4 entradas de água (Gráfico 13).

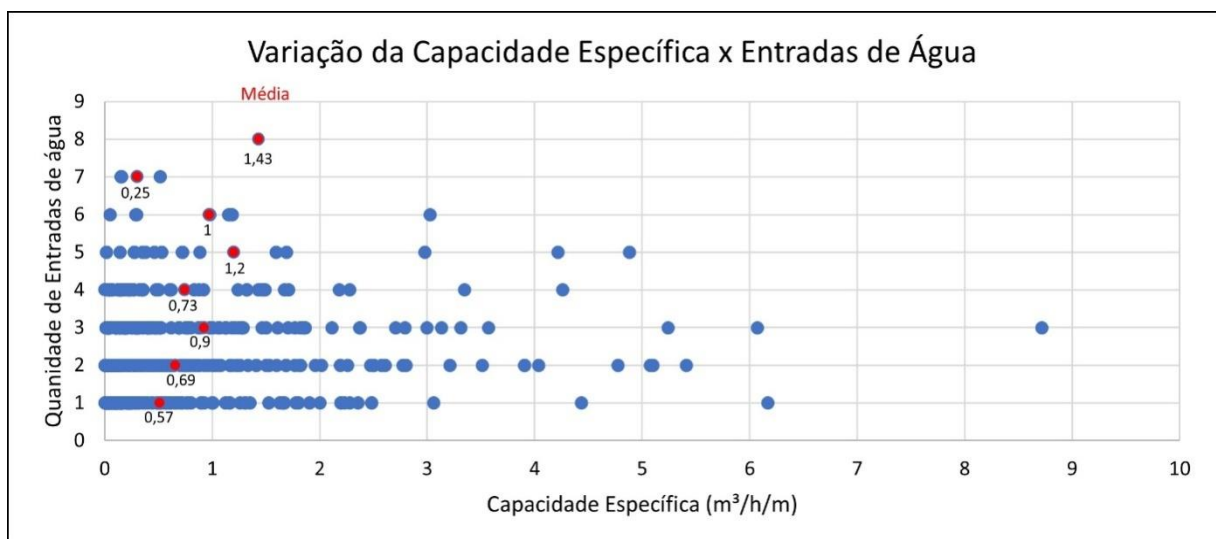
Gráfico 13- Variação da vazão conforme o número de entradas de água identificadas nos poços



Fonte: elaborado pela autora

Já em relação a distribuição dos valores de capacidade específica, não é visto relação direta nem na média, nem no valor máximo. Os valores concentram-se preferencialmente antes do 1 m³/h/m, e os maiores encontram-se entre 2 e 3 entradas de água (Gráfico 14).

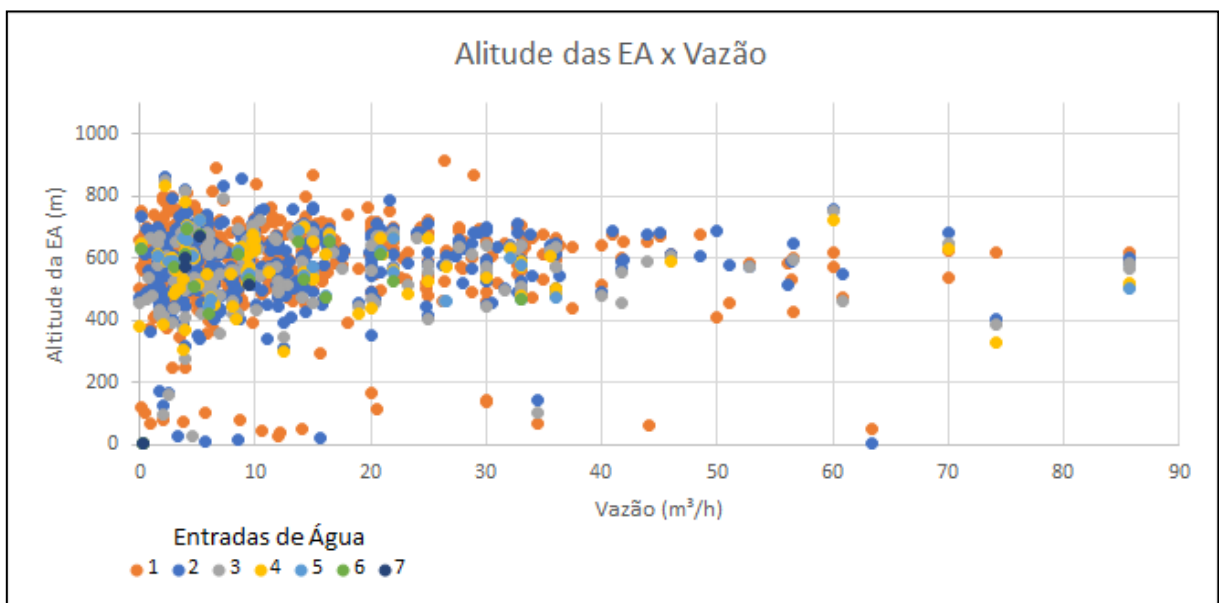
Gráfico 14 - Variação da capacidade específica conforme o número de entradas de água identificadas nos poços



Fonte: elaborado pela autora

A maior parte das entradas de água ocorrem em altitudes entre 500 e 700 metros, correspondendo a vazões menores que 25 m³/h (Gráfico 15). Acima dessa vazão, mas na mesma faixa de altitude, ocorre uma menor concentração de poços com vazão de até 70 m³/h. Os poços com altitudes menores, entre 0 e 300m, apresentam maior concentração em vazões inferiores a 10m³/h, e raras ocorrências de vazões altas (>60m³/h).

Gráfico 15 - Dispersão dos dados de vazão conforme altitude das entradas de água



Fonte: elaborado pela autora

6.2.2 Filmagens de poços

Para complementar a avaliação das entradas de água foram utilizadas 13 filmagens de poços, localizadas dentro e próximas ao polígono de estudo. Foram observadas litologia, profundidade, ocorrência e estruturas associadas para caracterização das entradas.

O poço COR ARV 11, localizado em Arvorezinha, possui 151m de profundidade, NE raso em 0,5m e duas entradas de água identificadas aos 40 e 47m. As estruturas de EA estão localizadas em camada muito fraturada, com injeções secundárias, possivelmente de composição ácida devido a altitude do poço.

Observa-se nessas profundidades a passagem de um pacote maciço para um fraturado de, aproximadamente, 2m, voltando para o maciço logo em seguida (Figura 32).

Figura 32 - Filmagem do poço COR ARV 11, mudança de pacote maciço para fraturado aos 39m.

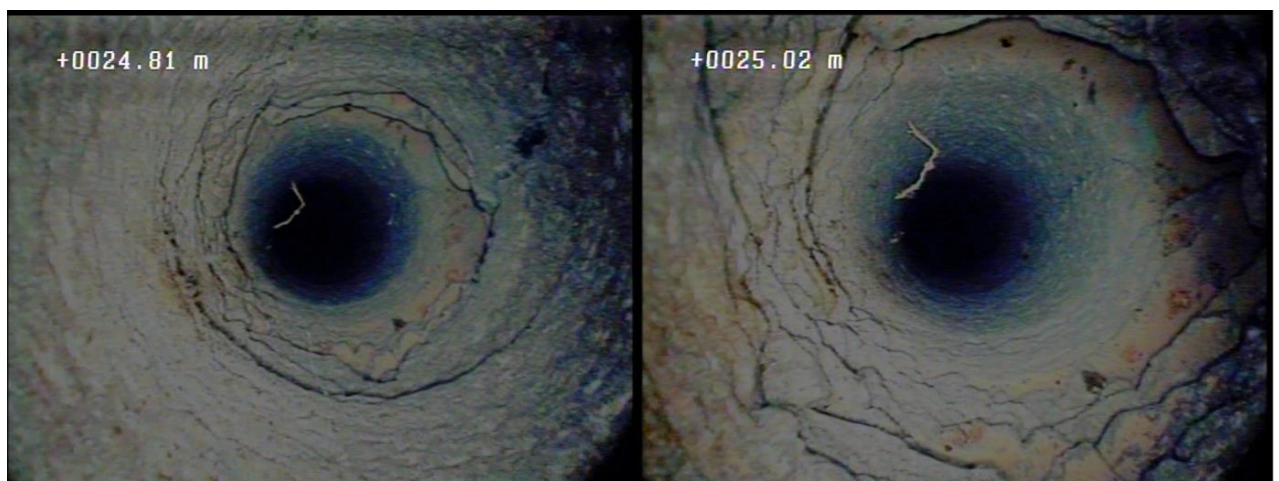


Fonte: elaborado pela autora com imagens cedidas pela CORSAN

A mesma intercalação entre pacotes maciços e fraturados é observada no Poço 4 – UCS, em Caxias do Sul, com 170m de profundidade e NE aos 8m. O poço está localizado aos 720m, indicando uma sequência de camadas ácidas, possivelmente riodacitos e dacitos.

O perfil descritivo da perfuração indica duas entradas de água, aos 26 e 85m. A primeira entrada de água está localizada em um estreito nível de faturamento, sem mudança litológica (Figura 33).

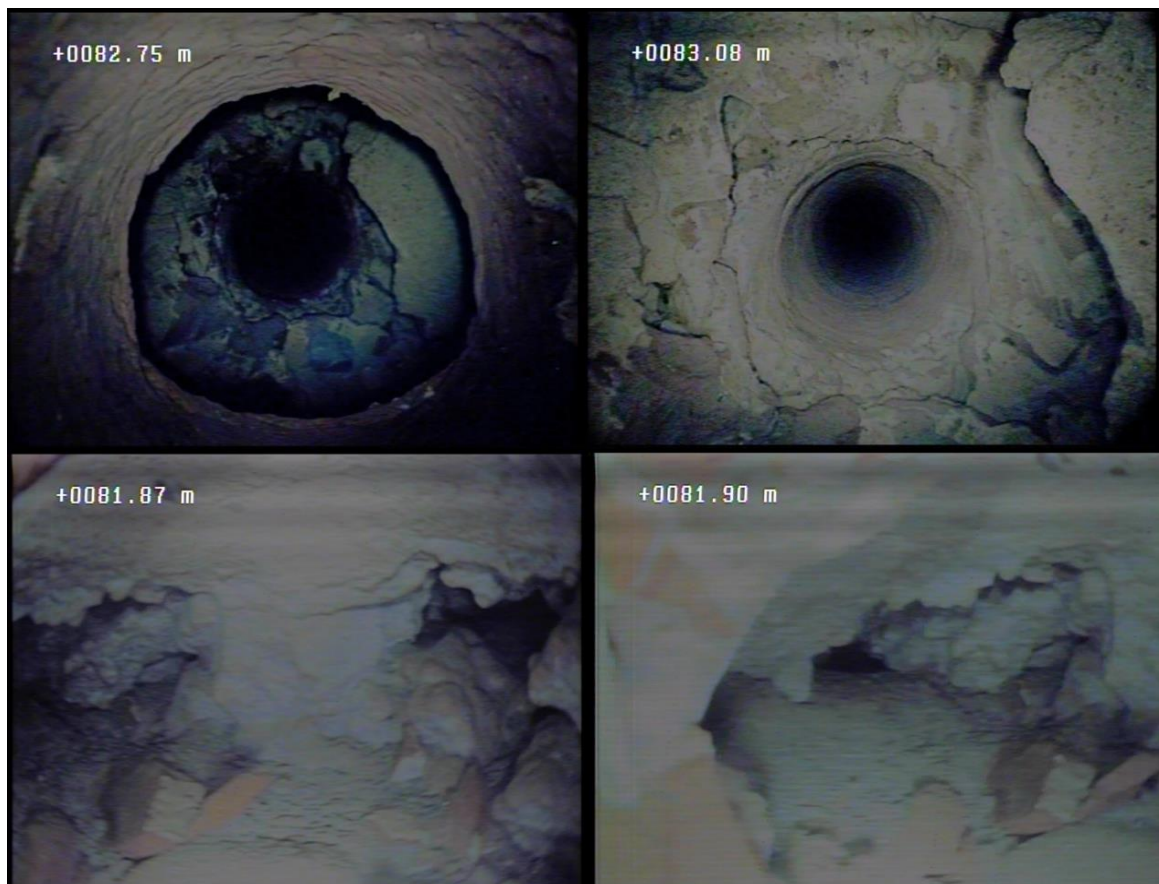
Figura 33 - Filmagem do Poço 4 - UCS, em Caxias do Sul, pacote estreito e fraturado aos 25m.



Fonte: elaborado pela autora com imagens cedidas pela CORSAN

A partir dos 81m ocorre a passagem de uma camada acinzentada e semi-alterada para uma camada vermelha e fraturada. Na estrutura de contato, são observadas aberturas centimétricas, algumas com preenchimento do que aparenta ser calcedônia (Figura 34).

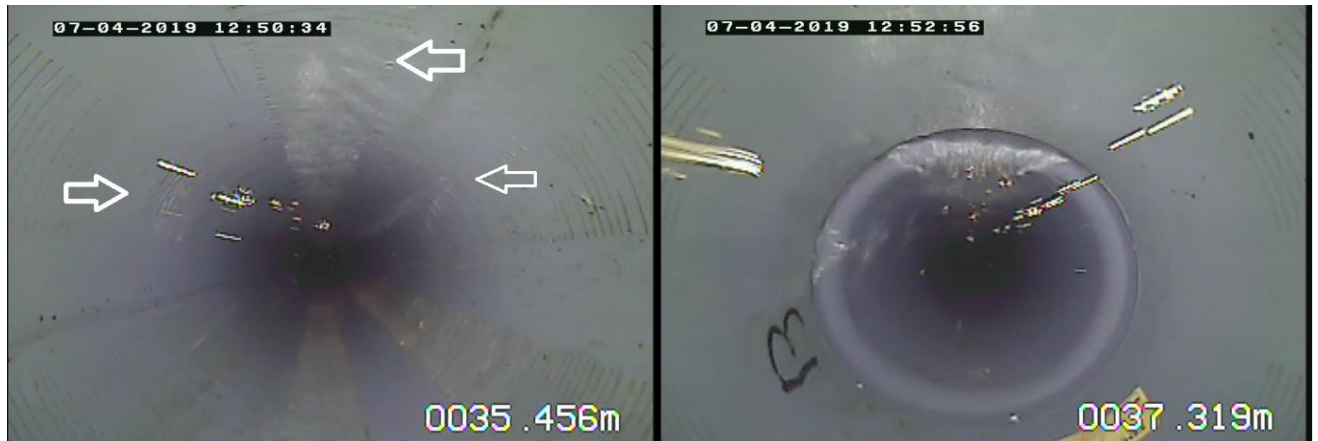
Figura 34 - Filmagem do poço UCS– Caxias do Sul, contato entre derrames e presença de aberturas



Fonte: elaborado pela autora com imagens cedidas pela CORSAN

O poço GAR 12, localizado em Garibaldi, apresenta entradas de águas em duas seções revestidas por pré-filtro. Na filmagem, foi observada a primeira entrada de água aos 35m, onde é descrito no perfil construtivo a passagem de uma camada de rocha sã para uma alteração. O NE é identificado logo em seguida, aos 37m (Figura 35).

Figura 35 - Filmagem do poço GAR 12, entrada de água através do pré-filtro aos 35m e NE encontrado aos 37m



Fonte: elaborado pela autora com imagens cedidas pela CORSAN

Uma nova camada de pré-filtro é observada aos 56m, referente a uma entrada de água com maior pressão. O revestimento termina logo em seguida, aos 57m, expondo uma camada de rocha pouco fraturada (Figura 36 e Figura 37).

Figura 36 - Filmagem do poço GAR 12, segunda entrada de água aos 55m e fim do revestimento aos 57m.



Fonte: elaborado pela autora com imagens cedidas pela CORSAN

Figura 37 - Filmagem do poço GAR 12, fim do revestimento e camada pouco fraturada aos 63m



Fonte: elaborado pela autora com imagens cedidas pela CORSAN

O poço 5498 - FAB5, localizado em Vespasiano Corrêa aos 470m de elevação, possui 120m de profundidade. As entradas de água descritas em perfil construtivo localizam-se aos 84 e 96m. Entretanto, a análise da filmagem permitiu identificar uma importante entrada aos 42m, em abertura da estrutura de contato entre derrames (Figura 38). Nesse mesmo pacote foram identificadas outras entradas de água pontuais e de maior pressão (Figura 39).

Figura 38 - Filmagem do poço 5498-FAB5, entrada de água em estrutura de contato entre derrames aos 42m.



Fonte: elaborado pela autora com imagens cedidas pela CORSAN

Figura 39 - Filmagem do poço 5498-FAB5, entrada de água pontual com pressão hidrostática aos 45m.



Fonte: elaborado pela autora com imagens cedidas pela CORSAN

A partir dos 80m ocorre a mudança para um pacote vesicular a amigdalóide, de paredes com fragmentos angulosos, onde é identificada uma nova entrada de água aos 88m (Figura 40).

Figura 40 - Filmagem do poço 5498-FAB5, passagem para pacote fraturado e entrada de água.



Fonte: elaborado pela autora com imagens cedidas pela CORSAN

Em poço da prefeitura de Paraí, com 214m de profundidade, são observadas quatro entradas de água e um nível estático profundo, aos 93m. A primeira estrutura é encontrada logo aos 13m, assim que encerra o revestimento e com água possivelmente oriunda do nível freático (Figura 41).

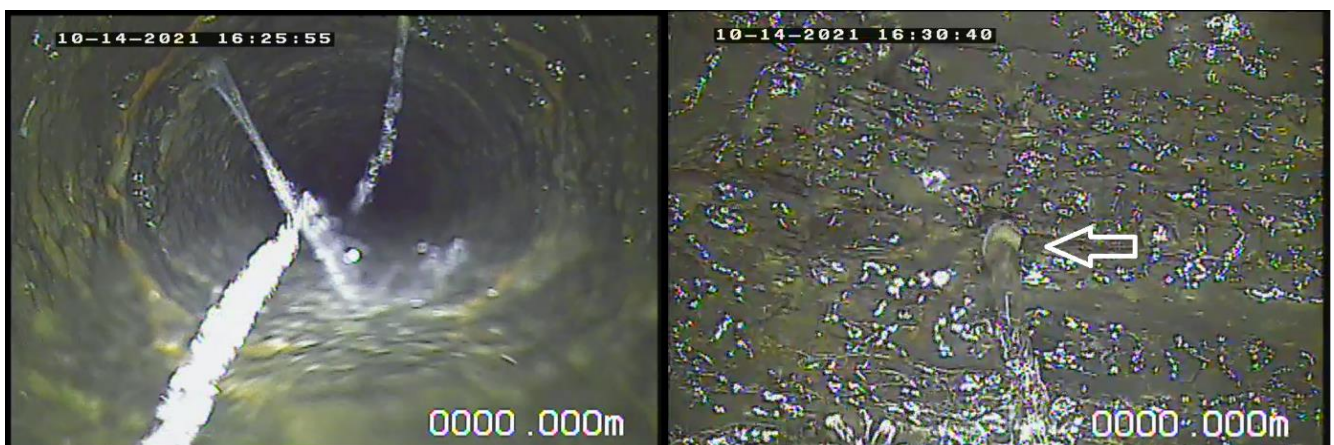
Figura 41 - Filmagem de poço em Paraí, entrada de água rasa, provavelmente proveniente do lençol freático



Fonte: elaborado pela autora com imagens cedidas pela CORSAN

Próximo aos 50m, em camada pouco fraturada, ocorre uma sequência de 3 entradas de água milimétricas, com forte pressão hidrostática (Figura 42).

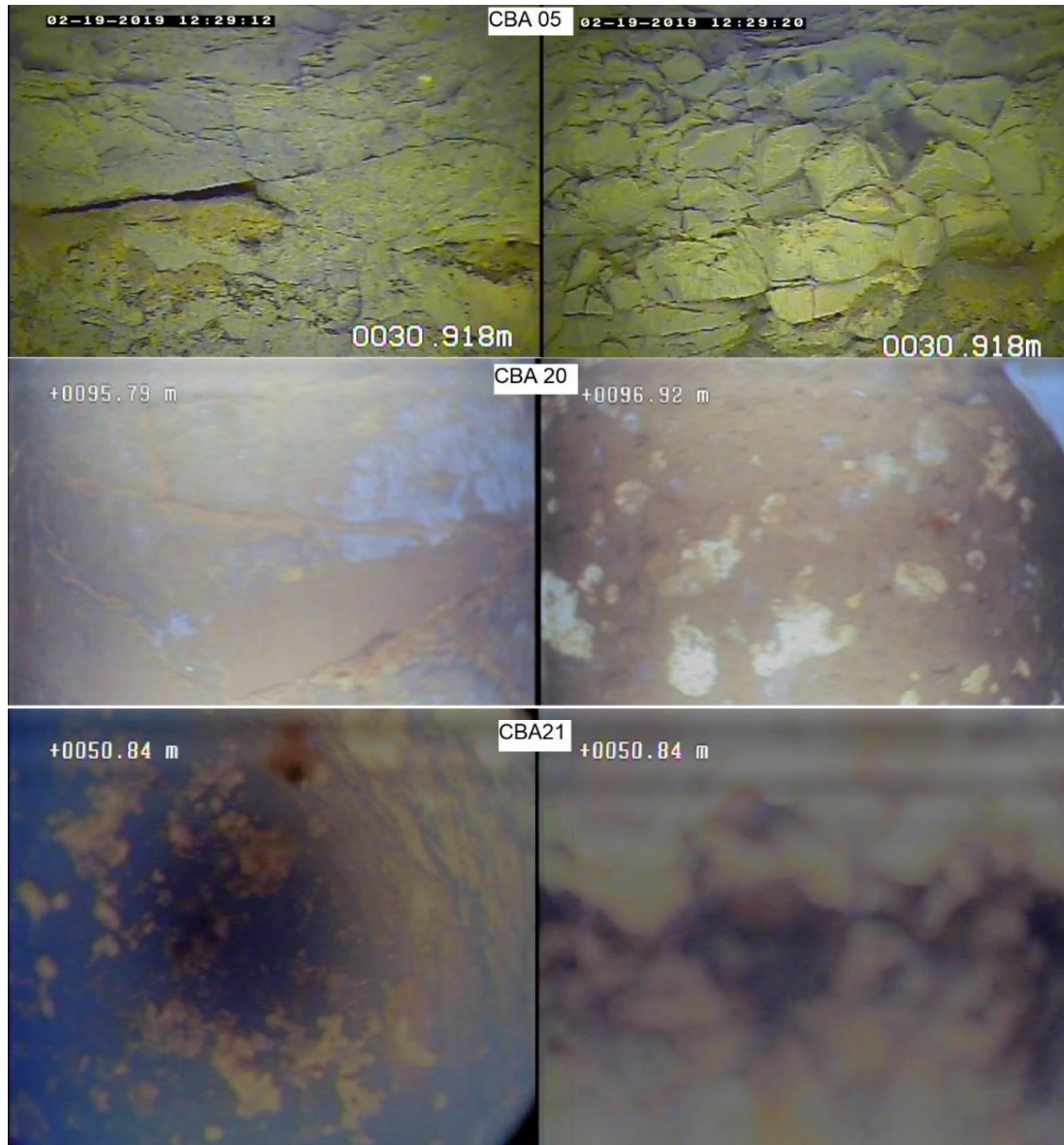
Figura 42 - Filmagem do poço em Paraí, 3 entradas de água seguidas em mesmo pacote



Fonte: elaborado pela autora com imagens cedidas pela CORSAN

As filmagens realizadas nos poços CBA05, CBA20 e CBA21, em Carlos Barbosa, apresenta fraturas, camadas brechadas e pequenas aberturas nas zonas de entrada de água (Figura 43).

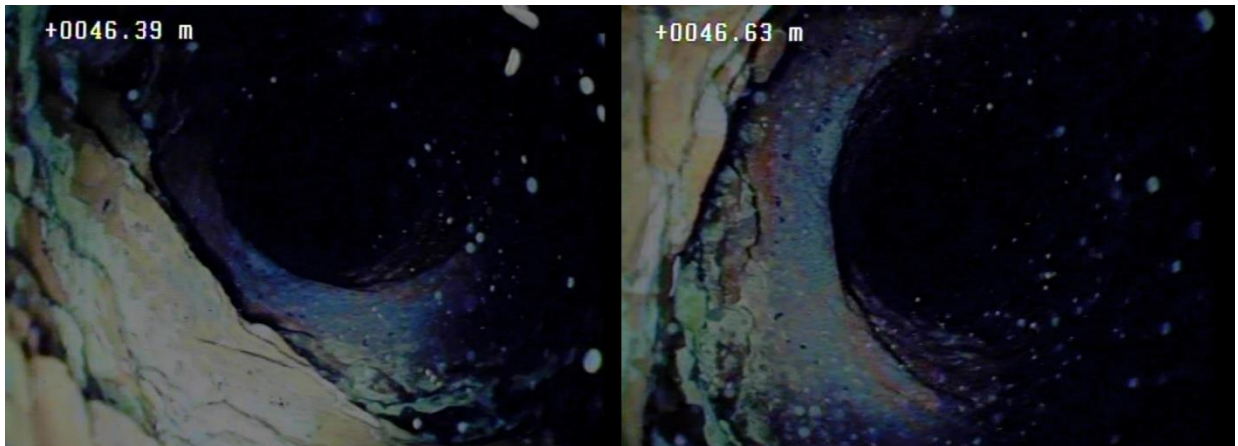
Figura 43 - Filmagem dos poços CBA 05, CBA 20 e CBA21, zonas de entradas de água.



Fonte: elaborado pela autora com imagens cedidas pela CORSAN

Em outro poço de Carlos Barbosa, CBA39, observa-se aos 46m um deslocamento das paredes, além de uma mudança no padrão do fraturamento, indicando um possível contato entre derrames (Figura 44). As entradas de água descritas no perfil geológico são encontradas apenas em maior profundidade, aos 93 e 98m.

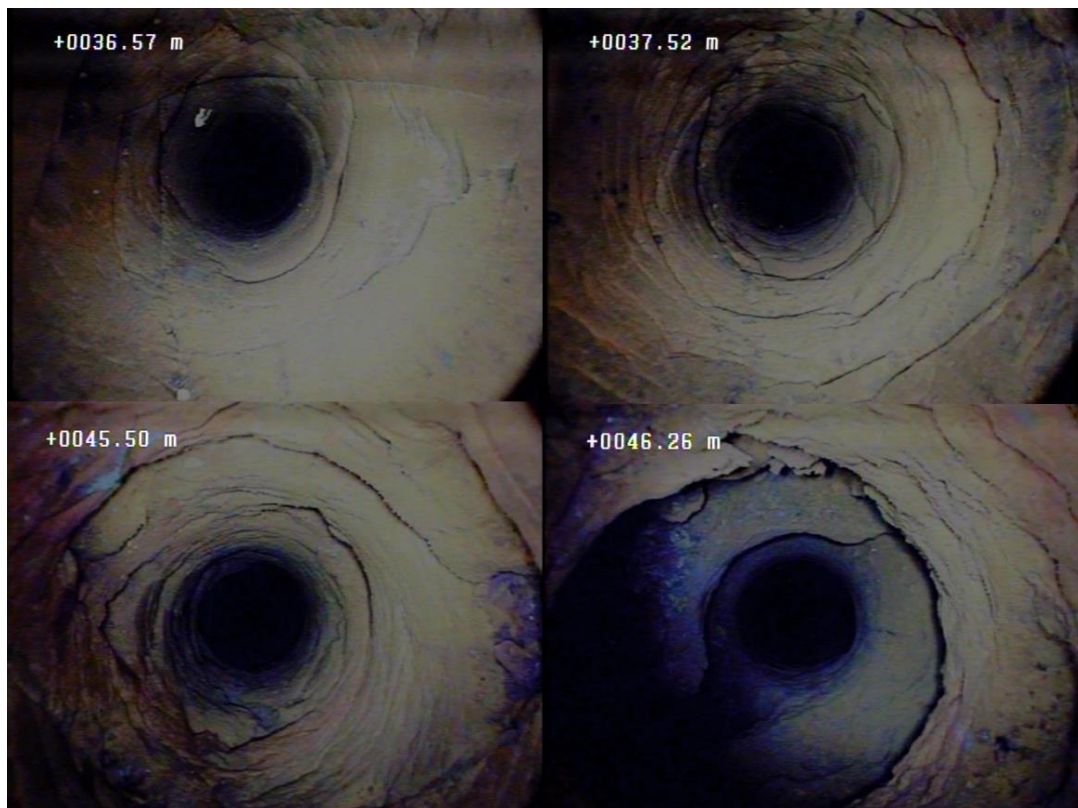
Figura 44 - Filmagem do poço CBA39, possível contato entre derrames marcado pelo deslocamento das paredes do poço



Fonte: elaborado pela autora com imagens cedidas pela CORSAN

O mesmo comportamento é observado no poço São Jorge, onde ocorre um aumento gradual do nível de faturamento a partir dos 36m, até chegar na zona de contato, aos 46m, gerando uma abertura e deslocamento das paredes (Figura 45).

Figura 45 - Filmagem do poço São Jorge, aumento da densidade de fraturas até chegar no contato



Fonte: elaborado pela autora com imagens cedidas pela CORSAN

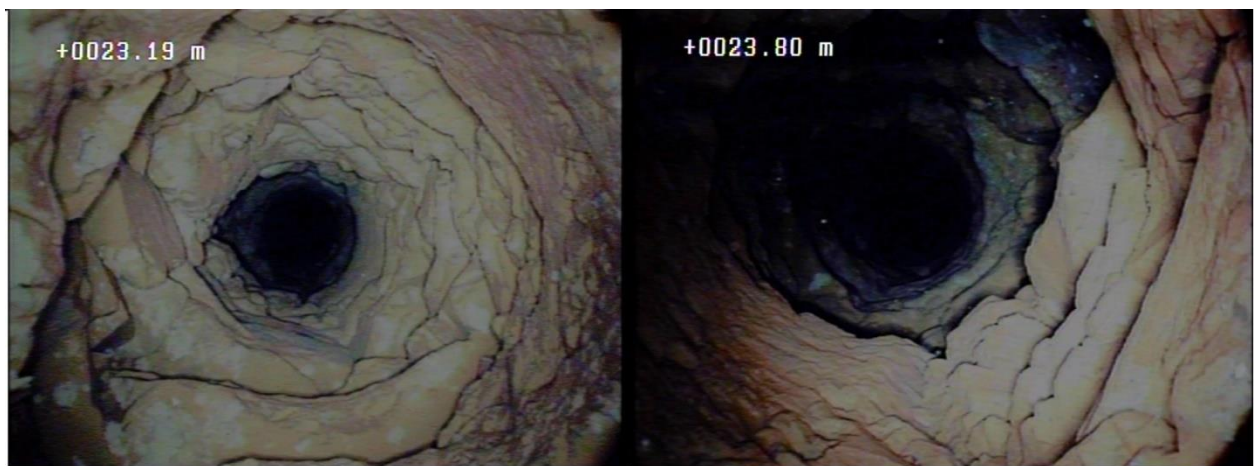
Os poços FLC 19, em Flores da Cunha, e Garibaldi, apresentam zonas de contatos importante, porém sem entradas de água descritas no perfil (Figura 46 e Figura 47).

Figura 46 - Filmagem do poço FLC 19, zona de contato identificada aos 60m.



Fonte: elaborado pela autora com imagens cedidas pela CORSAN

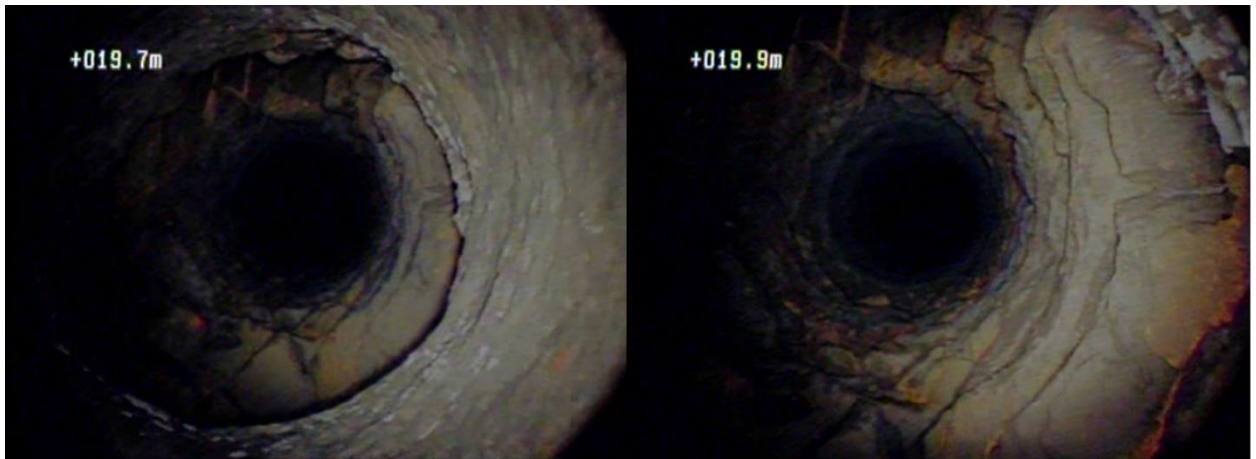
Figura 47 - Filmagem do poço Garibaldi, zona de contato sem entradas de água.



Fonte: elaborado pela autora com imagens cedidas pela CORSAN

O poço NBA26, em Nova Bassano, possui descrito em perfil construtivo 3 entradas de água, aos 20, 60 e 144m. Na filmagem é observado um contato importante aos 20m, com aproximadamente 20 cm, com alargamento das paredes e aumento do fraturamento, referente a profundidade de uma das entradas citadas (Figura 48). A filmagem acaba aos 35m, sem mostrar a litologia das outras entradas.

Figura 48 - Filmagem do poço NBA 26, zona de contato com entrada de água descrita no perfil construtivo.



Fonte: elaborado pela autora com imagens cedidas pela CORSAN

De um modo geral, as entradas de água ocorrem preferencialmente em porções fraturadas dos derrames e sem alteração litológica, como nos poços de Arvorezinha, Garibaldi e Paraí. Também são observadas, com menor frequência, entradas em camadas alteradas e na presença de brechas vulcânicas.

Quando as entradas ocorrem entre contatos de derrames, como nos poços 5498-FAB5, Poço 4 – UCS e NBA26, observa-se aberturas maiores, por vezes preenchidas, e com maior percolação de água. Em alguns poços foram identificadas importantes zonas de contatos, porém sem circulação de água e com entradas mais profundas.

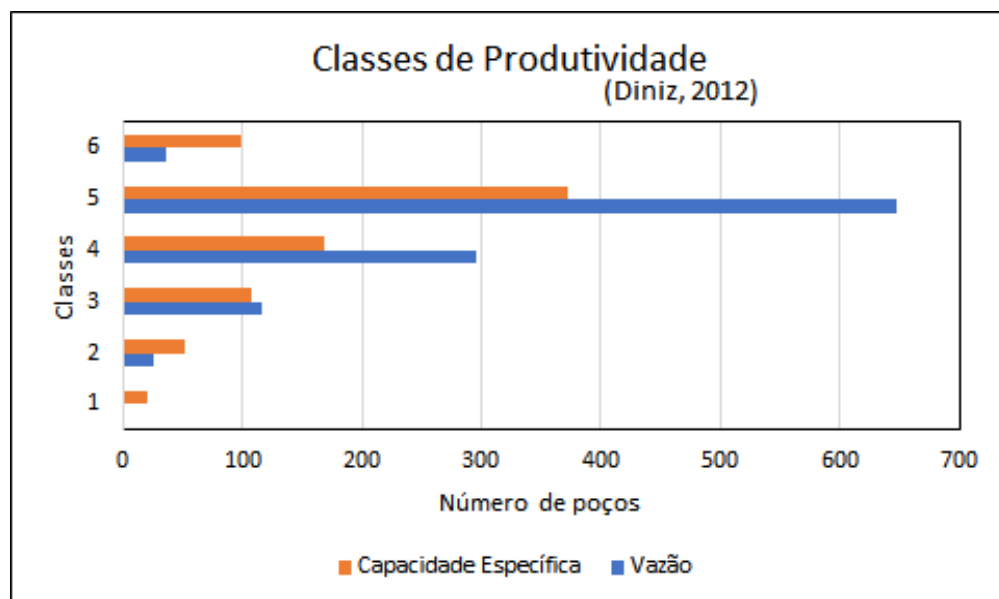
6.3 PRODUTIVIDADE DOS POÇOS

Utilizando a metodologia de Diniz (2012), a qual propõe que a produtividade hidrogeológica de uma região seja analisada através do cruzamento de informações hidrodinâmicas do aquífero, foram utilizados os dados de capacidade específica e vazão para classificar o SASG na área de estudo.

As categorias propostas por Diniz são divididas em seis Classes, variando conforme intervalos de valores para cada parâmetro, entre Classe 1 – muito alta, até Classe 6 - improdutiva.

Para ambos parâmetros analisados, os poços da região estão em sua maioria na Classe 5, referente às zonas de produtividade “Geralmente muito baixa, porém localmente baixa”. Todas as Classes são abrangidas pela capacidade específica, enquanto nenhum poço apresenta vazão de Classe 1 – muito alta, maior que 100 m³/h (Gráfico 16).

Gráfico 16 - Distribuição dos poços nas Classes de Produtividade, pela metodologia de Diniz (2012)



Fonte: elaborado pela autora.

Utilizando os valores médios de vazão (Q) e capacidade específica (q) identificados no banco de dados, vazão geral de 11,36 m³/h e capacidade específica geral de 0,8055m³/h/m, ambos se encontram dentro da Classe 4 – geralmente baixa, porém localmente moderada.

Fragmentando as zonas de altitude das entradas de água em pequenas faixas de 50m, afim de observar a variação da produtividade conforme a variação das altitudes, observa-se que ambos os parâmetros ocorrem entre a Classe 4 – Geralmente baixa, porém localmente moderada e Classe 5 – Geralmente muito baixa, porém localmente muito baixa (Tabela 9).

Tabela 9 - Classes de produtividade conforme vazão e q, em faixas de altitudes das entradas de água

Intervalo de Altitude da EA	Mediana Vazão (m ³ /h)	Classe de produtividade	Mediana Capacidade Específica (m ³ /h/m)	Média de produtividade
0 – 400m	5,77	5	0,3215	5
400 – 450 m	6	5	0,19	5
450 – 500 m	9,043	5	0,336	5
500 – 550 m	8,4175	5	0,304	5
550 – 600 m	11,124	4	0,281	5
600 – 650 m	10	4	0,509	4
650 – 700 m	11,31	4	0,441	4
700 – 750 m	11,20	4	0,297	5
750 – 1000 m	7,2	5	0,304	5

Fonte: elaborado pela autora.

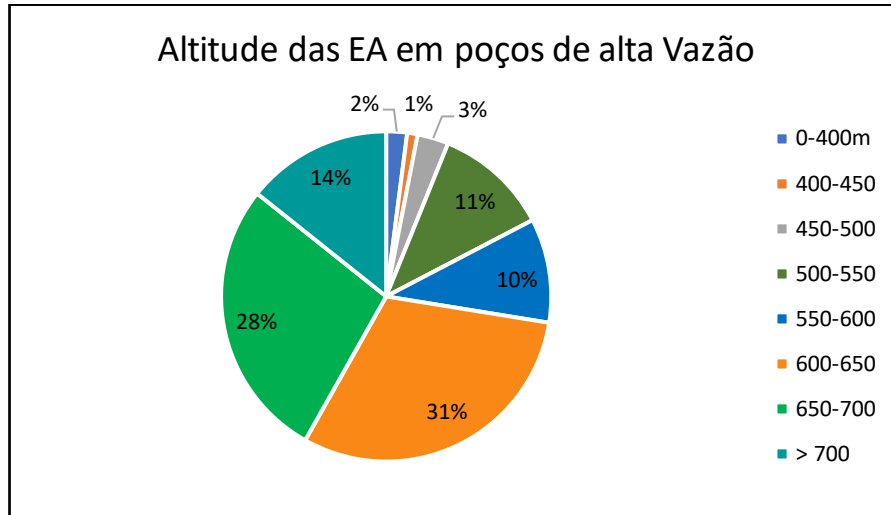
Para a vazão, a Classe 4 é observada em uma grande faixa de altitude, ocorrendo dos 550 aos 750m. Observa-se que essa grande faixa inicia onde também se inicia a altitude de passagem entre as formações e pode representar uma zona de maior ocorrência de contatos. Da mesma forma, as menores medianas se concentram nos intervalos extremos de altitude, onde os poços alcançam menos contatos. A menor vazão ocorre no intervalo entre 0 e 400m, com 5,7 m³/h, e a maior encontra-se entre 650 e 700m, com vazão de 11,31 m³/h.

Quanto a capacidade específica, a Classe 4 ocorre em dois intervalos, entre os 600 e 700m de altitude, estando também dentro da faixa mais produtiva do parâmetro anterior. Embora tenham valores próximos, a maior mediana está entre os 600 e 650m, com q igual a 0,509 m³/h/m.

Ao analisar apenas entradas de água em poços de alta vazão, maiores que 25 m³/h (Classe 3) e entre 25-50 m³/h (Classe 2), a mesma faixa de altitude, entre 600 e

650m, é observado como predominante. Foram identificados 125 poços nessas condições, onde 73% dos casos ocorrem na altitude entre 600-700m (Gráfico 17).

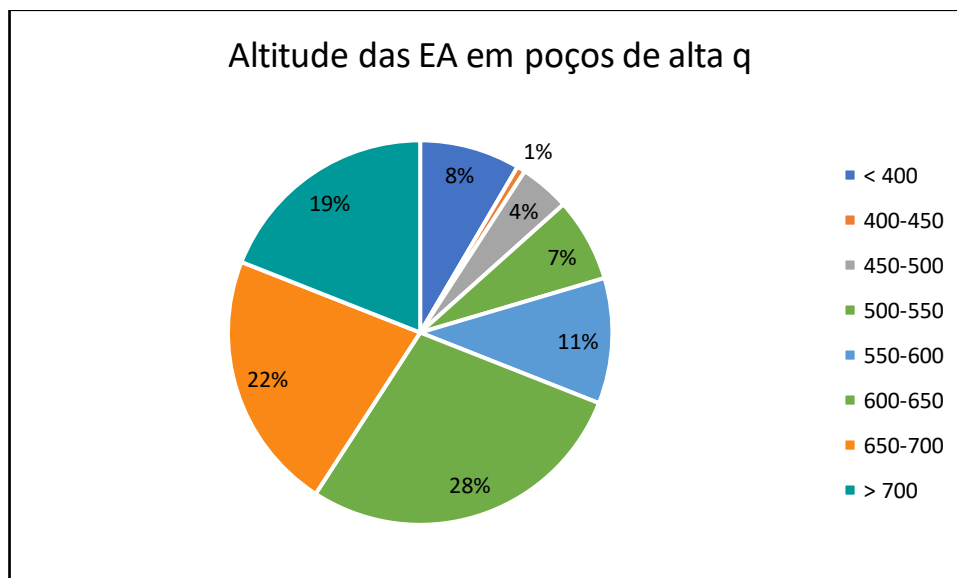
Gráfico 17 - Distribuição da altitude das EA em poços de alta vazão



Fonte: elaborado pela autora

Analisando poços de alta produtividade quanto a capacidade específica (q), referentes às Classes 1 e 2, foram identificados 179 poços. Desses, as entradas concentram-se entre 600-700m (50%), seguidas por maiores de 700m (19%) (Gráfico 18).

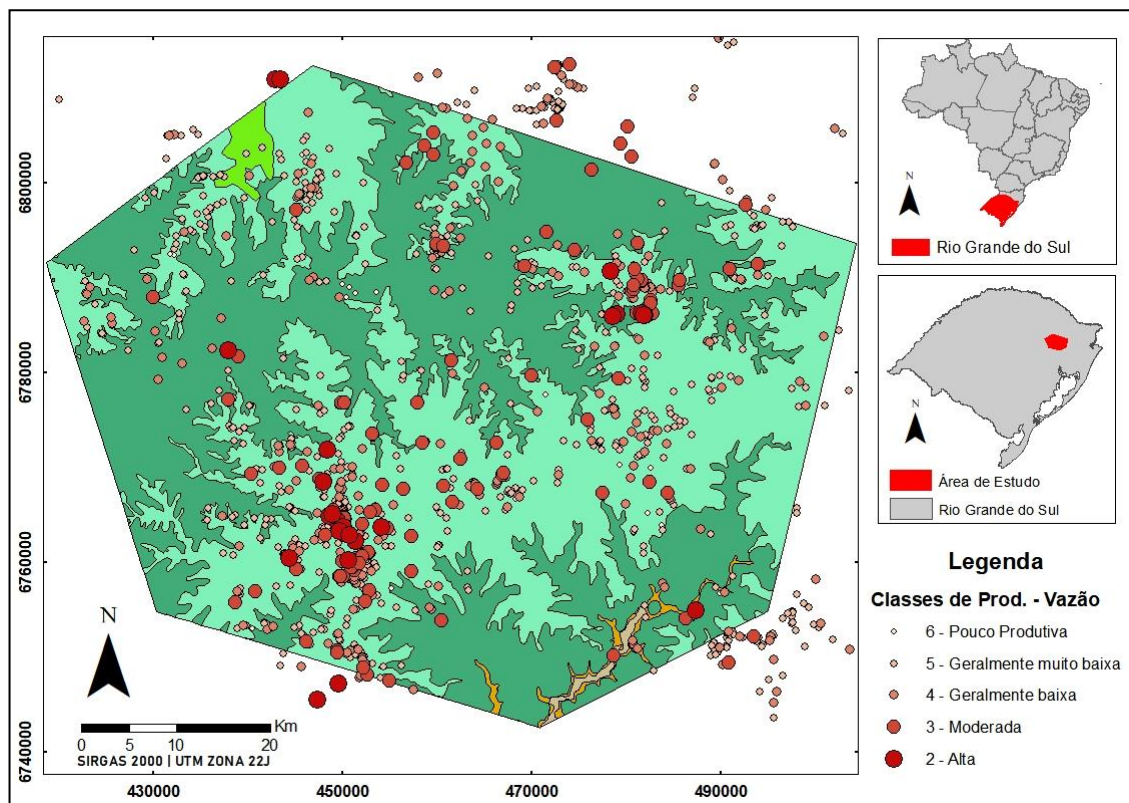
Gráfico 18 - Distribuição da altitude das EA em poços de alta CE



Fonte: elaborado pela autora

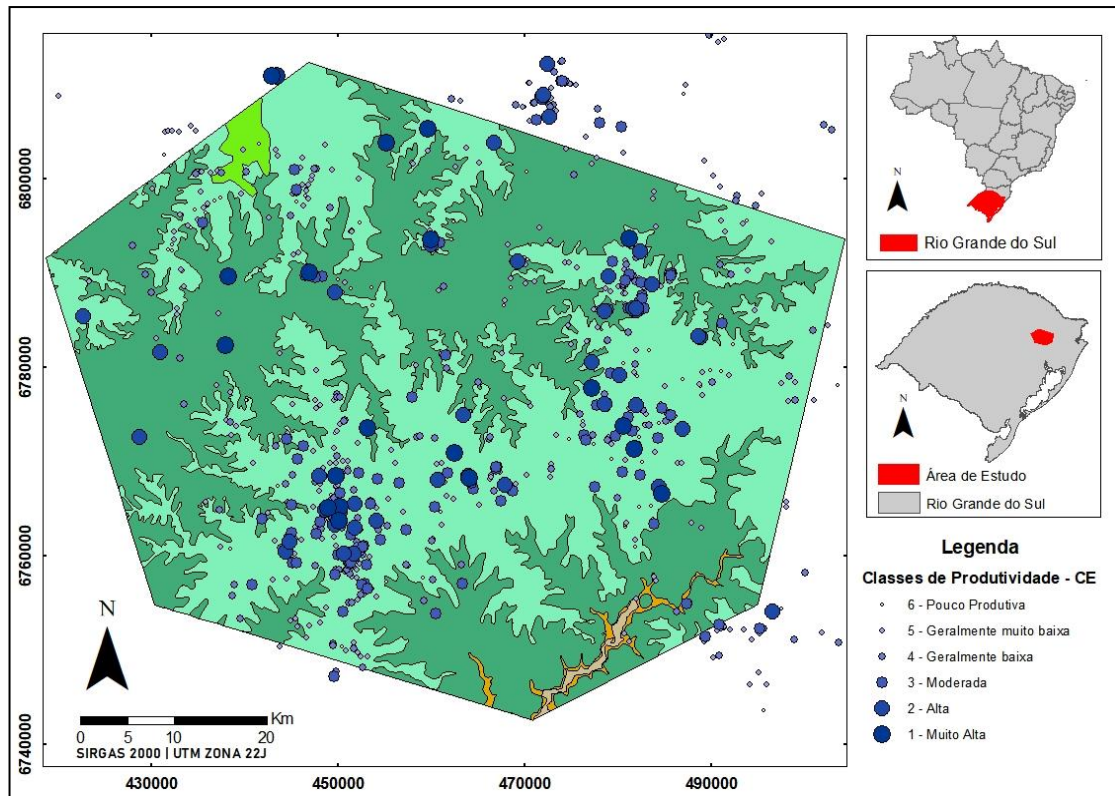
Quando plotados em mapas geológicos, observa-se duas áreas principais com concentração de poços com maior produtividade (Figura 49 e Figura 50). Essas regiões estão localizadas próximas a mudanças de litologia e foram escolhidas para serem analisadas com maior detalhe.

Figura 49 - Mapa geológico da área de estudo com a produtividade dos poços a partir da vazão



Fonte: Elaborado pela autora a partir de Wildner et al., 2008

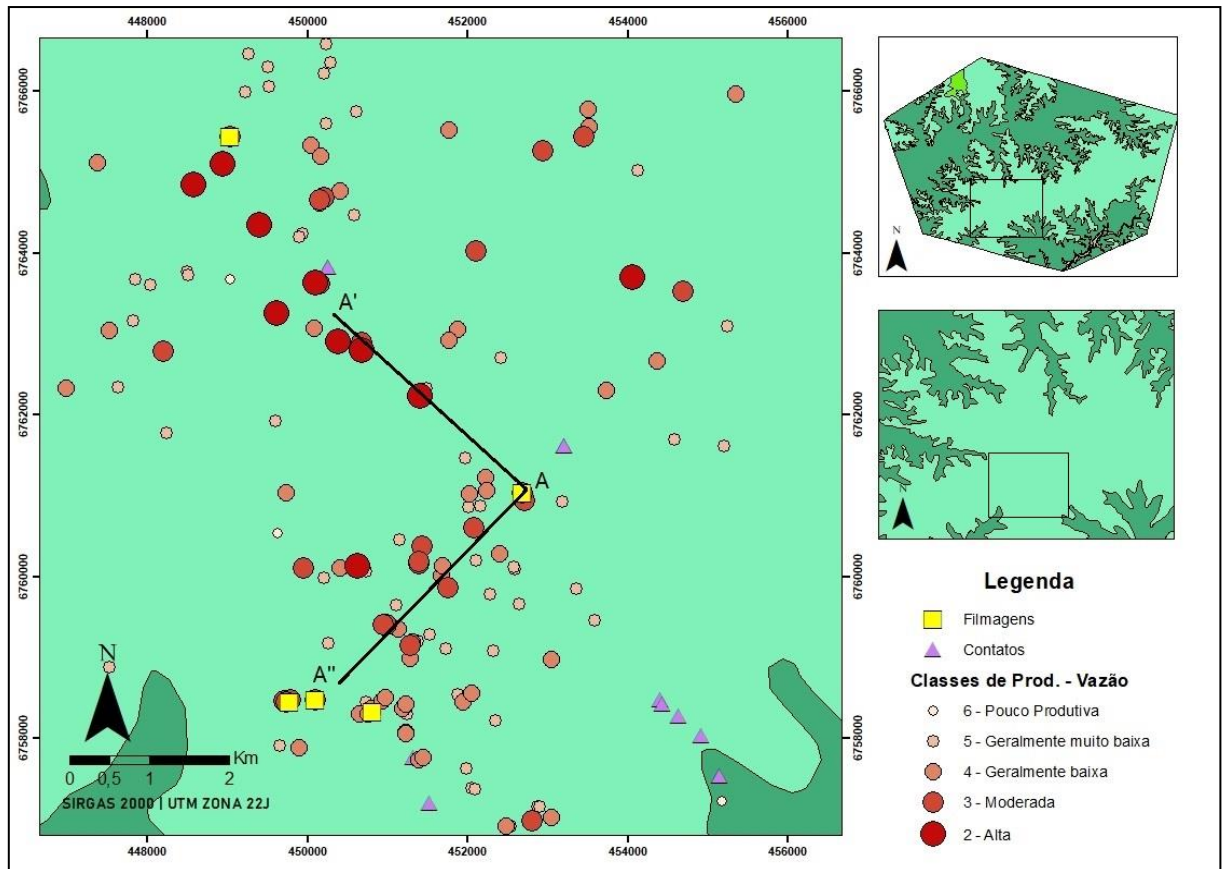
Figura 50 - Mapa geológico da área de estudo com a produtividade dos poços a partir da Capacidade Específica



Fonte: Elaborado pela autora a partir de Wildner et al., 2008

Na região sudoeste do polígono, entre os municípios de Carlos Barbosa e Garibaldi, verifica-se uma concentração de poços Classe 2 e 3, além de 5 filmagens e de uma série de contatos mapeados em campo (Figura 51). Os perfis traçados correlacionam os derrames e estruturas, marcando o contato entre as rochas ácidas e básicas, além de pacotes de brechas vulcânicas.

Figura 51 - Análise de detalhe em área entre os municípios de Garibaldi e Carlos Barbosa

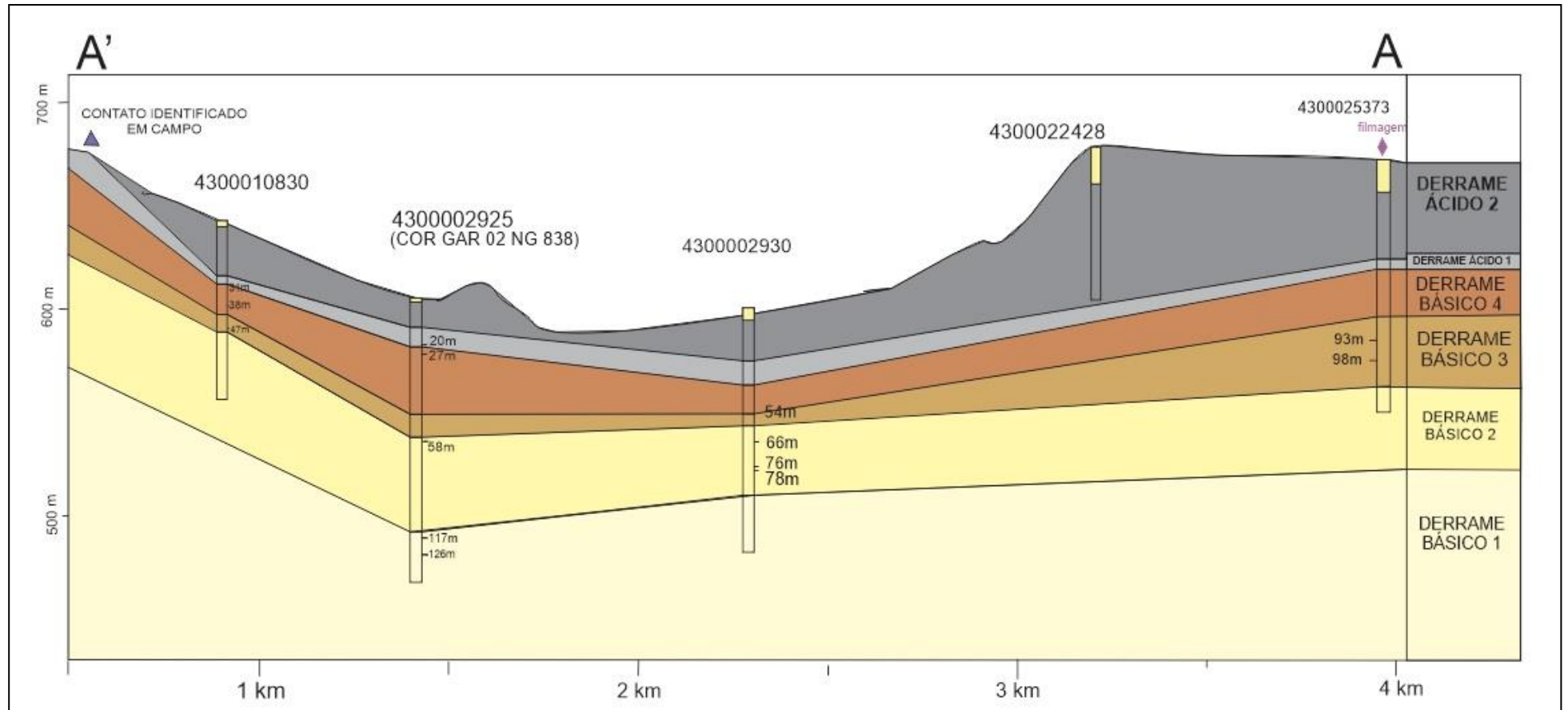


Fonte: Elaborado pela autora a partir de Wildner et al., 2008

A seção geológica A-A' passa pelo poço de maior vazão de toda área de estudo, COR GAR 02 NG 0838, e por um poço Classe 1 de capacidade específica, identificado como 4300010830. Ambos os poços atravessam o contato entre a Fm Palmas/Caxias e Fm Gramado, localizado em uma altitude próxima aos 600m (Figura 52).

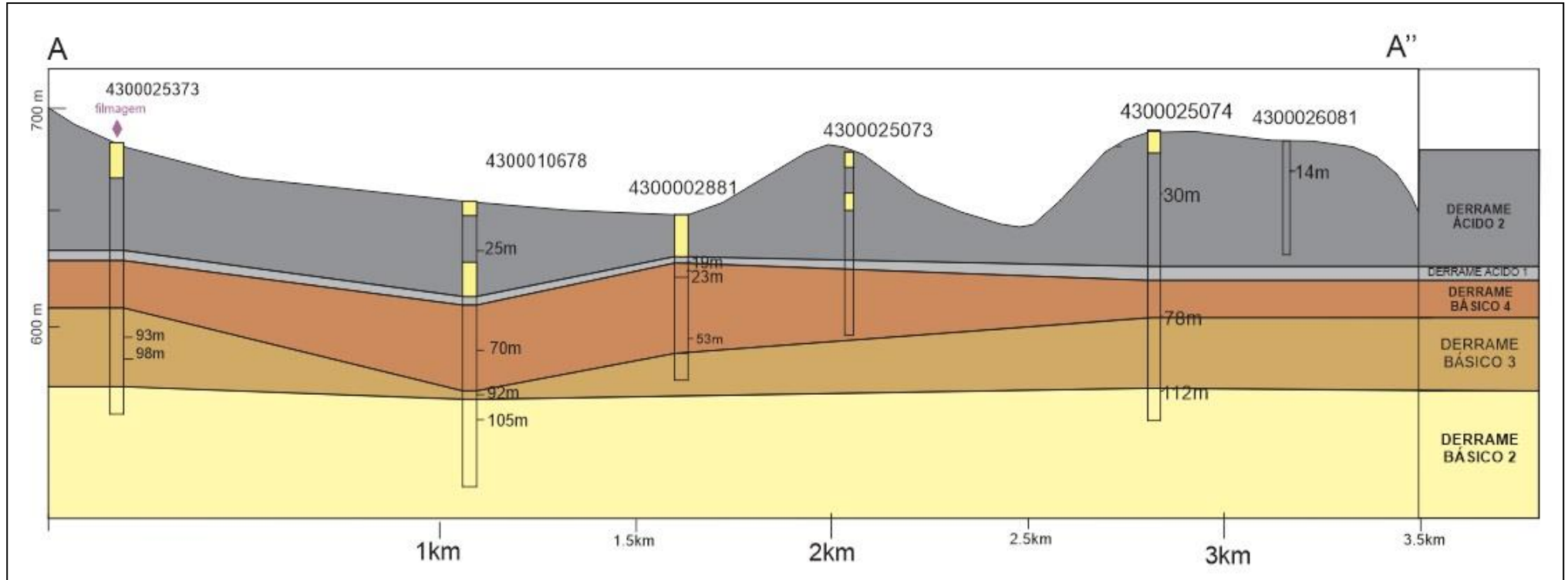
A seção A-A'' parte do mesmo poço, 4300025373, e apesar de não apresentar camada ácida descrita nos perfis construtivos, os derrames superficiais foram interpretados como referentes à Fm Palmas/Caxias, através da correlação com o perfil anterior e dos contatos em campo (Figura 53).

Figura 52 – Seção geológica obtida através do perfil A-A', entre os municípios de Carlos Barbosa e Garibaldi



Fonte: Elaborado pela autora através do software CorelDRAW

Figura 53 - Seção geológica obtida através do perfil A-A", entre os municípios de Carlos Barbosa e Garibaldi



Fonte: Elaborado pela autora através do software CoreIDRAW

Analisando os perfis e as Tabelas 10 e 11, observa-se que a ocorrência das entradas de água concentra-se entre 500 e 650m de altitude. Nos poços 4300010830, COR GAR 02 NG, 4300002930 e 4300002881, estão localizadas próximas aos contatos entre derrames. No caso do poço da CORSAN, de maior vazão, possui duas entradas de água na zona de contato entre ácidas e básicas.

Os poços 4300022428 e 4300026081, que não alcançam zonas de contato entre as duas formações, possuem vazão menor e pertencem à Classe 5, com vazão de 3m³/h e 2m³/h, respectivamente.

O contato entre as rochas ácidas e básicas do poço 4300025373 ocorre próximo aos 46m, na qual uma estrutura de contato foi visualizada nessa mesma profundidade na filmagem do poço e demonstrada na Figura 44.

Tabela 10 - Dados construtivos e hidrodinâmicos dos poços utilizados no perfil A-A'

Poço	Profundidade (m)	EA (m)	Vazão (m ³ /h)	q (m ³ /h/m)
4300010830	84	31; 38; 47	61	8.7
COR GAR 02 NG	141	24; 58; 117	85	3.2
4300002930	120	54; 66; 76; 78	48	1.03
4300022428	80		3	0.423
4300025373	114	93; 98	38	1.004

Fonte: elaborado pela autora com dados retirados do SIAGAS

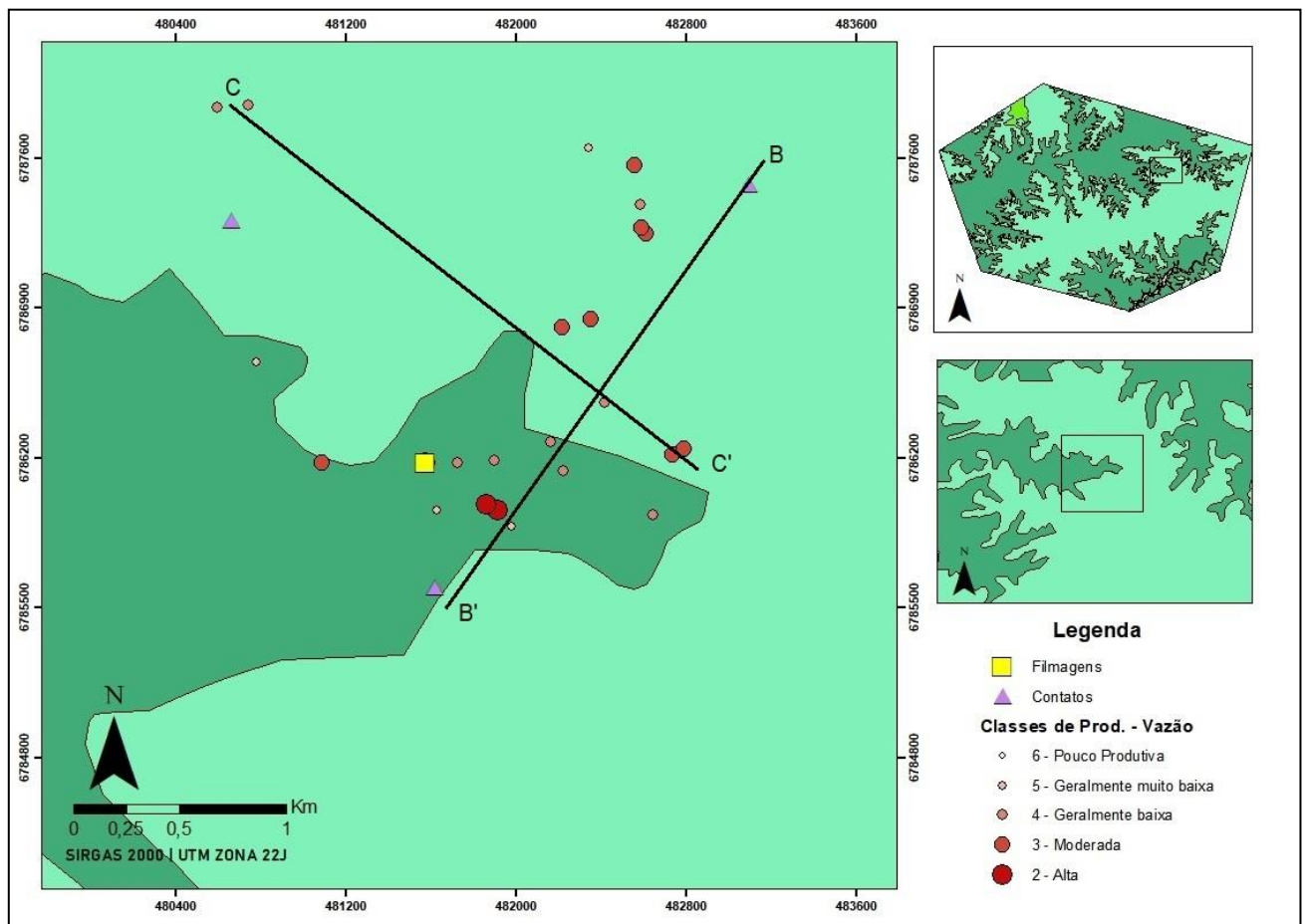
Tabela 11 - Dados construtivos e hidrodinâmicos dos poços utilizados no perfil A-A''

Poço	Profundidade (m)	EA (m)	Vazão (m ³ /h)	q (m ³ /h/m)
4300025373	114	93; 98	38	1.004
4300010678	133	25; 70; 92; 105	14	0.607
4300002881	71	19; 23; 53	41	1.593
4300025073	80		3,4	0.264
4300025074	124	30; 78; 112	31	0.433
4300026081	48	14	2	

Fonte: elaborado pela autora com dados retirados do SIAGAS

A segunda região analisada, localizada no município de Flores da Cunha, liga afloramentos observados em campo e poços com vazão maior que 20 m³/h. Em relação à área anterior, está localizada em maiores altitudes, com poços alcançando entre os 500 e 800m (Figura 54). Apesar do Mapa Geológico apresentar o contato em superfície entre as formações, essa relação não foi encontrada nos afloramentos de campo e sua ocorrência foi inferida apenas aos 550m de altitude, sotoposta pelos derrames ácidos.

Figura 54 - Análise de detalhe em área no município de Flores da Cunha



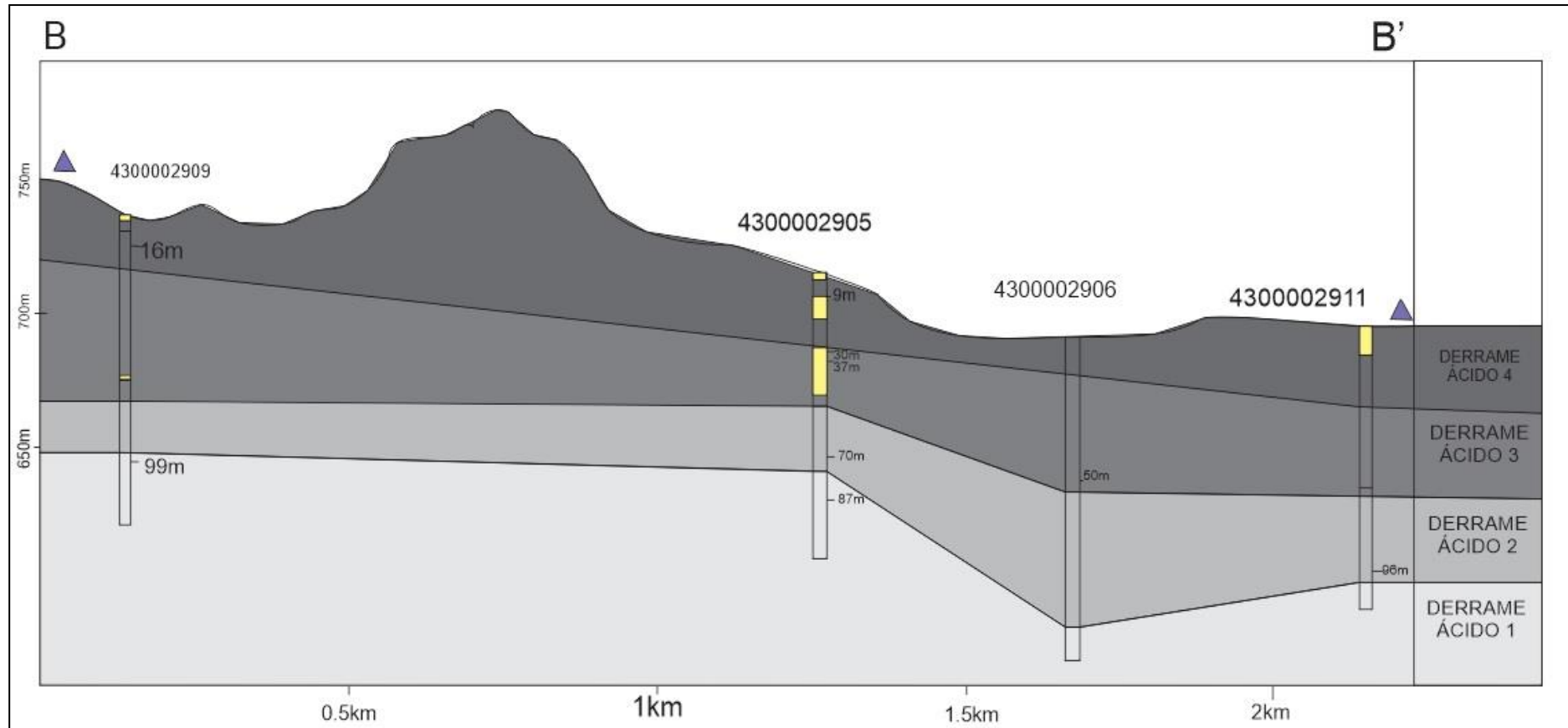
Fonte: Elaborado pela autora a partir de Wildner et al., 2008

Nos poços do perfil B-B', apesar dos perfis geológicos disponíveis no SIAGAS não descreverem rochas ácidas, os afloramentos observados em campo e a altitude de ocorrência indicam que os poços perfuram apenas rochas da Fm Palmas/Caxias (Figura 55).

No perfil C-C', que corta perpendicularmente o perfil anterior e passa pelo mesmo poço 4300002905, são descritas apenas camadas de riolitos no perfil construtivo de todos os poços, entretanto é esperado um derrame básico no final da perfuração do poço 4300026239 (Figura 56).

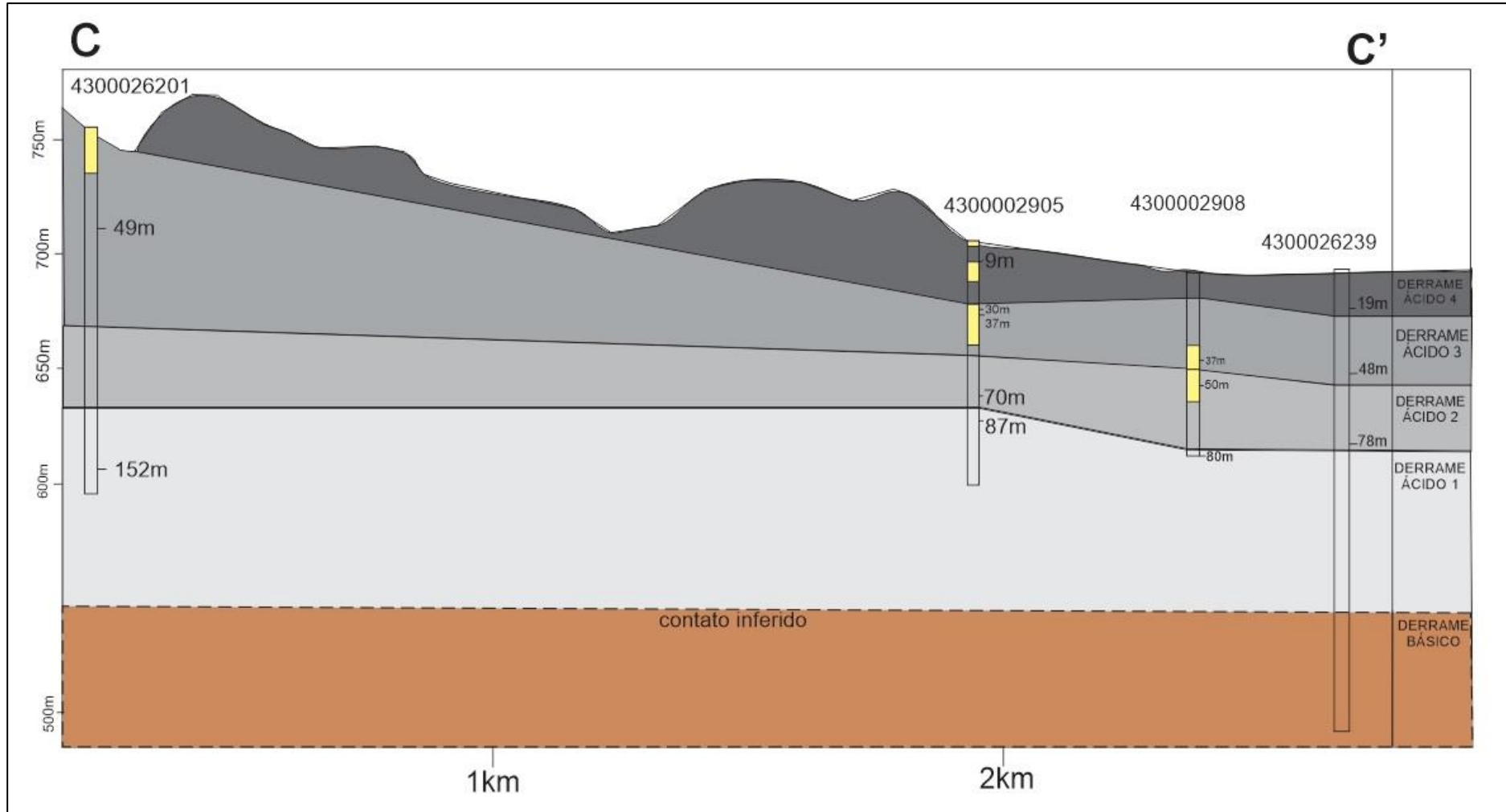
Dessa forma, a correlação permitiu identificar 4 derrames ácidos e finas camadas de brechas vulcânicas, além de uma camada básica inferida aos 550m de altitude. Observou-se ainda a altitude de ocorrência das entradas de água predominantemente entre 600-700m.

Figura 55 – Seção geológica obtida através do perfil B-B', no município de Flores da Cunha



Fonte: Elaborado pela autora através do software CorelDRAW

Figura 56 - Seção geológica obtida através do perfil C-C', no município de Flores da Cunha



Fonte: Elaborado pela autora através do software CoreIDRAW

O poço de maior vazão, com 56m³/h (4300002911), possui 108m e apenas uma entrada de água localizada ao fim da perfuração, aos 96m, próxima a estrutura de contato entre os derrames ácidos 1 e 2. Na mesma zona de contato, próximo aos 650m e entre os derrames 1 e 2, os poços 4300002909 (30 m³/h), 4300002908 (40 m³/h) e 4300002905 (24 m³/h) também apresentam entradas de água (Tabela 12 e Tabela 13). Dessa forma, esse contato demonstra ser uma estrutura importante para a alta produtividade dos poços da região.

A vazão também varia com a presença das brechas basálticas, sendo que os poços que não possuem entradas nessas camadas, 4300026201 e 4300026239, são os de menores vazão da área.

Tabela 12 – Dados construtivos e hidrodinâmicos dos poços utilizados no perfil B-B'

Poço	Profundidade (m)	EA (m)	Vazão (m ³ /h)	q (m ³ /h/m)
4300002909	120	16; 99	30	1,407
4300002905	106	9; 29; 37; 73; 87	24	0,973
4300002906	117	50	20	0,256
4300002911	108	96	56	2,48

Fonte: elaborado pela autora com dados retirados do SIAGAS

Tabela 13 - Dados construtivos e hidrodinâmicos dos poços utilizados no perfil C-C'

Poço	Profundidade (m)	EA (m)	Vazão (m ³ /h)	q (m ³ /h/m)
4300026201	160	49; 152	14,3	0,297
4300002905	106	9; 29; 37; 73; 87	24	0,973
4300002908	80	37; 50; 80	45	1,27
4300026239	200	19; 46; 78	10	1,61

Fonte: elaborado pela autora com dados retirados do SIAGAS

As análises detalhadas sugerem que as duas regiões possuem estruturas principais de contato que influenciam no controle da produtividade. Na primeira área, entre os municípios de Carlos Barbosa e Garibaldi, o contato entre as formações Gramado e Palmas/Caxias abriga as entradas de água dos poços de maior vazão. Paralelamente, os poços que não atingem essa estrutura, localizada próximo as 600m de altitude, são os mesmos que possuem baixa vazão, referentes a Classe 5 de produtividade.

Já na região de Flores da Cunha, o contato entre os derrames ácidos 1 e 2 atua como estrutura condicionante, onde estão localizadas as entradas dos poços mais produtivos, aos 650m. Além das estruturas principais, os demais contatos e a presença das camadas de brechas basálticas possuem também influência na produtividade dos poços.

7. CONCLUSÕES

Na área de estudo ocorrem as formações Gramado e Palmas/Caxias, referentes ao registro magmático básico e ácido do Grupo Serra Geral. As rochas básicas caracterizam-se por basaltos escuros, de topo e base afanítica e vesiculada, com estrutura interna maciça. O pacote ácido, geralmente riolítico, representa a unidade vulcânica mais nova na região, de coloração cinza quando são e de tons avermelhados quando alterados.

Identificou-se a ocorrência da Formação Palmas/Caxias em altitudes superiores a 539m, e da Formação Gramado em altitudes menores que 502m. O contato entre os derrames básicos ocorre com topo e derrame preservado, em fluxos laminares, a qual diferencia-se do contato entre derrames ácidos, marcado por uma estrutura erosiva. Já a zona de contato entre as formações concentra-se em altitudes entre 500 e 600m, através de uma importante zona de erosão, geralmente maior que 1m, e marcada por um topo básico escoriáceo sotoposto por derrame ácido de fluxo horizontal. As zonas de aberturas variam de tamanho milimétricas, observadas nas filmagens dos poços, até aproximadamente 2 metros, identificadas nos afloramentos de campo.

O aquífero fraturado do Sistema Aquífero Serra Geral, localizado nos derrames das rochas do Grupo Serra Geral e condicionado prioritariamente pela tectônica desses derrames, foi caracterizado através de 1379 poços localizados em 21 municípios da região. Os poços, localizados geralmente entre os 500 e 700m de altitude, possuem profundidades média de 127m e nível estático médio de 22m.

A maior parte dos poços possui de 1 a 3 entradas da água, localizadas entre 50 e 100 metros de profundidade, em zonas fraturadas, alteradas e geralmente próximas a estruturas de contato. As entradas identificadas ainda se concentram em uma faixa de 600 e 700m de altitude.

As filmagens dos poços indicam que as entradas ocorrem com predomínio nas zonas fraturadas dos derrames, e que os contatos entre derrames podem não apresentar fluxo de água. Entretanto, quando ocorrem, apresentam aberturas maiores, favorecendo a percolação.

Os parâmetros hidrodinâmicos principais refletem o comportamento esperado de um aquífero fraturado, com transmissividade comum entre 0 e 0,1 m²/h, capacidade específica entre 0 e 0,5 m³/h/m e vazão que varia entre 1 a 20 m³/h. Observou-se que

os poços que atravessam o contato entre a Fm Gramado e a Fm Palmas/Caxias apresentam vazão média maior quando comparada aos poços restritos a apenas uma formação. Da mesma forma, o poço de maior vazão da área estudada, possui duas entradas de água na estrutura de contato entre as formações.

Quanto as Classes de produtividade, a maior parte dos poços pertencem a Classe 5, mas a média de ambos parâmetros classificam em Classe 4, referente a “Geralmente baixa, porém localmente moderada”. As faixas de altitude onde se concentram as zonas de contato, entre 550 e 650m, é a mesma faixa das zonas mais produtivas dos poços, e também onde estão localizadas as entradas de água dos poços de alta vazão e alta capacidade específica.

Ao analisar a distribuição geográfica da produtividade dos poços em mapas geológicos, observou-se duas regiões com predomínio de Classes 1 e 2, as quais se referem aos poços mais produtivos. As seções geológicas desses perfis de detalhe indicaram que as regiões possuem estruturas principais que condicionam a ocorrência do aquífero e a produtividade local, sendo elas o contato entre as formações Gramado e Palmas/Caxias, e o contato entre duas camadas ácidas. Ambas estruturas abrigam importantes entradas de água para os poços de maior vazão, e quando não alcançadas, refletem poços pouco produtivos.

Por fim, conclui-se que o contato entre derrames atua como condicionante da produtividade dos poços, gerando novos caminhos de percolação de água e indicando ser aberturas mais produtivas que as fraturas comuns. Entende-se que, apesar da tectônica ser o principal fator condicionante, outros fatores como o contato entre derrames, devem ser levados em consideração ao analisar a ocorrência e a produtividade de um aquífero fraturado.

Ressalta-se ainda que a altitude entre 550 e 650m é a zona mais produtiva, a qual pode auxiliar na melhor escolha para locação e perfuração de novos poços tubulares, juntamente com a análise da tectônica da região.

Sugere-se que levantamentos mais detalhados, como perfilagens geofísicas óticas e acústicas devem ser realizadas afim de caracterizar e entender melhor as entradas de água e o papel dos contatos entre derrames.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA Agência NACIONAL DE ÁGUAS. 2007. Disponibilidade e demanda de recursos hídricos no Brasil. Cadernos de Recursos Hídricos, Brasília.

ANA, Agência Nacional de Águas. 2005. Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil. Brasília.

ATHAYDE, G.B. 2013. Compartimentação hidroestrutural do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) no estado do Paraná, Brasil. Curitiba, 177p. Tese de Doutorado. Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

ATHAYDE, G. B., & ATHAYDE, C. de V. M. (2016). Hidrogeologia do sistema aquífero serra geral no Estado do Paraná. *Águas Subterrâneas*, 29(3), 315–333. <https://doi.org/10.14295/ras.v29i3.28406>

BETIOLLO, L. M. 2006. Caracterização estrutural, hidrogeológica e hidroquímica dos sistemas aquíferos Guarani e Serra Geral no nordeste do Rio Grande do Sul, Brasil. Porto Alegre, 117p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BONGIOLO, A. B. S.; FERREIRA, F. J. F; BITTENCOURT, A. V. L.; SALAMUNI, E. 2014. Connectivity and Magnetic-Structural Compartmentalization of the Serra Geral and Guarani Aquifer Systems in Central State of Paraná (Paraná Basin, Brazil). *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 32, n. 1, p. 141-160.

BORTOLIN, T. A. 2014. Padrões hidroquímicos e isotópicos do sistema aquífero serra geral do Município de Carlos Barbosa, região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. 2014. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BORTOLIN, T. A. 2014. Padrões Hidroquímicos e Isotópicos do Sistema Aquífero Serra Geral no Município de Carlos Barbosa, Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. IPH-UFRGS. Porto Alegre-RS, 119p.

CAS, R. A. F.; WRIGHT J. V. 1997. Volcanic successions: modern and ancient. London, Allen & Unwin.

CELLIGOI, A. 1993. Recursos hídricos subterrâneos da formação Serra Geral em Londrina – PR. 2005. 108 f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo – USP, São Paulo.

CELLIGOI, A.; DUARTE, U. 1997 Hidrogeologia da formação Serra Geral em Londrina – PR. Boletim Paranaense de Geociências. n. 45, p. 117-132.

CURTI, Daiana Katya. 2011. Tipologia e origem das fraturas sub-horizontais em basaltos da Formação Serral Geral, Brasil. Dissertação (Mestrados em Geotectônica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. doi: 10.11606/D.44.2011.tde-16082011-164931. Acesso em: 2021-10-14.

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica. 1982. Estudo de Águas Subterrâneas – Região Administrativa 4-Sorocaba. Secretaria dos Serviços e Obras Públicas/DAEE, São Paulo, 2v

DINIZ, J.A.O. 2012. Proposta Metodológica para Elaboração de Mapas Hidrogeológicos. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. (publicação interna)

DINIZ, J.A.O., Monteiro, A.B., Silva, R.C., Paula, T.L.F. 2014. Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo: Nota técnica. 48p. CPRM – Serviço Geológico do Brasil.

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

DUUNE W.M. & HANCOCK P.P. 1994. Paleostress analysis of small-scale brittle structures. In: Hancock, P.L. (ed) Continental deformation. Pergamon Press, Oxford New York, p. 101-120.

ELSENBRUCH, D. S. 2017. Relação dos condicionamentos geológicos com a produtividade dos poços do Sistema Aquífero Serra Geral na região nordeste do Rio Grande do Sul. São Leopoldo. 62p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geologia, Área de Concentração em Geologia Sedimentar, Linha de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Modelagem Geológica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

FEITOSA, F. A. C., & MANOEL FILHO, J. 2000. Hidrogeologia: Conceitos e aplicações (2. ed.). Recife: CPRM.

FERNANDES, A.J. 1997. Tectônica cenozóica na porção média da bacia do rio Piracicaba e sua aplicação à hidrogeologia de meios fraturados. São Paulo, 244p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

FERNANDES, A. J. 2008. Aquíferos Fraturados: uma Revisão dos Condicionantes Geológicos e dos Métodos de Investigação. Revista do Instituto Geológico, v. 29, p. 49-72,.

FERNANDES, A.J. 2006. Fatores que influenciam a produção de poços em aquíferos fraturados cristalinos e métodos de investigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2006, Curitiba, ABAS.

FERNANDES, A.J. ROULEAU, A. 2008. Simulação de deslocamentos em fraturas de basaltos da Formação Serra Geral (Ribeirão Preto, SP) e implicações para a sua transmissividade. In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15, Natal.

FERNANDES, A.J., MALDANER C., AZEVEDO SOBRINHO, J.M., PRESSINOTTI M.M.N., WAHNFRIED, I. 2010. Estratigrafia dos derrames de basaltos da Formação Serra Geral (Ribeirão Preto – SP) baseada na geologia física, petrografia e geoquímica. Revista do Instituto de Geociências – USP. Geologia USP Séries Científica, 10: 73-99.

FERNANDES, A. J. 2008. Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, v. 29, n. 1/2, p. 49-72.

FINK, Jonathan H., POLLARD, David D. 1983 Structural evidence for dikes beneath silicic domes, Medicine Lake Highland Volcano, California. Geology, 11 (8). 458pp.

FRANK, H. T.; GOMES, M. E. B.; FORMOSO, M. L. L. 2009. Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Paraná Basin, South America. Pesquisas em Geociências, v. 36, n. 1, p. 49-57,.

FREITAS, M. A. de., CAYE, B. R., MACHADO, J. L. F. 2002. (Orgs.). Projeto Oeste de Santa Catarina: Diagnóstico dos recursos hídricos subterrâneos do oeste do Estado de Santa Catarina. Porto Alegre: CPRM/SDM-SC/SDASC/EPAGRI.

FREITAS, M. A.; BINOTTO, R. B.; NANNI, A. S.; RODRIGUES, A. L. M.; BORTOLI, C. R. 2012. Avaliação do Potencial Hidrogeológico, Vulnerabilidade Intrínseca e Hidroquímica do Sistemas Aquífero Serra Geral no Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 17, n. 2, p. 31-41,.

FREITAS, M.A. de; Roisenberg, A.; Andriotti, J.L.S. 2016. Análise exploratória de dados da condutividade elétrica nas águas do sistema aquífero Serra Geral no Rio

Grande do Sul e Santa Catarina. *Águas Subterrâneas*, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 1-17, 16 mar.

FRENZEL, M.G. 2017. Caracterização hidrogeológica do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) na região de Garibaldi, RS. Porto Alegre, 98p. Monografia de Conclusão de curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

FRENZEL, M.G. & REGINATO, P.A.R. 2018. Caracterização Hidrogeológica do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) na região de Garibaldi, RS. In: Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, 6., 2018. Bento Gonçalves. Anais.

GUIDICINI G. 1979. Juntas Horizontais de grande continuidade em derrames basálticos da Bacia do Paraná. In: II Simpósio Regional de Geologia, Rio Claro, SBG, Atas, vol. 2, p. 13-21.

GUIDICINI G., CAMPOS J.O. 1968. Notas sobre a morfogênese dos derrames basálticos. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 17: 15-28.

HAUSMAN, A. 1974. Aspectos hidrogeológicos dos aquíferos fissurados no sul da Bacia do Paraná. *Revista Água Subterrânea*. São Paulo, v.1(4): 44-60,.

HAUSMAN, A. 1995. Províncias Hidrogeológicas do Estado do Rio Grande do Sul, RS. *Acta Geologica Leopoldensia (Série Mapas)*, São Leopoldo, v. 2, p. 1-127,.

HAUSMAN, A. 1996. Comportamento do freático nas áreas basálticas do Rio Grande do Sul. *Boletim Paranaense de Geografia*, v 18, n. 20, p. 177-215.

HOLLAND, M.; WITTHÜSER, K. T. 2011. Evaluation of geologic and geomorphologic influences on borehole productivity in crystalline bedrock aquifers of Limpopo Province, South Africa. *Hydrogeology Journal*. v. 19, p. 1065-1083,.

HON, K.; KAUAHIKUA, J. DENLINGER, R.; MACKAY, K. 1994. Emplacement and inflation of pahoehoe sheet flows: Observations and measurements of active lava flows on Kilauea Volcano, Hawaii. *Geol. Soc. Am. Bull.* 106, p. 351-370,.

KASSUNE, Mukrab., TAFESSE, Nata., HAGOS, Miruts. 2018. Characteristics and Productivity of Volcanic Rock Aquifers in Kola Diba Well Field, North-central Ethiopia. *Universal Journal of Geoscience*. 6. 103-113. 10.13189/ujg.2018.060401.

LASTORIA G., SINELLI O., KIANG C.H., HUTCHEON I., PARANHOS FILHO A.C., GASTMANS D. 2006. Hidrogeologia da Formação Serra Geral no Estado do Mato Grosso do Sul. *Águas Subterrâneas*, 20: 139-150.

LASTORIA, G. Hidrogeologia da Formação Serra Geral no Estado de Mato Grosso do Sul. Rio Claro. 2002. 133 p. Tese (Doutoramento em Geociências e Meio

Ambiente). Instituto de Geociências e Ciências Exatas – IGCE – UNESP – Rio Claro, 2002

LAWN, B.R. & WILSHAW, T.R. 1975. Fracture of brittle solids. Cambridge Press University, 204p.

LEINZ V. 1949. Contribuição à geologia dos derrames basálticos do sul do Brasil. Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo, 5: 1-61.

LIMA, E.V., PHILIPP, R.P., RIZZON, G.C., WAICHEL, B.L. & ROSSETI, L.M.M. 2012. Sucessões vulcânicas, modelo de alimentação e geração de domos de lava ácidos da Formação Serra Geral na região de São Marcos-Antônio Prado (RS). Revista do Instituto de Geociências – USP, 12(2): 49-64.

LIMA, E. F. D. et al. 2012. Sucessões vulcânicas, modelo de alimentação e geração de domos de lava ácidos da Formação Serra Geral na região de São Marcos-Antônio Prado (RS). Geologia USP – Série Científica, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 49-64,.

LISBOA, N. A. 1993. Compartimentação Hidrogeológica e Diferenciação Hidrogeoquímica em Aquíferos do Extremo Sul do Planalto Meridional do Rio Grande do Sul. In: 10º Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Gramado, 1993. Anais, p. 539-548.

LISBOA, N. A. 1996. Fácies, estratificações hidrogeoquímicas e seus controladores geológicos, em unidades hidrogeológicas do sistema aquífero Serra Geral, na bacia do Paraná, Rio Grande do Sul. 1996. 135 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre,.

LYLE P. (ed.) 2005. A geological excursion guide to the Causeway Coast. Environment and Heritage Service, Department of the Environment, 2º ed.

MACDONALD, G. A. 1953. Pahoehoe, aa and block lava. Am. J. Sci. 251, p. 169.

MACHADO, J. L. F.; DE FREITAS, M.A. 2005. Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul. Rio de Janeiro: CPRM, 2005, 1 mapa, col. Escala 1:750.000.

MATOS, A.B. 2020. Compartimentação estrutural e interações hidrogeológicas entre o Sistema Aquífero Guarani e Serra Geral na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 191p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MELFI, A. J.; PICCIRILLO, E. M.; NARDY, A. J. R. 1988. Geological and magmatic aspects of the Paraná Basin an introduction. In: Piccirillo E. M., Melfi A. J. (eds.) The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects. IAG-USP, p. 1-13,.

MILANI, E.J., MELO, J.H.G., SOUZA, P.A., FERNANDES, L.A., FRANÇA, A.B. 2007. Bacia do Paraná. Boletim de Geociências da Petrobrás, v. 15, n. 2, p. 265-287

MILANI, E.J. 1997. Evolução Tectôno-Estratigráfica da Bacia do Paraná e seu Relacionamento com a Geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul Ocidental. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

MORIN, R.H. & SAVAGE, W.Z. 2003. Effects of crustal stresses on fluid transport in fractured rock: case studies from northeastern and southwestern USA. Hydrogeology Journal, 11:100-112

NANNI, A. S. 2008. O Flúor em Águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul: origem e condicionamento geológico. 2008. 127 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre,.

NARDY, A. J. R.; MACHADO, F. B.; OLIVEIRA, M. A. F. 2008. As rochas vulcânicas mesozoicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas. Revista Brasileira de Geociências, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 178-195,.

PETERLINI, G., PINESE, J. P. P., &CELLIGOI, A. 2020. Fatores geológicos e pedológicos que influenciam na produtividade hídrica do sistema aquífero serra geral (sasg) na região norte do estado do Paraná. Caminhos de Geografia, 21(78), 173-191.

PACHECO, A.R. 2019. Caracterização Hidrogeológica do município de Nova Petropolis. Porto Alegre, 107p. Monografia de Conclusão de curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PEATE, D.W; HAWKESWORTH, C.J; MANTOVANI, M.S.M. 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. Bulletin of Volcanology: v. 55, n. 12, p. 119-130, dez. 1992.

REBOUÇAS A.C. 1978. Potencialidades hidrogeológicas dos basaltos da Bacia do Paraná no Brasil. In: XX Congresso Brasileiro de Geologia, Recife. Anais, vol. 6, p. 2963-2976.

REBOUÇAS, A.C. & Fraga, C.G. 1988. Hidrogeologia das rochas vulcânicas do Brasil. Revista de Águas Subterrâneas, 12:29-55.

REGINATO, P.A.R. 2003. Integração de dados geológicos para prospecção de aquíferos fraturados em trecho da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas (RS). Porto Alegre, 254p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

REGINATO, P. A. R.; STRIEDER, A. J. 2004. Caracterização hidrogeológica e potencialidades dos aquíferos fraturados da Formação Serra Geral na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Cuiabá,.

REGINATO, P.A.R.; STRIEDER, A.J. 2006. Integração de Dados Geológicos na Prospecção de Aquíferos Fraturados na Formação Serra Geral. Águas Subterrâneas – Revista da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. 20(1):1-14, junho de 2006.

REGINATO, P. A. R.; STRIEDER, A. J. 2005. Caracterização hidrogeológica dos recursos hídricos subterrâneos da Formação Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL, 1., 2005, Santa Maria. Anais... Porto Alegre.

REGINATO, P. A. R.; FINOTTI, A. R; MICHELON, C. 2007. Comportamento Hidrogeológico de Poços Tubulares Associados a Estruturas Primárias da Rochas Vulcânicas da Formação Serra Geral. In: Anais do XV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços e I Simpósio de Hidrogeologia do Sul. Gramado-RS.

REGINATO, P. A. R.; AHLERT, S.; GILIOLI, K. C. 2010. Hidrodinâmica de Diferentes Aquíferos Fraturados Associados à Formação Serra Geral na Região Nordeste do estado do Rio Grande do Sul. In: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, São Luís-MA. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas,.

REGINATO, P. A. R., LEÃO, M. I., BORTOLIN, T. A., DUTRA, T. O., ATHAYDE, G. B. &ATHAYDE, C. V. M. 2015. Circulação da Agua Subterrânea nas Rochas Vulcânicas da Formação Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grandedo Sul. In: Congresso Brasileiro De Geologia De Engenharia E Ambiental, 15.,Bento Gonçalves, 2015. Anais. Bento Gonçalves.

ROSA FILHO, E. F. da. Contribuição ao estado atual do conhecimento sobre o sistema Aquífero Guarani. 2004. In: OFICINA TÉCNICA, 2004, Curitiba. Estado atual do conhecimento sobre o sistema Aquífero Guarani: UFPR/LPH,.

SCHERER, C. M. S. Análise estratigráfica e litofaciológica da Formação Botucatu (Eocretáceo da Bacia do Paraná) no Rio Grande do Sul. 1998. 224 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre,.

SCHERER, C. M. S. 2002. Preservation of aeolian genetic units by lava flows in the Lower Cretaceous of the Paraná Basin, southern Brazil. *Sedimentology*, v.49, p. 97-116,.

SCHMINCKE, H. U. 2004. *Volcanism*. Berlin, Springer-Verlag.

STRUCKMEIER, Wilhelm F.; MARGAT, Jean. 1995. *Hydrogeological Maps A Guide and a Standard Legend*. Hannover: International Association of Hydrogeologists, (International contributions to hydrogeology, v. 17).

SPRY, A.H. 1962. The origin of columnar jointing, particularly, in basalt flows. *Journal of the Geological Society of Australia*, 8: 191-216.

TREVISAN, C. & REGINATO, P. A. R. 2019. Análise e Caracterização Hidrogeológica das Unidades Vulcânicas Gramado e Palmas/Caxias(RS). In: Simpósio Nacional De Estudos Tectônicos, XI International Sympo-SiumonTectonics E XI Simpósio Sul-Brasileiro De Geologia. 17., Bento Gonçalves, 2019. Anais. Bento Gonçalves.

WHITE, I.C. 1908. Comissão de Estudos de Minas de Carvão de Pedra do Brasil. Rio de Janeiro, DNPM, Relatório final, 617 p

WILDNER, W. 2014. Mapa geológico do estado de Santa Catarina. Porto Alegre: CPRM, 2014. (Orgs.) Escala 1:500.000. Programa Geologia do Brasil. Subprograma de Cartografia Geológica Regional.

WILDNER, W.; ORLANDI FILHO, V.; GIFFONI, L.E. 2006. Itaimbezinho e Fortaleza, RS e SC - Magníficos Cânions Esculpidos nas Escarpas Aparados da Serra do Planalto Vulcânico da Bacia do Paraná. In: WINGE, M. et al. (Ed.). *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*,.

WILDNER, W. et al. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Rio de Janeiro: CPRM, 2008, 1 mapa, col. Escala 1:750.000.

ZALÁN, P.V., WOLFF, S., CONCEIÇÃO, J.C.J., ASTOLDI, M.A.M., VIEIRA, I.S., APPI, V.T., ZANOTTO, O.A. 1987. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. *Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia*, v. 3, n. 1987, p. 441-477, 1987.