

Artigos

O contato entre derrames vulcânicos como condicionante da ocorrência e da produtividade de aquíferos fraturados

The contact between magma flows as a conditioning of the occurrence and productivity of fractured aquifers

Amanda Sanferari¹; Pedro Antonio Roehe Reginato¹; Sofia Dalmaz Quillfeldt¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS

✉ amandasanfe@gmail.com, pedro.reginato@ufrgs.br, sofidq@yahoo.com.br

Palavras-chave:

Aquífero fraturado;
Condicionante de aquíferos;
Contato entre derrames.

Resumo

Sistema Aquífero Serra Geral, fraturado e de potencial hídrico intensamente variado, representa o principal reservatório subterrâneo do nordeste do estado do Rio Grande do Sul e é controlado principalmente pelo sistema estrutural das rochas, através da ocorrência de fraturas e zonas de fraturas. Com isso, 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. A pesquisa decorre de um levantamento de dados iniciais, obtidos a partir das informações cedidas pela CORSAN, SIAGAS e dados coletados em campo. Com essas informações, e através de descrições, análises estatísticas e gráficos, foi caracterizada a geologia e hidrogeologia do polígono de estudo. Os resultados permitiram descrever a Formação Gramado como predominante na região, composta por rochas basálticas, com estruturas de contato que não exibem 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 e localizados em altitudes superiores, geralmente acima dos 539 m. A avaliação da produtividade foi realizada com base na análise dos parâmetros capacidade específica e vazão. O contato entre as formações é marcado pela sobreposição das rochas ácidas através de uma estrutura erosiva e bem definida, preferencialmente localizada entre 500 e 550 m. A avaliação hidrogeológica identificou que poços com entradas de água em altitudes menores que 550 m, possivelmente cruzando a zona de contato entre estas formações, apresentaram maior vazão média que poços associados exclusivamente às rochas da Formação Palmas/Caxias, localizados acima dos 550 m. Quanto a produtividade, os parâmetros indicam classes mais produtivas quando as entradas de água estão localizadas entre 550 e 650 m de altitude. Da mesma forma, entradas de água em poços de alta vazão (maiores que 25 m³/h) ocorrem entre 600 e 650 m, e poços que não alcançam zonas de contato entre derrames possuem vazões inferiores ou são improdutivo. Por fim, a avaliação das áreas mais produtivas, através da análise de seções geológicas, indicou que as estruturas de contato estão associadas a entradas de água nos poços, tendo influência na circulação da água e produtividade dos poços.

Keywords:

Fractured aquifers;
Aquifer conditioning;
Contact between magma flows.

Revisão por pares.
Recebido em: 14/05/2022.
Aprovado em: 26/07/2022.

Abstract

The Serra Geral Aquifer System, fractured and of intensely varied water potential, represents the main underground reservoir in the northeast of the state of Rio Grande do Sul, and is mainly controlled by the structural system of the rocks, through the occurrence of fractures and fracture zones. For this, the objective of this work is to evaluate the contact between magma flow as possible conditioning of fractured aquifers and its influence on the productivity of wells. The research stems from an initial data collection, supplied by information provided by CORSAN, SIAGAS, and data collected in the field. With this information, and thorough descriptions, statistical analysis, and graphics, the geology and hydrogeology of the study polygon were characterized. The results allowed us to describe the Gramado Formation as predominantly in the region, composed of basaltic rocks, with contact structures that do not exhibit accentuated erosion, keeping the top preserved. The Palmas/Caxias Formation is distinguished by being composed of acidic rocks, with irregular surface contacts caused by an erosive structure and located at higher altitudes, generally above 539 m. The productivity evaluation was carried out based on the analysis of the specific capacity and flow parameters. The contact between the formations is marked by the overlapping of acidic rocks through an erosive and well-defined structure, preferably located between 500 and 550 m. The hydrogeological assessment identified that wells with water inflows at altitudes lower than 550 m, possibly crossing the contact zone between formations, had a higher average than wells associated exclusively with the rocks of the Palmas/Caxias Formation, located above 550 m. As for productivity, the parameters indicated classes that are more productive when the water inlets are located between 550 and 650 m of altitude. Likewise, water inflows into high flow wells (greater than 25 m³/h) occur between 600 and 650 m, and wells that do not reach contact zones between spills have 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 are associated with water inflows into the wells, influencing the water circulation and productivity of the wells.

DOI: <http://doi.org/10.14295/ras.v36i2.30137>

1. INTRODUÇÃO

A água subterrânea é um recurso de grande importância no desenvolvimento econômico da sociedade, principalmente como alternativa hídrica em momentos de crises de estiagem ou quando as águas superficiais se encontram contaminadas. Os reservatórios subterrâneos, conforme destaca a Agência Nacional de Águas (ANA), são fundamentais no abastecimento público e privado em inúmeras cidades brasileiras, entretanto, essa importância é diretamente contrastada com a deficiência no conhecimento dos reservatórios subterrâneos no país (ANA, 2005).

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

Os sistemas aquíferos são condicionados por um conjunto de fatores físicos, geológicos e estruturais que exercem influência 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. Além dela, outros 5 elementos são considerados importantes: lineamentos, manto inconsolidado, compartimento topográfico, litologia e profundidade do aquífero (FERNANDES, 2008).

Quando se trata de aquíferos fraturados, estes apresentam diferenças importantes de outros tipos de aquíferos, demandando que se tenham conhecimentos adequados e se empreguem técnicas específicas para um gerenciamento eficiente. Destaca-se 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 (HOLLAND; WITTHUSER, 2011).

Recentemente, estudos permitiram observar 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 (NANNI, 2008; ELSENBURCH, 2017).

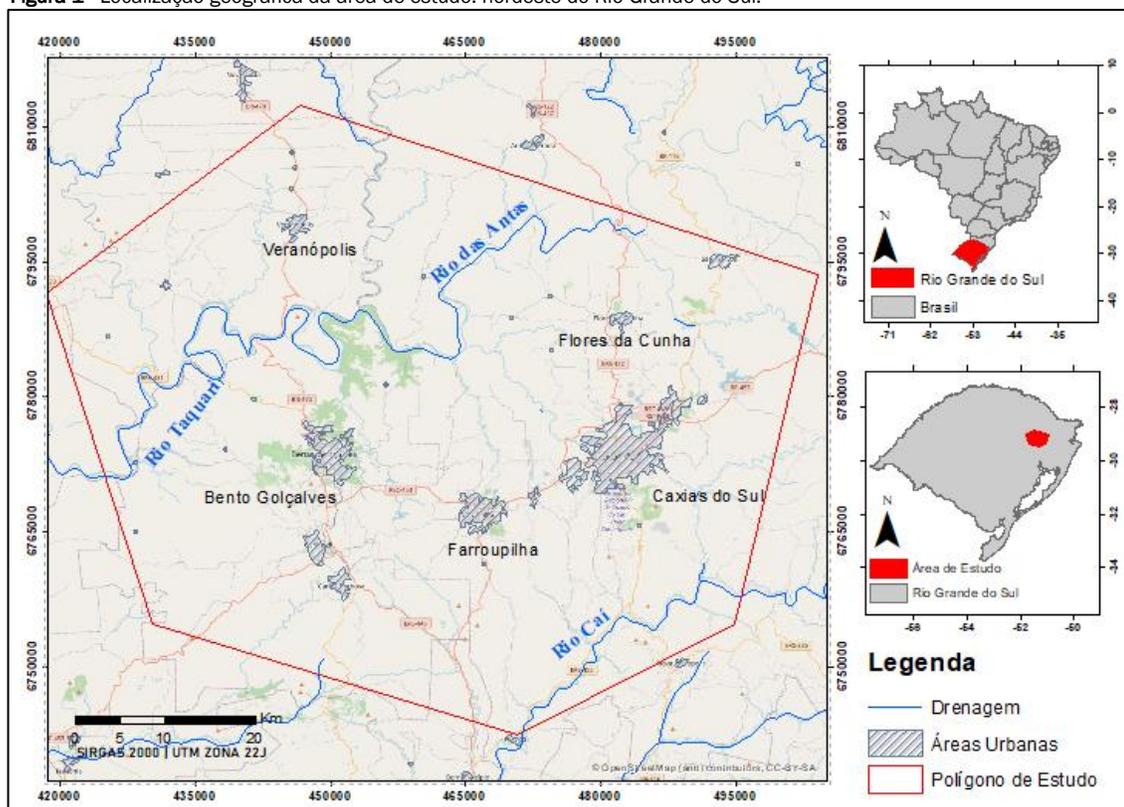
Em geral, aquíferos fraturados são menos produtivos que aquíferos porosos, mas ainda assim, possuem função estratégica relevante para o abastecimento público (ANA, 2007). No nordeste do estado do Rio Grande do Sul, apesar do Sistema Aquífero Guarani (SAG), de natureza porosa, ser o reservatório mais produtivo, o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), fraturado, é de mais fácil acesso tecnológico e financeiro, e sua água abastece exclusivamente municípios da região.

Segundo Reginato e Strieder (2004), as características hidrodinâmicas do SASG evidenciam um comportamento fortemente anisotrópico e, em função disso o potencial hídrico do aquífero é intensamente variado. Como esses aquíferos são condicionados por diferentes estruturas tectônicas (fraturas, falhas e/ou juntas) e de resfriamento dos derrames (disjunções horizontais e verticais, zonas vesiculares a amigdalóides), os mesmos possuem comportamentos hidrodinâmicos e hidroquímicos diferenciados.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no nordeste do Rio Grande do Sul (RS), sendo um polígono de aproximadamente 4 mil km² que abrange municípios importantes do estado, como Bento Gonçalves e Caxias do Sul (Figura 1). A região está localizada em uma área de altitude variável, entre 300 e 800 m, com relevo dissecado e abundante presença de escarpas.

Figura 1 - Localização geográfica da área de estudo: nordeste do Rio Grande do Sul.



A porção de estudo 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; STRIEDER, 2004).

Quanto a geologia, é formada pelos registros vulcânicos do Grupo Serra Geral, resultado de um intenso magmatismo relacionado aos processos iniciais de distensão e quebra do Gondwana, durante o Cretáceo Inferior, entre 133 a 135 Ma (PINTO *et al.*, 2010). Suas litologias consistem em basicamente três tipos dominantes: o principal, correspondente aos basaltos, e outros dois, representados por rochas de natureza ácida, denominadas de Formação (Fm) Palmas/Caxias e Formação (Fm) Chapecó (NARDY *et al.*, 2008). No polígono de estudo, ocorrem os derrames básicos referentes à Fm Gramado, e os derrames de rochas ácidas, referentes à Fm Palmas/Caxias.

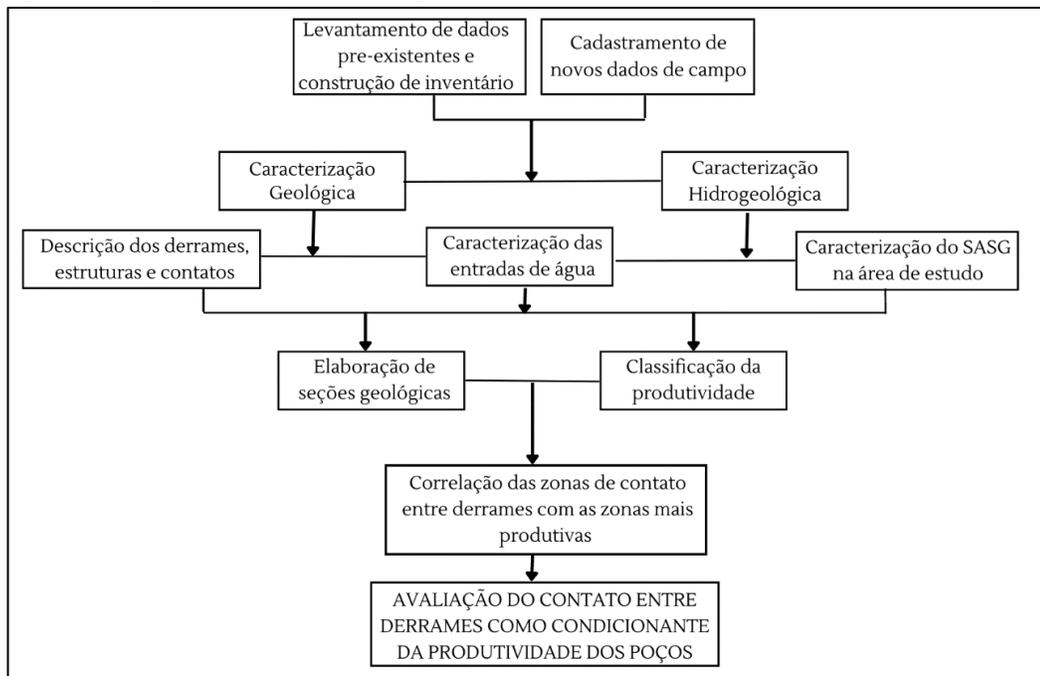
Quanto a hidrogeologia, O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), nessa região, ocorre de duas formas distintas: o livre, localizado no manto de alteração formado sobre as rochas do Grupo Serra Geral, e o fraturado, localizado nas rochas vulcânicas (REGINATO, 2003). O fraturado é associado a estruturas presentes nos derrames, que proporcionam naturalmente um ambiente heterogêneo e anisotrópico para a circulação de água.

Seus diferentes condicionantes ocasionam um comportamento hidráulico de difícil previsão e uma grande variação da potencialidade. As áreas mais produtivas do SASG 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).

3. METODOLOGIA

A pesquisa envolveu uma etapa inicial de cadastramento de dados existentes, que foi complementada com a coleta de novos dados de campo. Essas informações foram processadas a fim de caracterizar a geologia e hidrogeologia da área de estudo. O estudo da circulação da água foi realizado através da caracterização das entradas de água (EA), identificadas em poços tubulares através da descrição de perfis construtivo e de filmagens de poços. Com os dados organizados e interpretados foi analisada a relação dos contatos e das entradas de água, com as zonas mais produtivas do aquífero. O fluxograma abaixo descreve a sequência das etapas (Figura 2).

Figura 2 – Fluxograma de etapas da metodologia aplicada



A primeira etapa consistiu em um levantamento de dados bibliográficos e secundários, que resultou em um inventário de poços tubulares contendo informações de 198 poços cedidas pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), e 1181 poços pelo Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS). O inventário continha informações construtivas, geográficas, e de parâmetros hidrodinâmicos. Na mesma planilha foram adicionados dados de profundidade, quantidade e litologia das entradas de água (EA), também obtidos em descrições do SIAGAS e perfis construtivos da CORSAN. As ocorrências que se apresentavam em possíveis estruturas de contato, como amigdalas, vesículas e brechas, foram individualizadas para identificar possíveis zonas de contato.

A caracterização geológica e hidrogeológica do polígono foi realizada utilizando mapa geológico e hidrogeológico do estado do Rio Grande do Sul (1:750.000) (WILDNER, 2008; MACHADO; FREITAS, 2005) e complementada com relatórios de perfuração de poços e os levantamentos de campo. Esses dados permitiram a caracterização das formações predominantes na área de estudo, diferenciando-as conforme sua litologia, morfologia dos derrames e estruturas de contatos. Os contatos identificados em campo foram organizados em um gráfico de distribuição conforme sua altitude, afim de demonstrar os intervalos principais de ocorrência. Por fim, o gráfico foi correlacionado com as altitudes das entradas de água identificadas nos perfis construtivos de poços, buscando que as sobreposições indicassem possíveis estruturas em comum.

Análises estatísticas e gráficos foram gerados no Microsoft Excel para avaliar o comportamento dos parâmetros hidrodinâmicos conforme variação das altitudes das entradas de água e dos contatos entre derrames. A análise estatística foi feita de acordo com a altitude das entradas de água, individualizando poços que captam água antes e depois dos 550 m, considerando a altitude de contato entre os derrames ácidos e básicos. Inicialmente, as entradas de água foram caracterizadas individualmente, e posteriormente em gráficos, onde foram analisadas conforme sua relação com a variação dos parâmetros.

Na etapa seguinte, todos os resultados previamente obtidos foram integrados a fim de avaliar a relação das estruturas de contato entre derrames com a produtividade dos poços. Para a avaliação da produtividade foi utilizada como base a metodologia proposta por Diniz (2012), que classifica a produtividade em seis classes, de acordo com os intervalos de valores de parâmetros hidrodinâmicos. Para o aquífero em questão, e a partir dos dados coletados para o estudo, foram utilizados apenas os parâmetros de capacidade específica e vazão (Tabela 1), visto que transmissividade não continha dados suficientes para análise e condutividade hidráulica não se aplica aos aquíferos fraturados. Para análise, foram levados em consideração as vazões determinadas em testes após 24 horas de bombeamento, sendo os dados da CORSAN os mais utilizados no estudo, visto que esses são projetados em função dos testes de bombeamento e parâmetros hidrodinâmicos.

Tabela 1 – Distribuição dos valores para as Classes de produtividade de acordo com vazão e capacidade específica

Capacidade Específica (m ³ /h/m)	Vazão (m ³ /h)	Produtividade	Classes
≥ 4,0	≥ 100	Muito alta	1
2 ≤ q < 4	50 ≤ Q < 100	Alta	2
1 ≤ q < 2	25 ≤ Q < 50	Moderada	3
0,4 ≤ q < 1	10 ≤ Q < 25	Geralmente baixa, porém localmente moderada	4
0,04 ≤ q < 0,4	1 ≤ Q < 10	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa	5
< 0,04	< 1	Pouco produtiva ou não aquífera	6

Fonte: modificado de Diniz (2012)

Com a organização e combinação desses dados em mapas cartográficos, gerados no software ArcMap, foram escolhidas áreas pontuais que indicavam maior 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. Para a elaboração dessas seções, foram utilizados o sistema Google Earth e o software gráfico Corel Draw.

4. RESULTADOS

4.1 Avaliação Geológica

As duas principais unidades litológicas identificadas na área de estudo representam o registro magmático do Grupo Serra Geral: Fm Gramado e Fm Palmas/Caxias. A Fm Gramado é dominante em termos de área de exposição, com 2220 km² aflorantes (55% do polígono), composta essencialmente por basaltos, enquanto a Palmas/Caxias (43%) é composta por riolitos e dacitos. O predomínio de rochas ácidas encontra-se em afloramentos situados a altitudes maiores que 539 m, enquanto afloramentos em altitudes menores que 502 m 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 550 m, com algumas ocorrências próximas aos 600 m.

A Fm Gramado, sotoposta às rochas da Fm Palmas/Caxias, apresenta composição basáltica em derrames que possuem espessuras entre 2 e 30 m, apresentando-se geralmente entre 5 e 10 m. O topo do derrame é marcado pela presença de

vesículas e/ou amígdalas milimétricas a centimétricas, com formas arredondadas. 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.

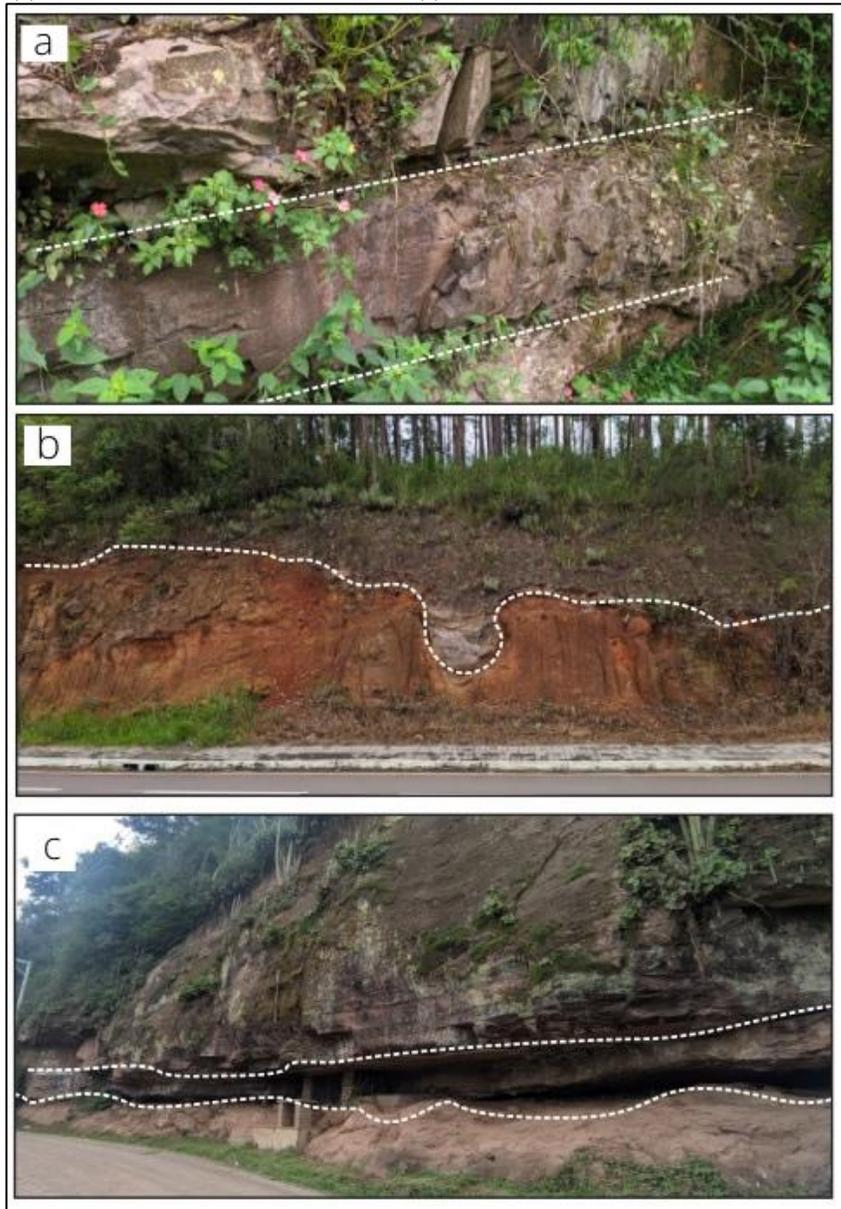
Os pacotes de rochas ácidas referentes a Fm Palmas/Caxias apresentam uma estrutura marcada por disjunções tabulares, sub-horizontais a verticais, maciços na porção central e basal, com dimensões variáveis. Onde há ocorrência de riolitos, a parte central é marcada pelas disjunções horizontais.

4.1.1 Contatos entre derrames

Os contatos identificados antes da etapa de campo foram identificados em perfis geológicos de poços tubulares através de entradas de água que se apresentassem descritas em estruturas típicas em zonas de contatos, como pacotes amigdaloides, vesiculares ou brechas. Já os observados em campo foram registrados conforme sua localização, altitude e morfologia.

Os contatos entre derrames básicos não exibem erosão acentuada, preservando o topo do derrame sotoposto e indicando um fluxo laminar na colocação destes. 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. Ao longo da área estudada, as rochas ácidas da Fm Palmas/Caxias assentam-se diretamente sobre as rochas básicas tipo da Fm Gramado, sendo que o contato entre as unidades se dá por uma importante zona de erosão, nítida e bem destacada, variando entre 500 e 600 m (Figura 3).

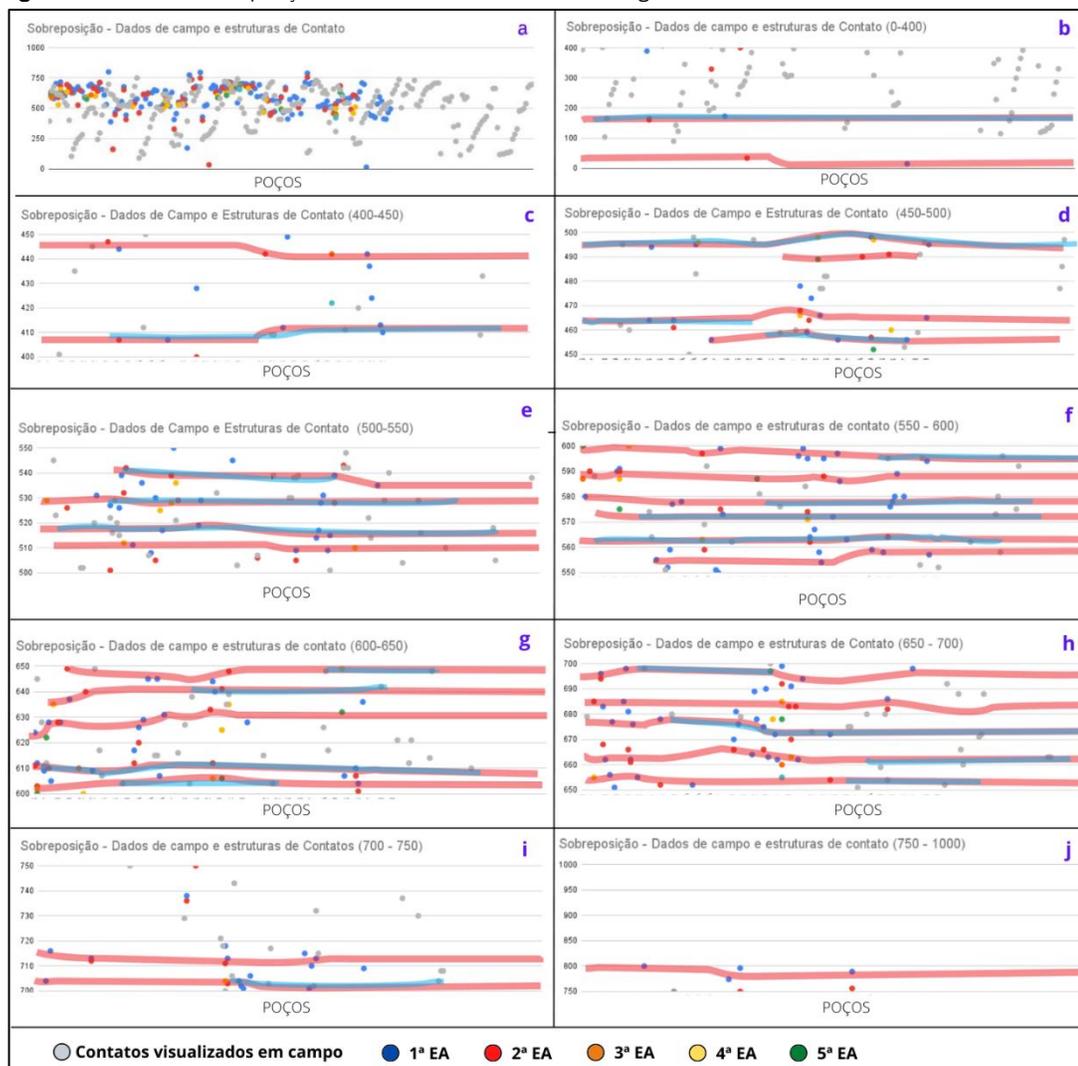
Figura 3 - Contatos identificados em campo - (a) entre derrames básicos: pacotes assentados horizontalmente; (b) entre derrames ácidos: contato erosivo; e (c) entre derrame básico e ácido: estrutura de erosão nítida.



Os contatos mapeados em campo e os contatos identificados em perfis construtivos de poços tubulares através das entradas de água, foram correlacionados em um gráfico único conforme suas altitudes, a fim de identificar estruturas em comum (Figura 4). As faixas vermelhas representam as entradas de água que

se concentravam em mesma altitude e, com isso, possivelmente indicavam estruturas de contatos, enquanto a sobreposição das faixas com contatos observados em campo foi destacada em bandas azuis.

Figura 4 - Gráficos de sobreposição entre as altitudes de entradas de água associadas a contato e contatos identificados em campo



O Gráfico 4a demonstra que ocorrência de entradas de água associadas aos contatos ocorrem predominantemente entre 500 e 700 m, assim como as estruturas de contato. Observa-se também que os contatos identificados em campo foram observados em uma variação maior de altitude, já apresentando ocorrências antes dos 200 m. Nessa faixa inferior aos 200 m e para os poços da área de estudo, não é comum ocorrer entradas de água devido a localização dos poços em altitudes maiores de 400 m, estando assim também as entradas em altitudes maiores.

Com a análise dos demais 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 (unidade inferior), 1 da passagem Gramado para Palmas/Caxias, e mais 4 entre pacotes da Fm Palmas/Caxias – unidade superior (Tabela 2).

Tabela 2 - Faixas de altitudes identificadas como zonas de contato principais

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

4.2 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. Para a avaliação hidrogeológica e a partir do levantamento de dados, foram analisados 1379 poços que exploram estritamente o SASG.

Para a análise do nível estático (NE) e dos parâmetros hidrodinâmicos, foram individualizadas estruturas localizadas abaixo

dos 550 m de altitude, interpretadas como pertencentes dos derrames básicos e acima dos 550 m, referentes as ocorrências ácidas.

Com isso, a análise estatística do NE demonstra a profundidade média geral de 22,37 m, enquanto poços que captam água apenas das rochas ácidas apresentam uma profundidade maior, com média igual 28,6 m. O nível médio mais raso, de 9,80 m, encontra-se em poços que captam água em estruturas acima dos 550 m (Tabela 3).

Tabela 3 - Análise estatística da profundidade do NE dos poços encontrados na área de estudo.

Nível Estático (m)	Altitude < 550m	Altitude > 550m	Geral
Mínimo	0,13	0,10	0,10
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

Observa-se 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 150 m, mais favorável a fraturas abertas.

4.2.1 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 acima dos 550m de altitude, consideradas pertencentes aos derrames da Fm Palmas/Caxias. Abaixo dessa altitude, e avaliadas como as rochas básicas da Fm 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.

Seguindo o mesmo padrão da altitude dos poços, as entradas de água estão predominantemente distribuídas entre 500 e 700 m de altitude e localizadas entre 0 a 100 m de profundidade no poço.

Apesar da baixa quantidade de informações de transmissividade, disponível em apenas 88 poços, a análise dos dados indicou um comportamento já esperado para aquíferos

anisotrópicos, com forte variação e predomínio de valores baixos. Os principais resultados encontrados são inferiores a 0,1 m³/h.

Quanto à vazão, os poços ocorrem com mais frequência na faixa entre 1 e 10 m³/h. Não há ocorrência de poços com vazão

maior que 100 m³/h e são raras ocorrências (3%) inferiores a 1 m³/h. 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 da Fm Gramado. 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 4).

Tabela 4 - Análise estatística dos valores de vazão encontrados na área de estudo

Vazão (m ³ /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

Observa-se também que poços que captam água de aquíferos fraturados associados exclusivamente as rochas vulcânicas da Fm Palmas/Caxias, em altitudes maiores que 550 m, 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.

Quanto à capacidade específica, sendo um parâmetro que exprime a capacidade de produção dos poços e que está atrelada

as características dos aquíferos fraturados, são comuns valores pouco produtivos para esse parâmetro. 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 5). Poços que captam água de estruturas acima de 550 m 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 abaixo dos 550 m.

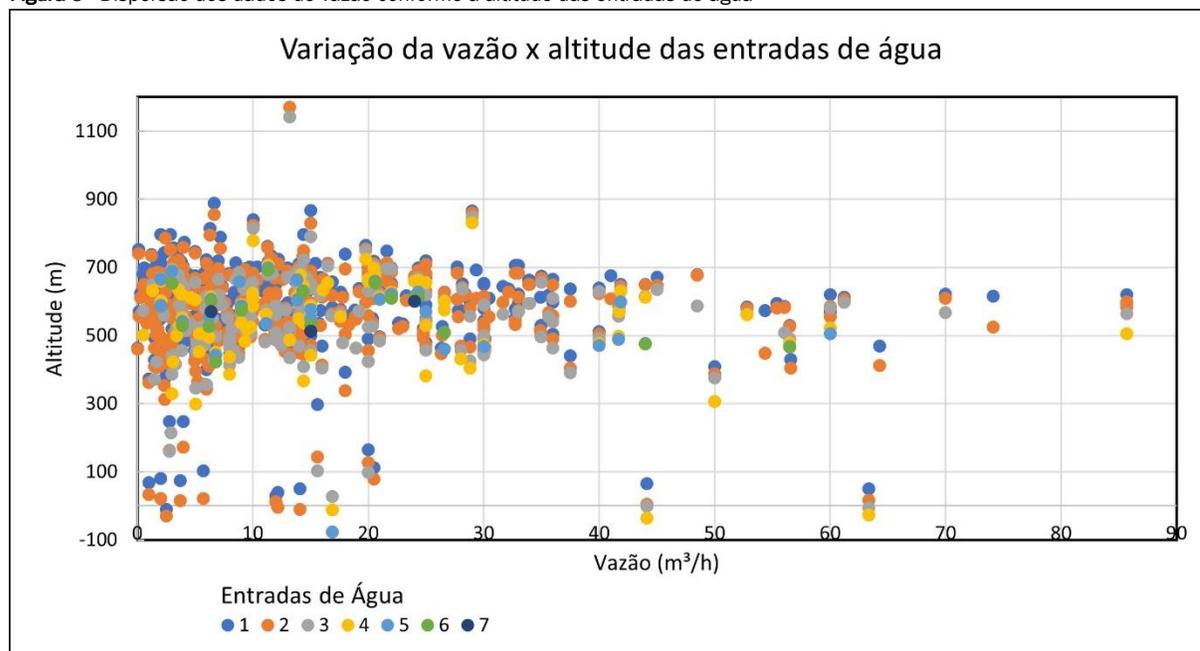
Tabela 5 - Análise estatística dos dados de capacidade específica encontrados na área de estudo

Capacidade Específica (m ³ /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

A maior parte das entradas de água ocorrem em altitudes entre 500 e 700 m, correspondendo a vazões menores que 25 m³/h (Figura 5). 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 10 m³/h, e raras ocorrências de vazões altas (>60 m³/h).

Figura 5 - Dispersão dos dados de vazão conforme a altitude das entradas de água



4.3 Produtividade dos poços tubulares

Com os dados obtidos nas caracterizações anteriores e através da análise dos parâmetros hidrodinâmicos encontrados, foi classificada a produtividade do aquífero. Utilizando os valores médios de vazão (Q) e capacidade específica (q) identificados no banco de dados, a vazão geral de 11,36 m³/h e a capacidade específica geral de 0,8055m³/h/m, ambos se encontram dentro da Classe 4 – geralmente baixa, porém localmente modera-

da.

Fragmentando as zonas de altitude das entradas de água (EA) em pequenas faixas de 50 m, a fim de observar a variação da produtividade conforme a variação das altitudes, observa-se que, pela classificação de Diniz (2012), ambos os parâmetros ocorrem entre a Classe 4 e Classe 5 – Geralmente muito baixa, porém localmente muito baixa (Tabela 6).

Tabela 6 - Classes de produtividade conforme mediana de Q e q, em faixas de altitudes das entradas de água (EA)

Intervalo de Altitude da EA	Mediana Vazão (m ³ /h)	Classe de produtividade	Mediana Capacidade Específica (m ³ /h/m)	Média de produtividade
1000 - 750 m	7,200	5	0,304	5
750 - 700 m	11,200	4	0,297	5
700 - 650 m	11,310	4	0,441	4
650 - 600 m	10	4	0,509	4
600 - 550 m	11,124	4	0,281	5
550 - 500 m	8,417	5	0,304	5
500 - 450 m	9,043	5	0,336	5
450 - 400 m	6	5	0,19	5
400 - 0m	5,77	5	0,3215	5

Observa-se que para a vazão, a Classe 4 ocorre em uma grande faixa de altitude abrangendo o intervalo dos 550 aos 750 m. Essa grande faixa inicia-se 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 400 m, com 5,7 m³/h, e a maior encontra-se entre 650 e 700 m, com vazão de 11,31 m³/h.

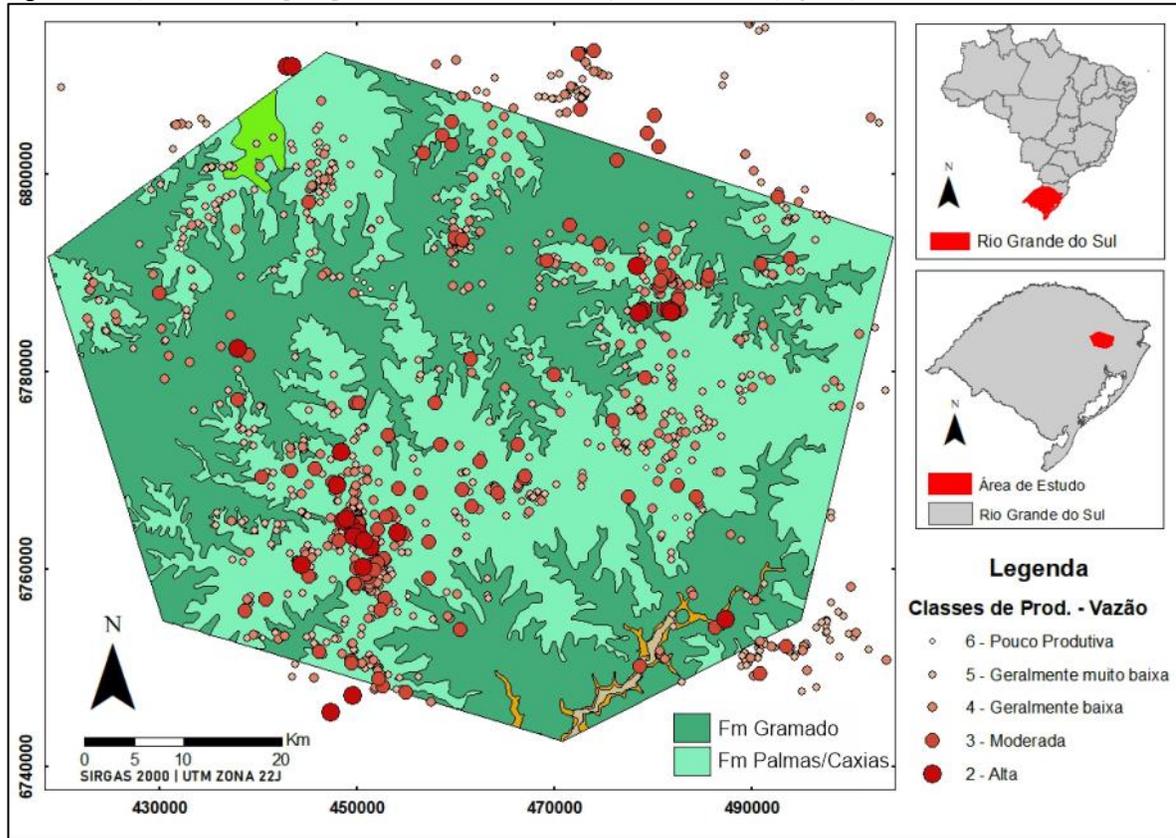
Quanto a capacidade específica, a Classe 4 ocorre em dois intervalos, entre os 600 e 700 m de altitude, estando também dentro da faixa mais produtiva do parâmetro anterior. Embora tenham valores próximos, a maior mediana está entre os 600 e

650 m, com q igual a $0,509 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$.

Ao analisar apenas entradas de água em poços de alta vazão, maiores que $25 \text{ m}^3/\text{h}$ (Classe 3) e entre $25\text{-}50 \text{ m}^3/\text{h}$ (Classe 2), a mesma faixa de altitude, entre 600 e 650 m, é observado como predominante. Ademais, analisando poços de alta produtividade quanto a capacidade específica, referentes às Classes 1 e 2, foram identificados 179 poços.

Quando plotados em mapas geológicos, observa-se duas áreas principais com concentração de poços com maior produtividade quanto sua vazão (Figura 6). Essas regiões estão localizadas próximas a mudanças de litologia e foram escolhidas para serem analisadas com maior detalhe.

Figura 6 - Mapa de unidades geológicas da área de estudo com a produtividade dos poços a partir da vazão

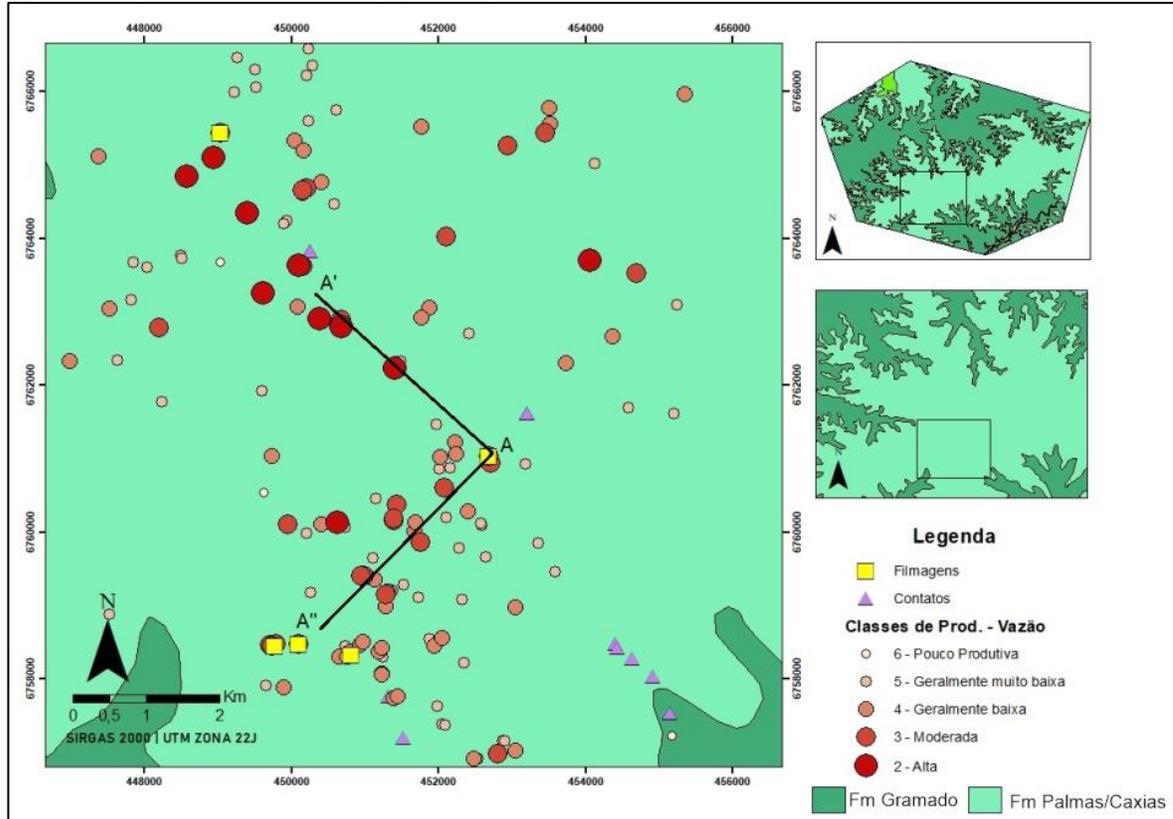


Fonte: Elaborado pela autora a partir de Wildner et al. (2008)

Na região sudoeste do polígono, entre os municípios de Carlos Barbosa e Garibaldi, verifica-se uma concentração de poços Classe 2 e 3 e uma série de contatos mapeados em campo

Figura 7). Os perfis traçados correlacionam os derrames e estruturas, marcando o contato entre as rochas ácidas e básicas, além de pacotes de brechas vulcânicas.

Figura 7 – Mapa de detalhe da vazão de poços na região de Garibaldi e Carlos Barbosa.



Fonte: Elaborado pela autora a partir de Wildner *et al.* (2008).

A seção geológica A-A' liga o poço de maior vazão de toda área de estudo, COR GAR 02 NG 0838, com 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 600 m. 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 8).

Analisando os perfis e os dados hidrodinâmicos dos poços pre-

sentes, observa-se que a ocorrência das entradas de água concentra-se entre 500 e 650 m 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 46 m.

Figura 8 - Seções geológicas obtidas através dos perfis AA' e AA'' contendo informações litológicas e construtivas do poço. Região próxima aos municípios de Carlos Barbosa e Garibaldi

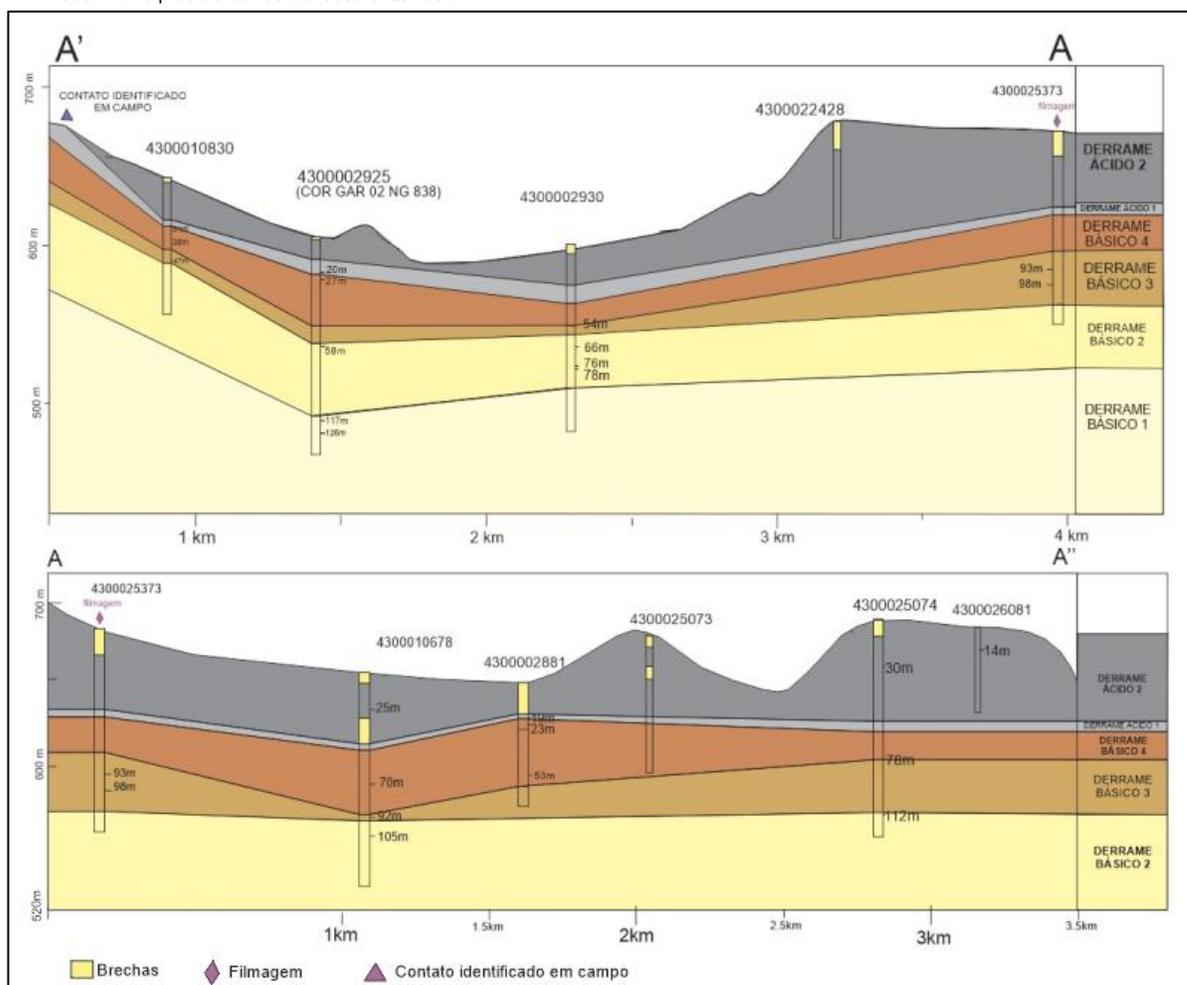


Tabela 7 - Dados construtivos e hidrodinâmicos dos poços utilizados no perfil A-A'

Poço	Profundidade (m)	EA (m)	Vazão (m³/h)	q (m³/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

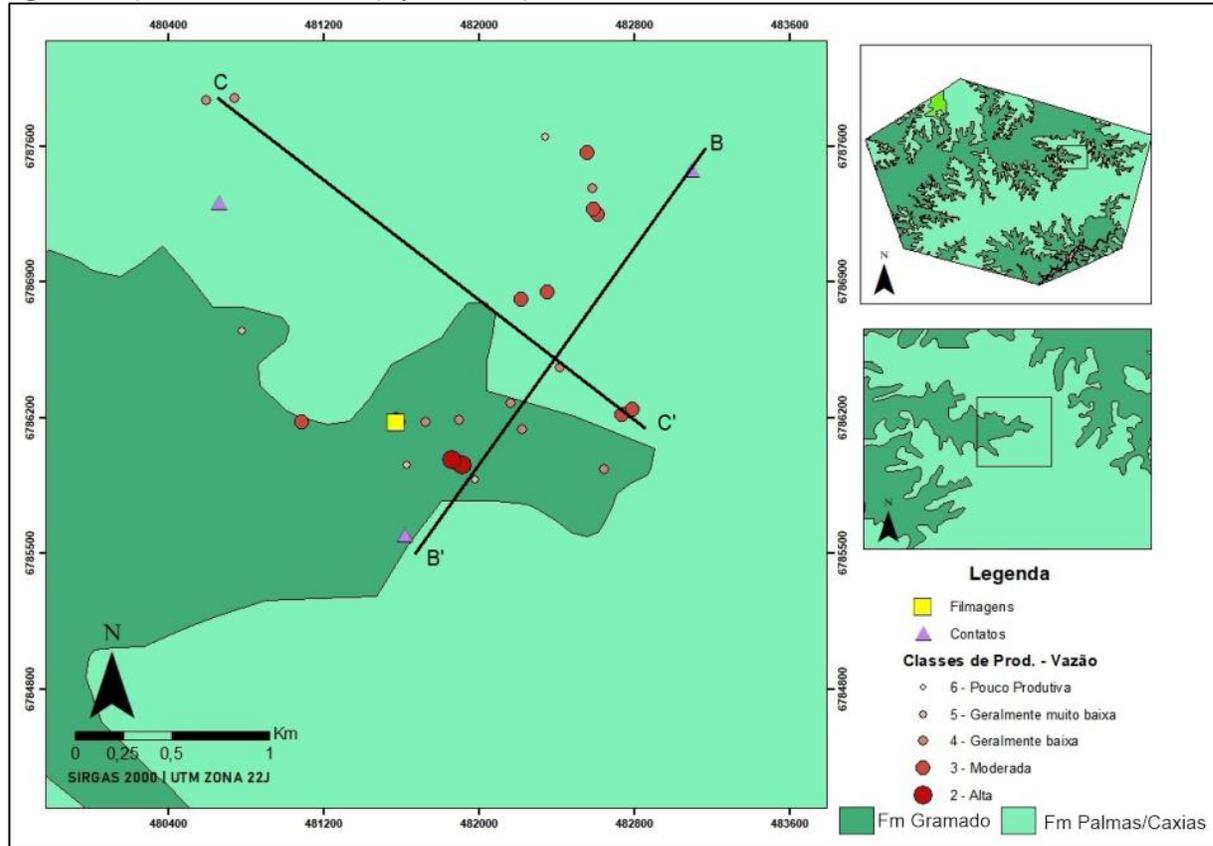
Tabela 8 - Dados construtivos e hidrodinâmicos dos poços utilizados no perfil A-A''

Poço	Profundidade (m)	EA (m)	Vazão (m³/h)	q (m³/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	

A segunda região analisada, localizada no município de Flores da Cunha, correlaciona afloramentos observados em campo e poços com vazão maior que 20 m³/h (Figura 9). Em relação à área anterior, está localizada em maiores altitudes, com poços alcançando entre os 500 e 800 m. 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 550 m de altitude, sotoposta pelos derrames ácidos.

Figura 9 – Mapa de detalhe de vazão de poços no município de Flores da Cunha

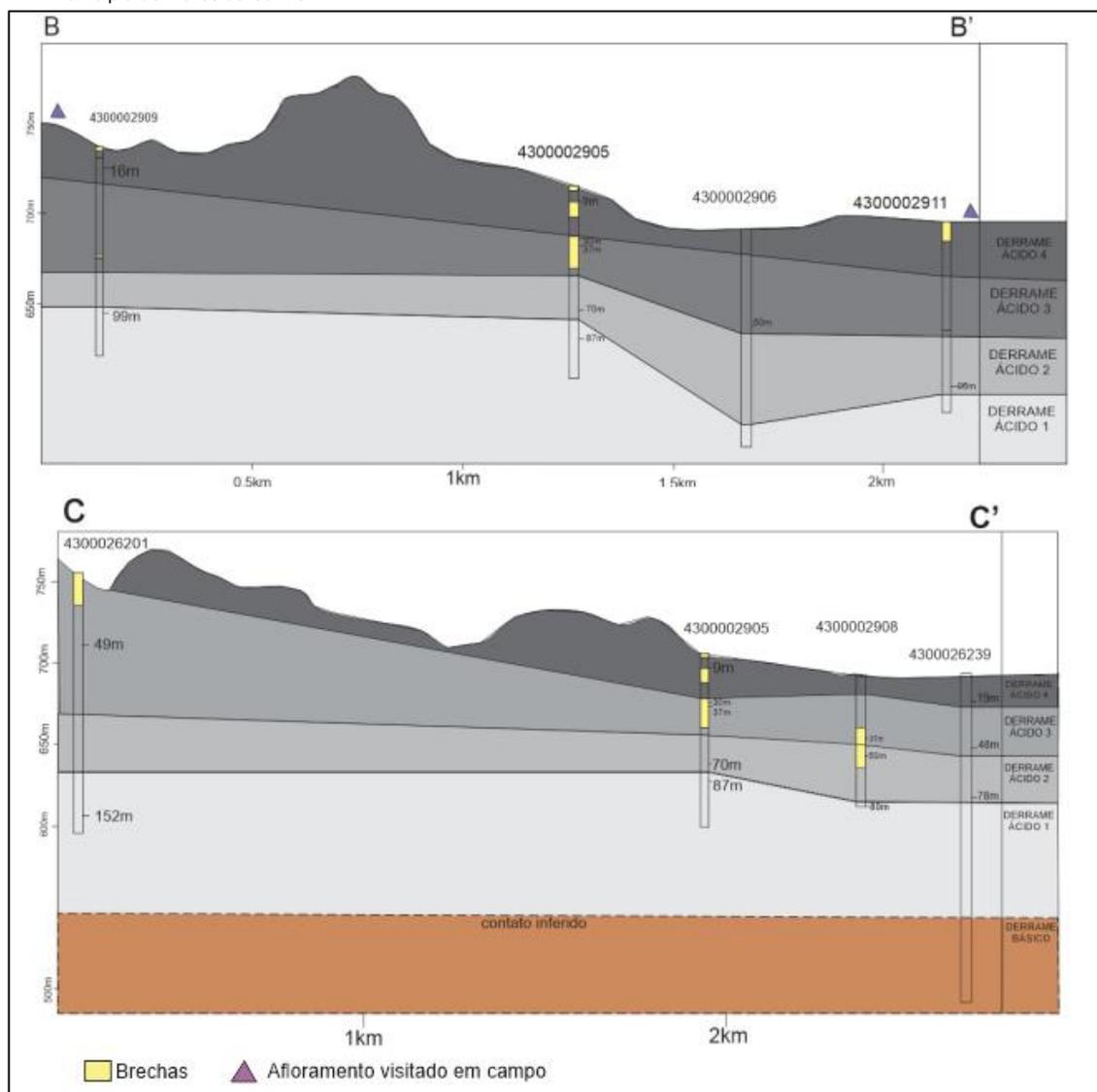


Fonte: Elaborado pela autora a partir de Wildner et al., (2008).

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. 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. Dessa forma, a correlação permitiu identificar 4 derrames ácidos e finas camadas de brechas vulcânicas, além de uma camada básica inferida aos 550 m de altitude. Observou-se ainda a altitude de ocorrência das entradas de água predominantemente entre 600-700 m (Figura 10).

Figura 10 - Seções geológicas obtidas através dos perfis BB' e CC' contendo informações litológicas e construtivas do poço. Região próxima ao município de Flores da Cunha



O poço de maior vazão, com 56 m³/h (4300002911), possui 108 m 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 9 e Tabela 10).

Dessa forma, esse contato demonstra ser uma estrutura importante para a alta produtividade dos poços da região. A vazão também varia positivamente 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 9 - 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

Tabela 10 - 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

As análises dos perfis indicam que as duas regiões possuem estruturas principais de contato que afetam no controle da ocorrência e da produtividade do SASG na região. Na primeira área, entre os municípios de Carlos Barbosa e Garibaldi, as entradas de água dos poços de maior vazão estão localizadas próximas ao contato entre as formações Gramado e Palmas/Caxias. Paralelamente, os poços que não atingem essa estrutura, localizada próximo as 600 m 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 também influenciam positivamente na produtividade dos poços.

5. CONCLUSÕES

A geologia do nordeste do Rio Grande do Sul é formada pelo registro magmático básico e ácido do Grupo Serra Geral. Na área de estudo afloram as rochas básicas, pertencentes à Fm Gramado, e o pacote ácido que representa a Fm Palmas/Caxias, sendo essa a unidade mais nova na região. Dessa forma, identificou-se a ocorrência da Fm Palmas/Caxias em altitudes maiores, geralmente superiores a 539 m, e os da Fm Gramado em altitudes menores que 502 m.

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 Gramado e Palmas/Caxias, concentrada predominantemente entre os 500 e 550 m, ocorre através de uma importante zona de erosão, marcada por um topo básico escoriáceo sotoposto por derrame ácido de fluxo horizontal.

O Sistema Aquífero Serra Geral, reservatório fraturado e localizado nos derrames das rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral, foi caracterizado através de 1379 poços localizados em 21 municípios. Observou-se que as entradas de água estão localizadas em zonas fraturadas, alteradas e geralmente próximas a estruturas de contato, concentradas em uma faixa entre 600 e 700m de altitude. A maior parte dos poços localizam-se entre os 500 e 700 m de altitude, possuem profundidade média de

127 m e nível estático de 22 m.

Os principais parâmetros hidrodinâmicos refletem o comportamento esperado para 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. De acordo com o que foi observado, 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.

Ao classificar os poços conforme sua produtividade, a maioria deles acomoda-se na Classe 5, mas a média de ambos parâmetros é classificada como Classe 4, ou seja, "Geralmente baixa, porém localmente moderada". As faixas de altitude onde se concentram as zonas de contato, entre 550 e 650 m, 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, sendo essa zona definida como um intervalo mais eficiente.

Ao analisar a distribuição geográfica da produtividade dos poços em mapas das unidades geológicas, duas regiões apresentaram predomínio de Classes 1 e 2, as quais se referem aos poços mais produtivos. As seções geológicas desses perfis de detalhe indicaram que ambas as regiões possuem uma estrutura principal que condiciona a circulação e produtividade local do aquífero, 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.

Conclui-se que o contato entre derrames desempenha um papel importante como condicionante de aquíferos fraturados, gerando novos caminhos de circulação de água e acarretando aberturas mais eficazes que as aberturas tectônicas. Entende-se que, embora a tectônica seja 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 quando esse ocorrer em contextos geológicos que envolvam derrames vulcânicos.

6. REFERÊNCIAS

- ANA, Agência Nacional de Águas. Disponibilidade e demanda de recursos hídricos no Brasil. *Cadernos de Recursos Hídricos*. Brasília, 2007.
- ANA, Agência Nacional de Águas. *Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil*. Brasília, 2005.
- DINIZ, J.A.O. *Proposta Metodológica para elaboração de mapas hidrogeológicos*. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. (Publicação interna), 2012.
- ELSENBRUCH, D. S. *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 (Mestrado) - Programa de Pósgraduação em Geologia, Área de Concentração em Geologia Sedimentar, Linha de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Modelagem Geológica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2017.
- FERNANDES, A. J. Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. *Revista do Instituto Geológico*, v. 29, p. 49-72, 2008.
- HOLLAND, M.; WITTHÜSER, K. T. 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, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0730-5>
- MACHADO, J. L. F.; DE FREITAS, M.A. *Mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul*. Rio de Janeiro: CPRM, 2005, 1 mapa, col. Escala 1:750.000, 2005.
- NANNI, A. S. *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 Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2008.
- NARDY, A. J. R.; MACHADO, F. B.; OLIVEIRA, M. A. F. 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, 2008. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2008381178195>
- PINTO, V. M.; HARTMANN, L. A.; SANTOS, J. O. S.; MCNAUGHTON, N. J.; WILDNER, W. Zircon U–Pb geochronology from the Paraná bimodal volcanic province support a brief eruptive cycle at ~135Ma. *Chemical Geology*, v. 281, p. 93-102, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.11.031>
- REGINATO, P.A.R. *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, RS, 2003.
- 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: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, CUIABÁ, 13. 2004. [Anais...]. 2004.
- 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.