

## ANÁLISE DAS LITOLOGIAS ASSOCIADAS ÀS ENTRADAS DE ÁGUA EM POÇOS TUBULARES NO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL (RS)

**Aline Saupe Abreu**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, RS, Brasil  
[alsaupe@gmail.com](mailto:alsaupe@gmail.com)

**Pedro Antônio Roehe Reginato**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, RS, Brasil  
[pedro.reginato@ufrgs.br](mailto:pedro.reginato@ufrgs.br)

**Tiago de Vargas**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, RS, Brasil  
[tiago.devargas@ufrgs.br](mailto:tiago.devargas@ufrgs.br)

**Franciele Schwanck Carlos**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, RS, Brasil  
[schwanck.carlos@ufrgs.br](mailto:schwanck.carlos@ufrgs.br)

**Taison Anderson Bortolin**

Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM), Bento Gonçalves, RS, Brasil  
[tabortol@gmail.com](mailto:tabortol@gmail.com)

**Paulo Salvadoretti**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Porto Alegre, RS, Brasil  
[paulo.salvadoretti@ufrgs.br](mailto:paulo.salvadoretti@ufrgs.br)

### RESUMO

As águas subterrâneas pertencentes ao Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) são as principais fontes de abastecimento de muitos dos municípios no nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. Apesar da boa qualidade e da transmissão de quantidades razoáveis de água, suas particularidades — como aquífero fraturado, heterogêneo e anisotrópico — fazem com que seus recursos apresentem variações significativas na produtividade de água. Essas variações são condicionadas pelas estruturas e litologias que ocorrem associadas às entradas de água (EA). Dessa forma, o presente artigo visou avaliar a relação existente entre as litologias e a produtividade no SASG. Considerando as análises estatísticas dos grupos litológicos, foi possível verificar que 49% e 27% de todas as EAs foram caracterizadas pela presença de rochas vulcânicas com estrutura vesicular a amigdalóide (Grupo 2) e por basaltos fraturados (Grupo 4). As vazões associadas às EA (QEA) não descreveram um único comportamento, tendo sido verificados aumentos e diminuições da vazão em relação às características das EA. Em suma, a ocorrência de diferentes vazões e, conseqüentemente, a produtividade dos poços observados (maior transmissividade / capacidade específica) são aspectos dependentes do tipo, quantidade, conexão e aberturas das estruturas existentes no SASG.

**Palavras-chave:** Vazões. Estruturas tectônicas. Rochas vulcânicas. Aquífero fraturado.

### ANALYSIS OF LITHOLOGIES ASSOCIATED WITH WATER INFLOW IN TUBULAR WELLS IN THE SERRA GERAL AQUIFER SYSTEM (RS)

### ABSTRACT

The groundwater belonging to the Serra Geral Aquifer System (SGAS) is the primary source of water supply for many municipalities in the northeast of the state of Rio Grande do Sul. Despite its good quality and reasonable water availability, its specificities —such as a fractured, heterogeneous, and anisotropic aquifer —cause significant variations in water productivity. These variations are conditioned by the structures and lithologies that occur associated with the water inflows (WI). Thus, this article aimed to evaluate the relationship between lithologies and productivity in SGAS. The statistical analyses of the lithological groups showed that 49% and 27% of all WI were characterized by the presence of volcanic

rocks with vesicular to amygdaloid structures (Group 2) and fractured basalts (Group 4), respectively. The water flow rates (WFR) did not describe a single behavior. Increases and decreases in flow were observed in relation to the characteristics of the WI. In short, the occurrence of different discharges and, consequently, the productivity of the wells (greater transmissivity/specific capacity) depend on the type, quantity, connection, and openings of the existing structures in the SGAS.

**Keywords:** Discharge. Tectonic structures. Volcanic rocks. Fractured aquifer.

## INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos subterrâneos oriundos do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) possuem grande relevância social e econômica para a região nordeste do estado do Rio Grande do Sul, sendo responsáveis por atender às demandas geradas pelo abastecimento urbano e doméstico, bem como pelo desenvolvimento de atividades industriais, comerciais e agrícolas de centenas de municípios. Por se tratar de um aquífero fraturado, de natureza anisotrópica e heterogênea, o SASG detém um potencial hídrico intensamente variado, dependente dos tipos de litologias e estruturas que formam o pacote de rochas vulcânicas existentes na região (Machado; Freitas, 2005; Bortolin, 2016; Reginato et al., 2015; Bortolin, 2018; Souza, 2022; Abreu et al., 2025).

A circulação e o armazenamento da água subterrânea no SASG estão associados à ocorrência de estruturas tectônicas (fraturas, zonas de fraturas, falhas) e de resfriamento (disjunções verticais, horizontais, zonas vesiculares a amigdalóides, zonas de brechas), bem como de estruturas associadas ao contato entre derrames vulcânicos básicos e ácidos da Formação Serra Geral (Reginato; Strieder, 2004; Freitas et al., 2012; Bortolin et al., 2016; Quaggio et al., 2018; Cassali et al., 2018; Souza, 2022; Sanferari, 2022).

Rebouças et al. (1976) e Rebouças (1988), reiterados por Elsenbruch (2017), informam que o armazenamento da água subterrânea no Grupo Serra Geral é limitado a zonas mais intensamente fraturadas, aos contatos intertraps e à ocorrência de sedimentos inter ou intratrapianos. Afirmam ainda que zonas de disjunção horizontal apresentam menor importância para a condução e circulação da água subterrânea. Por outro lado, as zonas de disjunção vertical, quando interconectadas por sistemas de fraturamento, são responsáveis por conduzir o fluxo de água pelas diaclases horizontais subjacentes, vesículas e amígdalas, favorecendo excelentes condições de armazenamento de água.

Kirchheim et al. (2013) definem que áreas com maior produtividade aquífera são geralmente associadas a zonas de fraturas de alta transmissividade, sendo o fluxo das águas subterrâneas atribuído, em sua maioria, às descontinuidades tectônicas detectadas através dos lineamentos geológicos em superfície e dos perfis de sondagem. No SASG, fraturas e zonas de fraturas mais abertas normalmente são encontradas entre 50,0 e 150,0 m de profundidade, estando relacionadas às principais entradas de água (EA) que ocorrem nos poços tubulares da região (Sanferari et al., 2022; Abreu et al., 2025).

Vargas et al. (2022) consideram que as estruturas associadas a lineamentos de direção NW-SE e NE-SE são as principais, sendo que a maioria dos poços produtivos localizados na região de estudo (município de Caxias do Sul – nordeste do estado do Rio Grande do Sul) está situada junto a essas estruturas. As principais estruturas são caracterizadas por quatro conjuntos de fraturas subverticais (N-S, E-W, NE-SW e NW-SE) e um conjunto de fraturas sub-horizontais (NE-SW).

Reginato e Strieder (2004) observaram, em seus estudos, que grande parte dos 252 poços tubulares analisados na região do SASG é composta por 1 EA (43,5%) e 2 EA (39,1%), sendo 14,5% e 2,9% correspondentes a poços com três e quatro entradas de água. Ao verificarem as características hidrodinâmicas locais, identificaram três intervalos distintos de vazões observadas: de 0 a 10,0 m<sup>3</sup>/h, de 10,0 a 20,0 m<sup>3</sup>/h e acima de 20,0 m<sup>3</sup>/h. Assim como os intervalos das vazões, as transmissividades médias e as capacidades específicas apresentaram grandes variações em seus parâmetros, descrevendo valores entre 0,1325 e 1,4578 m<sup>2</sup>/h e de 0,106 a 1,1663 m<sup>3</sup>/h/m. Os autores afirmam que as variações entre as vazões máximas e mínimas atribuídas aos intervalos analisados, bem como os valores médios máximos e mínimos de transmissividade e capacidade específica dos poços na região, são consequências da forte anisotropia do Sistema Aquífero Serra Geral.

Existem diversos estudos que abordam o comportamento da circulação e armazenamento das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral por meio da análise espacial das estruturas tectônicas (lineamentos). Entretanto, pesquisas que analisem os perfis geológicos e construtivos dos poços com o objetivo de avaliar as litologias (tipos), as vazões e sua relação com a quantidade e profundidade de ocorrência de EA identificadas nos poços são escassas. Grande parte disso deve-se à dificuldade de acesso a informações detalhadas e à significativa heterogeneidade e anisotropia que compõem o SASG.

A interpretação de perfis geológicos e construtivos tem grande importância, conforme destacado por Rodrigues e Campos (2024), pois, quando bem descritos, permitem identificar importantes aspectos, como a presença de zonas alteradas, tipos de rochas, estruturas, contatos geológicos, entre outras feições que ocorrem associadas às EA. Um exemplo de estudo que envolveu a análise dos perfis geológicos e construtivos de poços do SASG foi o desenvolvido por Peterlini et al. (2020), cujos dados permitiram avaliar os condicionantes geológicos e pedológicos da produtividade de poços do SASG.

Dessa forma, considerando as informações extraídas de boletins de perfuração, perfis geológicos e construtivos de poços tubulares, o presente artigo visa contribuir, técnica e cientificamente, para a compreensão das relações existentes entre as EA, as litologias e as vazões associadas no Sistema Aquífero Serra Geral.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização desta pesquisa, foram avaliados os boletins de perfuração e os perfis geológicos e construtivos de 86 poços, de propriedade da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), e coletados dados geológicos e hidrogeológicos. Os dados coletados e analisados foram as vazões associadas a cada entrada de água (QEA), o número de EAs, bem como as descrições litológicas das camadas associadas às entradas de água observadas.

Os poços tubulares utilizados estão todos inseridos na região hidrogeológica do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), no nordeste do estado do Rio Grande do Sul, dispostos em nove municípios, sendo eles: Bento Gonçalves, Carlos Barbosa, Cotiporã, Fagundes Varela, Farroupilha, Flores da Cunha, Garibaldi e Veranópolis. A Figura 1 apresenta o mapa de localização dos poços tubulares pertencentes à bacia hidrográfica do Taquari-Antas/RS, elaborado por meio da utilização do software de Sistema de Informações Geográficas QGIS, versão 3.40 (QGIS.org, 2025).

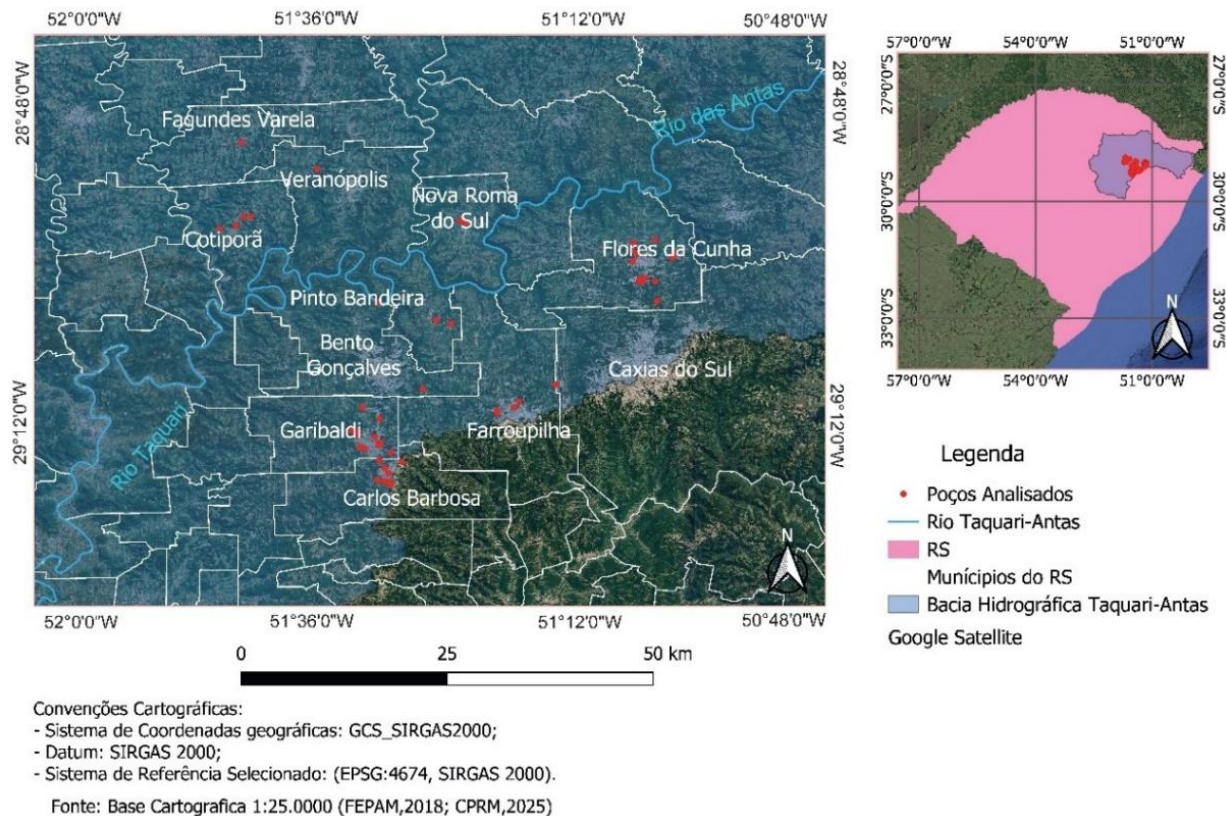
A partir das descrições litológicas atribuídas às zonas de localização das EA, foram propostos agrupamentos entre camadas litológicas semelhantes do ponto de vista hidrogeológico. A existência de amígdalas, brechas, vesículas, juntas injetáveis, basaltos alterados e/ou fraturados, entre outros, foi a principal característica considerada nesta análise (Tabela 1).

Tabela 1 - Bento Gonçalves, Carlos Barbosa, Cotiporã, Fagundes Varela, Farroupilha, Flores da Cunha, Garibaldi e Veranópolis (RS): Classificação proposta as descrições litológicas das EAs, 2025

ITEM	DESCRIÇÃO
Grupo 1	Alterado e fraturado - rochas alteradas e/ou alteradas e fraturadas.
Grupo 2	Amigdalóide; Amigdalóide com Vesículas; Amigdalóide e Fraturado; Amigdalóide, Vesicular e Fraturado.
Grupo 3	Brecha e Juntas Injetáveis.
Grupo 4	Fraturado - basaltos de todas as cores e texturas, descritos como sendo fraturados.
Grupo 5	Outros - demais descrições que não se enquadrem aos grupos anteriores.

Fontes: Os autores, 2025.

Figura 1 - Bento Gonçalves, Carlos Barbosa, Cotiporã, Fagundes Varela, Farroupilha, Flores da Cunha, Garibaldi e Veranópolis (RS) - Mapa de localização dos poços tubulares analisados, 2025



Fontes: Base Cartográfica FEPAM, 2018; CPRM, 2025. Elaboração: Os autores, 2025.

Posteriormente, foram quantificados os números de EAs e determinadas as frequências relativas de ocorrência de cada grupo na amostra.

Considerando as informações referentes as QEAs dos poços analisados, verificou-se o comportamento das vazões em relação aos grupos litológicos e seus respectivos parâmetros estatísticos de médias aritméticas e geométricas ( $\overline{QEA}$  e  $\overline{QEA}_{Geom.}$ ), máximas ( $QEA_{máx.}$ ), mínimas ( $QEA_{mín.}$ ), medianas ( $QEA_{MED.}$ ) e modas ( $QEA_{Moda}$ ), e seus respectivos desvios padrão ( $\sigma_{Geom.}$ ) e coeficientes de variação ( $C.V_{Geom.}$ ) geométricos.

Por fim, foram ainda atribuídas tipologias (Tipo I, Tipo II e Tipo III) às diferentes relações estabelecidas entre as QEA e as suas respectivas quantidades de EA, de maneira a possibilitar uma análise comparativa entre os poços tubulares de comportamentos semelhantes (QEA x quant. EA). O Tipo I foi atribuído às relações crescentes entre as QEA e suas profundidades, o Tipo II as relações decrescentes e o Tipo III as relações que não expressassem comportamentos passíveis de agrupamento.

Todas as análises estatísticas e gráficos foram desenvolvidos através do uso do programa Microsoft Excel®.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio do agrupamento pré-estabelecido entre as camadas litológicas semelhantes – Grupos 1, 2, 3, 4 e 5 – foram então quantificadas as entradas de água que se enquadrariam em suas descrições.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2, bem como a localização (primeira à sexta EA – quando existentes) ao longo do perfil construtivo dos poços em que tais grupos foram verificados.



Tabela 2 - Bento Gonçalves, Carlos Barbosa, Cotiporã, Fagundes Varela, Farroupilha, Flores da Cunha, Garibaldi e Veranópolis (RS): Quantificação das EAs segundo suas litologias e localização ao longo do perfil\*, 2025

DESCRIÇÃO LITOLÓGICA	1EA			2EA			3EA			4EA				5EA					6EA					
	1	1	2	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6			
Grupo 1	6	4	3	4	2	3	1																	
Grupo 2	13	13	13	8	10	9	3	4	4	5				1	1	1	1	1			1			
Grupo 3			2																					
Grupo 4	10	12	10	4	3	5	1	1			1	1	1											
Grupo 5		5		2	3	1		5								2								

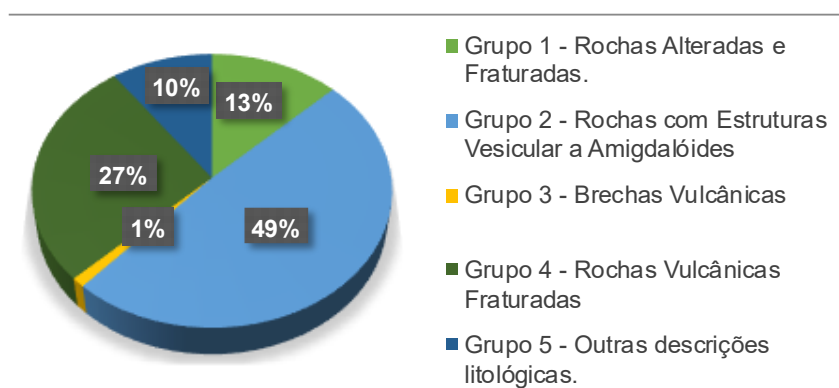
\*Obs: Nesta análise foram quantificadas as EA que descrevem as litologias associadas aos grupos 1 ao 5. Ex: Em um poço com 6EA, 4 entradas são descritas com a litologia atribuída ao Grupo 1 e 2 entradas associadas a descrição definida ao Grupo 5.

Fonte: Os autores, 2025.

Na Tabela 2, foi possível observar que há uma maior ocorrência do Grupo 2, ou seja, rochas com estrutura amigdalóide e vesicular, com ou sem fraturas associadas, em todos os poços tubulares, independentemente do número de entradas de água. Em contrapartida, a presença de brechas e juntas injetáveis (Grupo 3) foi constatada somente em dois dos poços analisados com 2 EA, estando essas dispostas na segunda EA observada. Outro aspecto relevante é que, nos poços com 5 e 6 EA, predominaram as descrições litológicas definidas pelos Grupos 2 e 4, sendo registrados principalmente nas primeiras entradas de água desses poços.

A Figura 2 descreve, em percentual, a classificação geral das entradas de água observadas, por meio dos Grupos litológicos 1, 2, 3, 4 e 5. Os Grupos 2 e 4 possuem as maiores representações, de 49% (88 EAs) e 27% (49 EAs) de toda a série amostral, sendo os Grupos 1 e 3 responsáveis por 13% (23 EAs) e 1% (2), respectivamente. Descrições generalistas das camadas litológicas associadas às EAs, tais como basaltos, riolitos, sem fraturas ou alterações nas camadas, foram atribuídas em cerca de 10% (18 EAs) dos poços tubulares averiguados. Essas condições específicas de descrição litologia impossibilitaram o enquadramento em litologias comumente ligadas a EAs de 18 poços tubulares, ou seja, dos 86 poços analisados, 68 poços tubulares foram classificados segundo os Grupos 1 a 4.

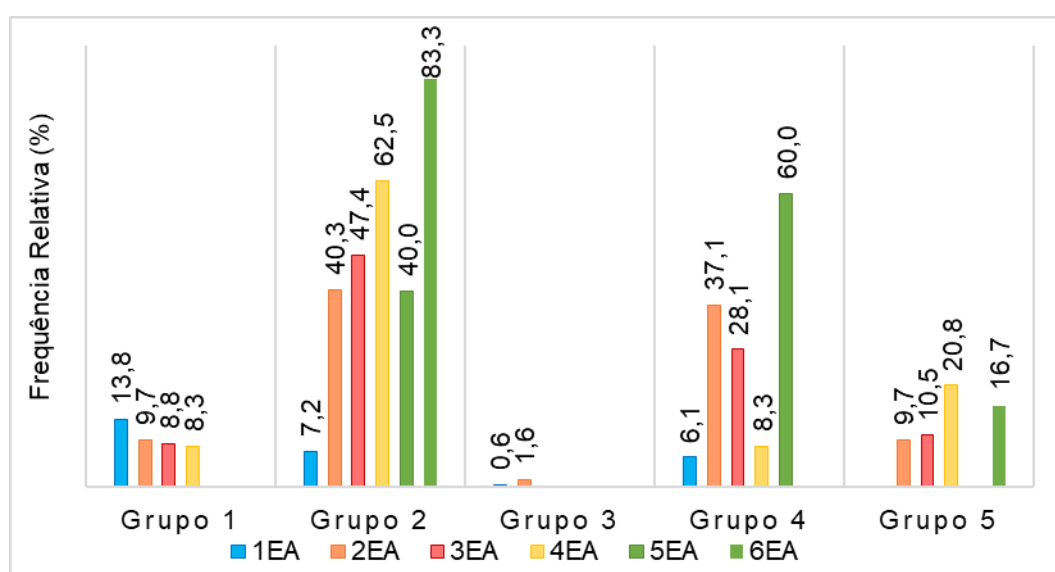
Figura 2 - Bento Gonçalves, Carlos Barbosa, Cotiporã, Fagundes Varela, Farroupilha, Flores da Cunha, Garibaldi e Veranópolis (RS): Representação gráfica, em percentual, da ocorrência dos grupos litológicos nos poços tubulares com entradas de água, 2025



Fonte: Os autores, 2025.

Baseando-se no agrupamento litológico realizado, foram determinadas as frequências relativas de ocorrência de cada grupo em relação aos poços tubulares que apresentassem o mesmo número de EAs (Figura 3). A partir da Figura 3, tornou-se perceptível que o Grupo 1 detém uma frequência entre 8,3% e 13,8% nos poços de 1 a 4 EAs. Ao se excluírem da análise os poços com 5 e 6 EA — devido à existência de apenas uma unidade de poço por amostra —, pode-se definir que grande parte dos poços observados possui, em seus perfis geológicos, a ocorrência de litologias associadas aos Grupos 2, 4 e 5, predominando os poços com 4 EA (62,5%), 2 EA (37,1%) e 4 EA (20,8%), respectivamente.

Figura 3 - Bento Gonçalves, Carlos Barbosa, Cotiporã, Fagundes Varela, Farroupilha, Flores da Cunha, Garibaldi e Veranópolis (RS): Frequência relativa de ocorrência dos grupos litológicos de acordo com o número de entradas de água analisadas



Fonte: Os autores, 2025.

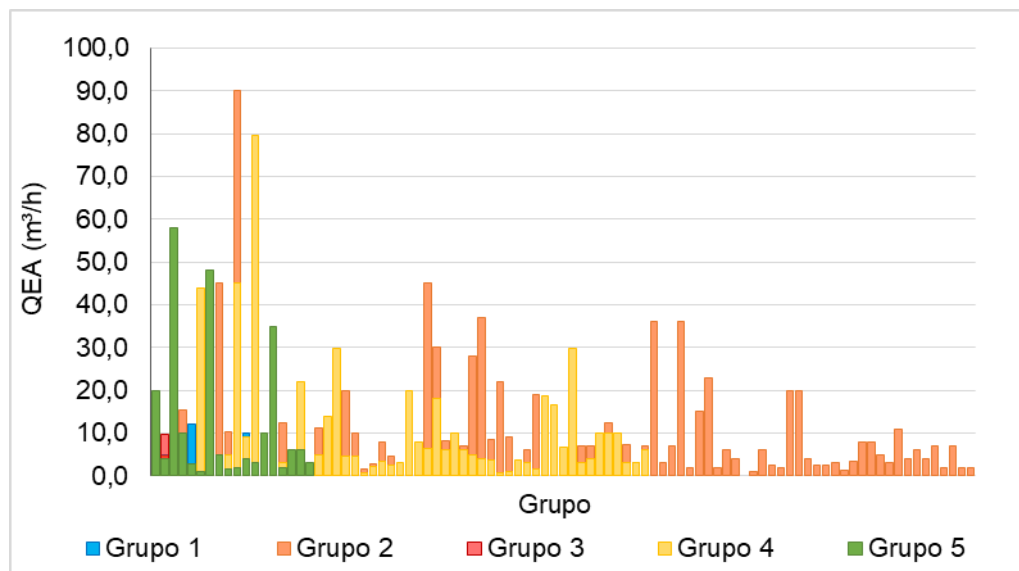
A ocorrência de brechas ou juntas injetáveis (Grupo 3) corresponde a 0,6% e 1,6% dos poços tubulares com 1 e 2 EA, sendo os poços com 2 EA os únicos que apresentam ocorrência de todos os grupos litológicos descritos em seus perfis (Figura 3).

Tendo em vista a existência de informações referentes às QEAs associadas às EA, foram então verificados seus comportamentos em relação às características dos grupos litológicos propostos (Figura 4), às frequências relativas (Figura 5), por meio da análise do histograma, e aos principais parâmetros estatísticos dessa série (Tabela 3).

As maiores QEAs registradas, superiores a 60,0 m³/h, foram vinculadas à ocorrência dos Grupos 2 e 4, respectivamente, onde predominam rochas com estrutura amigdalóide e/ou vesicular. Um aspecto relevante é que grande parte das QEAs associadas ao Grupo 2 concentra-se em valores inferiores a 10,0 m³/h, reafirmando os resultados encontrados por Reginato e Strieder (2004) e Abreu et al. (2025) para os poços tubulares de 1 e 2 EA (Figura 4).

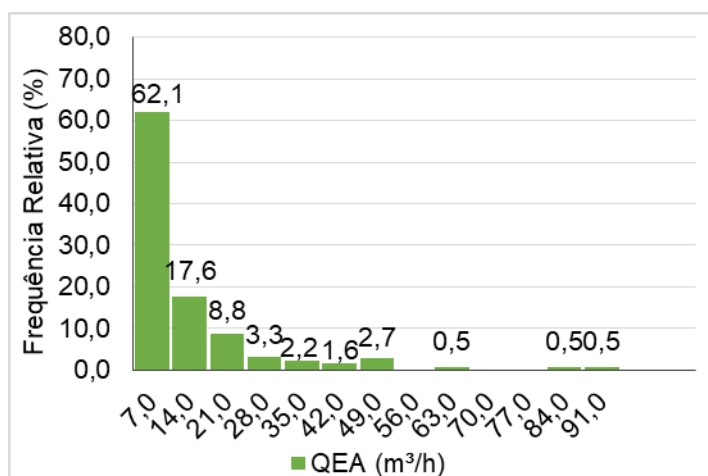
Conforme se observa através do comportamento do histograma (Figura 5) e das relações estabelecidas entre os parâmetros estatísticos ( $\overline{QEA} > QEA_{MED.} > QEA_{Moda}$ ) de  $10,20 > 5,0 > 3,0$  m³/h, as vazões associadas às EAs caracterizam-se por uma assimetria positiva e uma distribuição log normal (Tabela 3).

Figura 4 - Bento Gonçalves, Carlos Barbosa, Cotiporã, Fagundes Varela, Farroupilha, Flores da Cunha, Garibaldi e Veranópolis (RS): Vazões de entrada de água e suas respectivas descrições litológicas, 2025



Fonte: Os autores, 2025.

Figura 5 - Bento Gonçalves, Carlos Barbosa, Cotiporã, Fagundes Varela, Farroupilha, Flores da Cunha, Garibaldi e Veranópolis (RS): Histograma obtido através da série de QEA dos poços tubulares analisados.



Fonte: Os autores, 2025.

Tabela 3 - Parâmetros estatísticos da série de QEA dos poços analisados, 2025

Parâmetros	
$QEA_{\min}$ (m³/h)	0,20
$QEA_{\max}$ (m³/h)	90,0
$\overline{QEA}$ (m³/h)	10,20
$QEA_{MED.}$ (m³/h)	5,00
$QEA_{Moda}$ (m³/h)	3,00
CV (%)	129,0

Fonte: Os autores, 2025.

De acordo com o comportamento estabelecido pelos resultados apresentados no histograma (Figura 5) e na Tabela 3, foram determinados os parâmetros estatísticos de vazões máximas ( $QEA_{\max}$ ), médias aritméticas e geométricas ( $\overline{QEA}$  e  $\overline{QEA}_{Geom.}$ ), mínimas ( $QEA_{\min}$ ), medianas ( $QEA_{MED.}$ ) e moda ( $QEA_{Moda}$ ). Além dos desvios padrão ( $\sigma_{Geom.}$ ) e coeficientes de variação ( $C.V._{Geom.}$ ) geométricos para as QEA dos 5 grupos litológicos analisados. Os resultados são descritos na Tabela 4, a seguir.

Tabela 4 - Bento Gonçalves, Carlos Barbosa, Cotiporã, Fagundes Varela, Farroupilha, Flores da Cunha, Garibaldi e Veranópolis (RS): Classificação dos parâmetros estatísticos (QEA) segundo suas descrições litológicas, 2025

Parâmetros	Grupos Litológicos				
	1	2	3	4	5
$QEA_{min}$	2,00	0,50	4,57	0,20	1,10
$QEA_{máx.}$	20,00	90,00	9,58	79,62	58,00
$\overline{QEA}$	8,36	10,30	7,07	10,03	12,31
$QEA_{MED.}$	5,54	6,00	7,07	5,00	4,50
$QEA_{Moda}$	5,00	2,00	*	3,00	4,00
$\overline{QEA}_{Geom.}$	6,74	5,84	6,62	5,56	5,98
$\sigma_{Geom.}$	1,97	3,11	*	3,00	3,25
$C.V._{Geom.}$	0,29	0,53	*	0,54	0,54

Obs.: \* parâmetros indeterminados devido a quantidade limitada de dados.

Fonte: Os autores, 2025.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4, foi possível identificar que as maiores  $\overline{QEA}_{Geom.}$  foram vinculadas aos grupos litológicos 1 e 3, composto por rochas alteradas e fraturadas e brechas vulcânicas, de 6,74 e 6,62 m³/h. Os maiores  $\sigma_{Geom.}$  foram constatados nos grupos 2 e 5, de 3,11 a 3,25 m³/s, referentes as Rochas com estruturas Vesicular a Amigdalóides e demais descrições litológicas. Os coeficientes de variação geométricos obtidos variaram entre 0,29 e 0,54, Grupos 1 a 5, respectivamente.

Considerando ainda as séries de QEA, foram extraídos os valores dos parâmetros estatísticos de média ( $\overline{QEA}$ ), máxima ( $QEA_{máx.}$ ) e mínima ( $QEA_{min}$ ), para as séries de QEA de acordo com a quantidade de EA observadas e seus grupos litológicos correspondentes (Tabela 5).

Tabela 5 - Bento Gonçalves, Carlos Barbosa, Cotiporã, Fagundes Varela, Farroupilha, Flores da Cunha, Garibaldi e Veranópolis (RS): Classificação dos parâmetros estatísticos (QEA) segundo suas descrições litológicas, 2025

Quant. EA	$QEA_{min}$ (m³/h)	$QEA_{máx.}$ (m³/h)	$\overline{QEA}$ (m³/h)
1	0,2 Grupo 4	90,0 Grupo 2	13,5 Grupo 2
2	0,6 Grupo 2	79,6 Grupo 4	12,4 Grupo 4
3	0,5 Grupo 2	48,0 Grupo 5	8,0 Grupo 2
4	1,2 Grupo 2	35,0 Grupo 5	8,1 Grupo 2
5	3,0 Grupo 4	6,0 Grupo 4	4,4 Grupo 2
6	2,0 Grupo 2	7,0 Grupo 2	3,8 Grupo 5

Fonte: Os autores, 2025.

Quando analisados os resultados apresentados na Tabela 5, foi possível identificar que as  $QEA_{min}$  foram todas vinculadas à presença dos Grupos 4 e 2, sendo descritas essencialmente pela ocorrência de rochas com estrutura amigdalóide e/ou vesicular. Por outro lado, as maiores  $QEA_{máx.}$ , de 90,0 e 79,6 m³/h, foram identificadas nos poços com 1 e 2 EA e com litologias vinculadas aos Grupos 2 e 4. Já o Grupo 5 foi visualizado somente nas  $QEA_{máx.}$  dos poços tubulares com 3 e 4 EA (48,0 e 35,0 m³/h) e no menor valor de média observada,  $\overline{QEA} = 3,8$  m³/h, presente no único poço tubular caracterizado por 6 EA. Nesse grupo foram inseridas as descrições simplificadas (só o nome da litologia e sem informação sobre a presença ou ausência de estruturas), mas os resultados demonstram que a ocorrência de

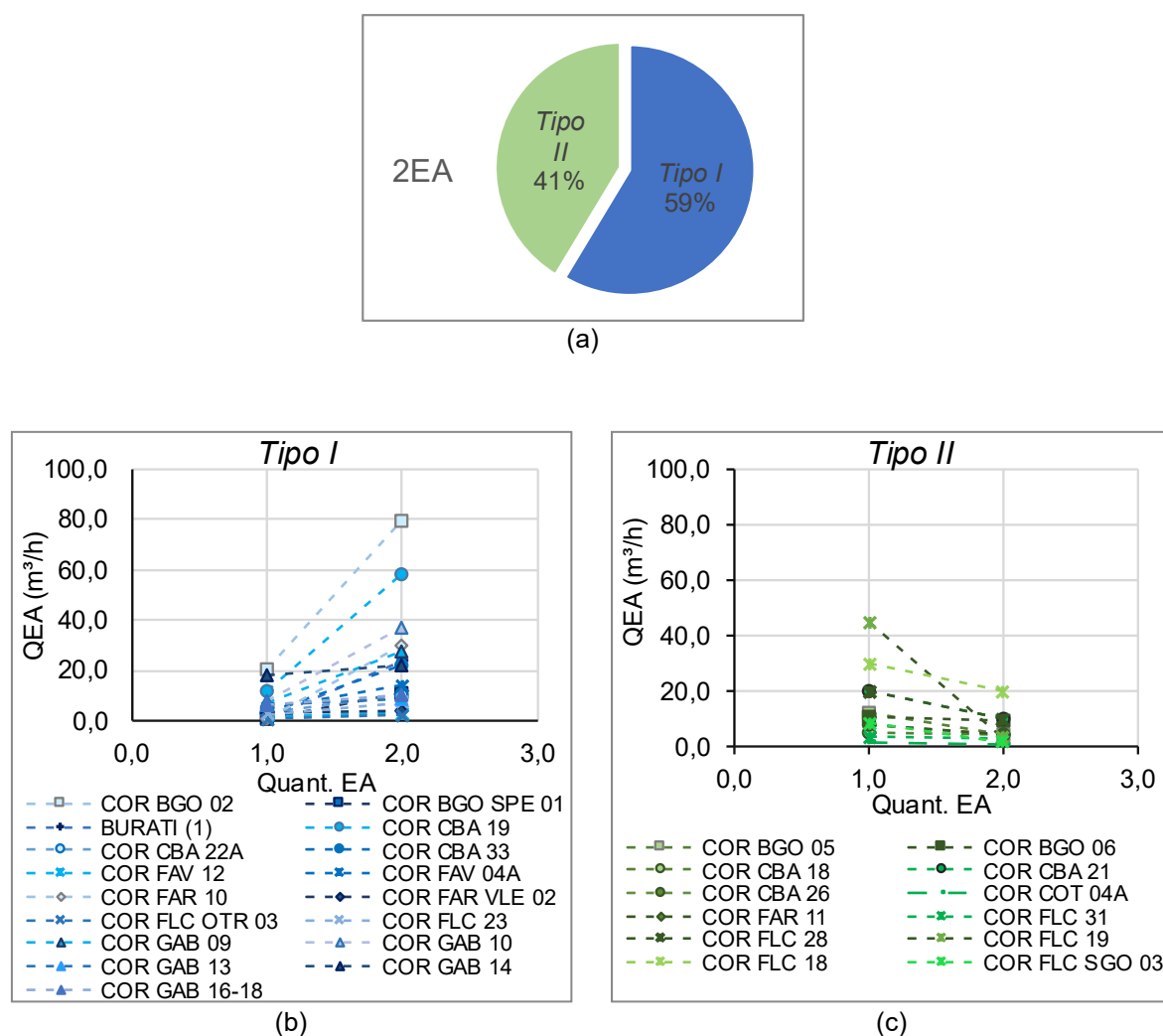


vazões significativas ( $QEA_{máx.}$ ), devem estar associadas à presença de estruturas nessas rochas, que não foram descritas nos perfis geológicos.

A avaliação da relação entre as QEA e a quantidade de EAs foi realizada para os grupos de poços tubulares que apresentaram mais de 1 EA. Além disso, foi avaliado o comportamento (se crescente ou decrescente) entre a QEA e a profundidade de EA, sendo que para isso foram definidos tipos de comportamentos, denominados de Tipo I, Tipo II ou Tipo III.

Nos poços tubulares com 2 EA (Figura 6) foram identificados dois comportamentos distintos entre as QEAs e a quantidade de EA, tendo sido ainda verificado que os poços definidos como Tipo I, correspondentes a 59% da amostra, descrevem suas maiores QEAs em suas segundas e mais profundas EAs. Notadamente, o comportamento verificado nos poços do Tipo II (41%), apesar de inverso — ou seja, QEAs decrescentes entre a 1ª e a 2ª EA —, não apresenta QEAs acentuadamente diferentes entre si, com exceção do poço COR FLC 19 (45,0 m³/s e 3,0 m³/h).

Figura 6 - Bento Gonçalves, Carlos Barbosa, Cotiporã, Fagundes Varela, Farroupilha, Flores da Cunha, Garibaldi e Veranópolis (RS): Representação gráfica em percentual do comportamento das QEA em relação a 2EA (a), comportamento Tipo I (b), e Tipo II (c), 2025

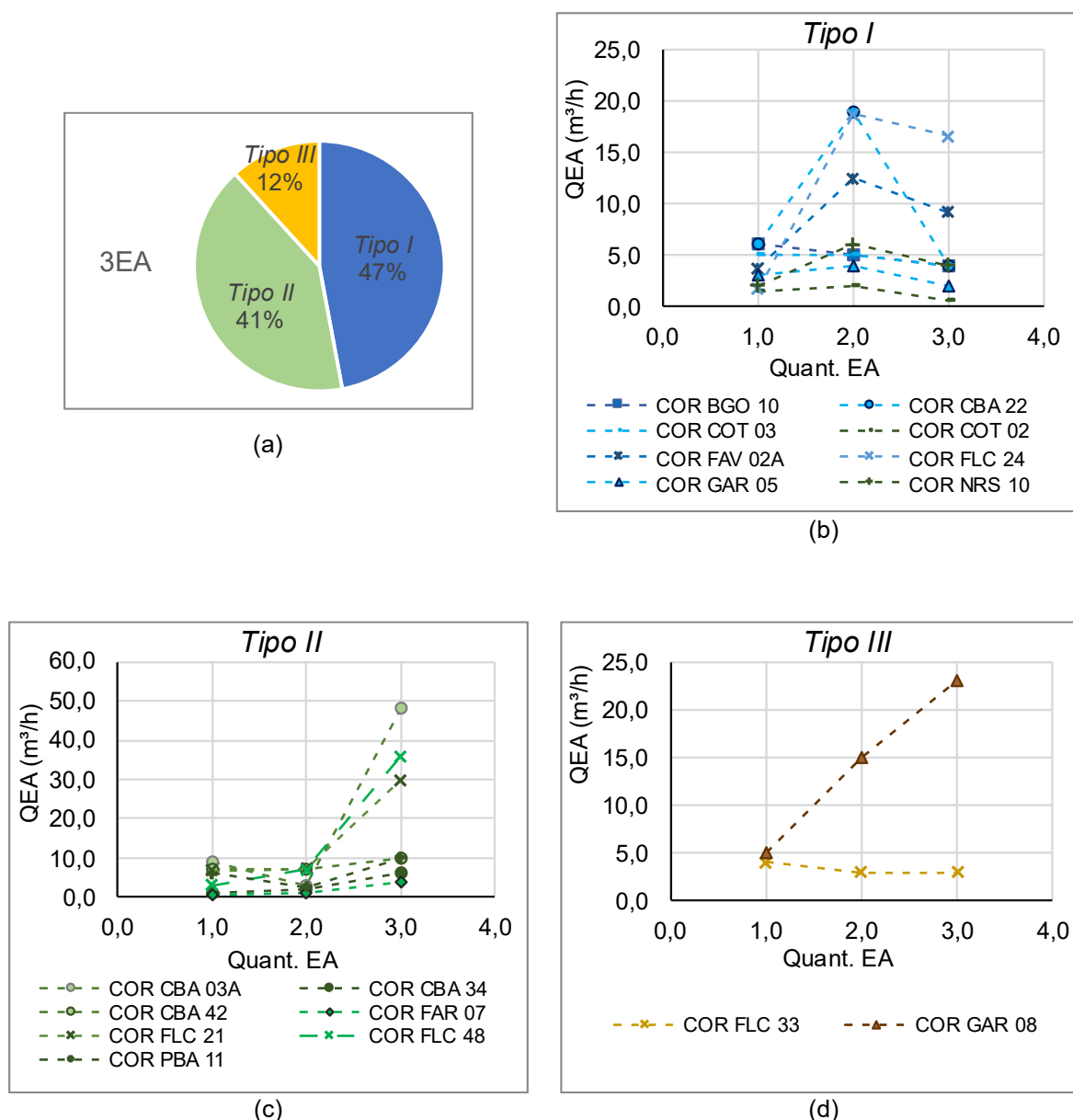


Fonte: Os autores, 2025.

Ao analisarmos os dados dos poços tubulares caracterizados por 3 EA (Figura 7), foram observados três comportamentos entre as QEAs e o número de EAs. Os poços do Tipo I (47%) apresentaram um aumento similar ao encontrado na Figura 6(b). Entretanto, as QEAs atribuídas às terceiras EAs expressaram valores menores do que suas antecessoras, registradas ao longo do mesmo perfil geológico. Quando verificados os comportamentos dos poços do Tipo II (41%), as QEAs estimadas descrevem uma redução entre as duas primeiras EAs, não ultrapassando 10,0 m<sup>3</sup>/h (Figura 7).

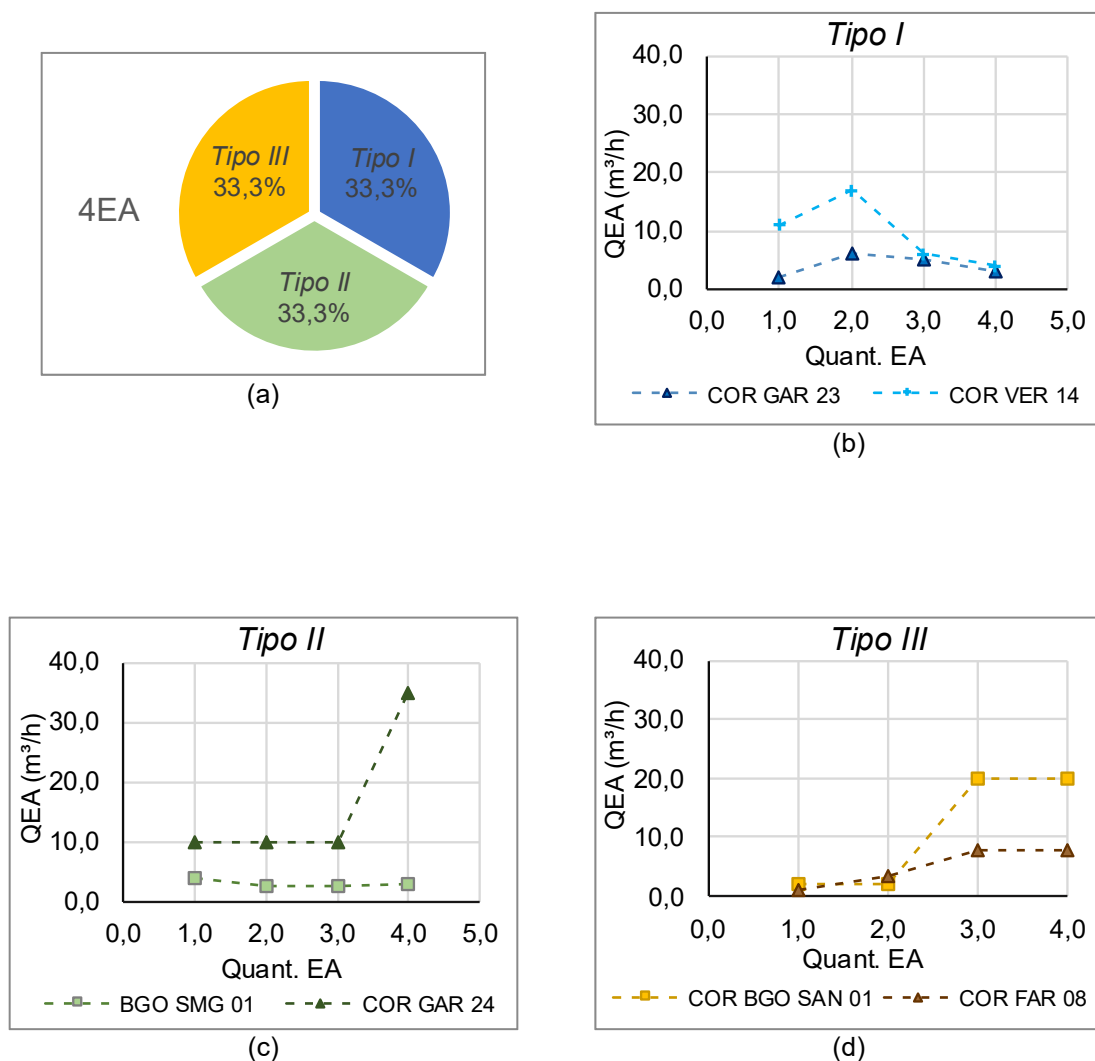
Ainda nos poços tubulares de 3 EA, COR FLC 33 e COR GAR 08, localizados nos municípios de Flores da Cunha e Garibaldi, foi constatado um terceiro tipo de comportamento (Tipo III), que, apesar de corresponder a cerca de 12% da amostra de dados, não apresenta correlação entre si ou entre os demais poços verificados (Figura 7).

Figura 7 - Bento Gonçalves, Carlos Barbosa, Cotiporã, Fagundes Varela, Farroupilha, Flores da Cunha, Garibaldi e Veranópolis (RS): Representação gráfica em percentual do comportamento das QEA em relação a 3EA (a), comportamento Tipo I (b); Tipo II (c), e; Tipo III (d), 2025.



Fonte: Os autores, 2025.

Figura 8 - Bento Gonçalves, Farroupilha, Garibaldi e Veranópolis (RS): Representação gráfica em percentual do comportamento das QEA em relação a 4EA (a), comportamento Tipo I (b); Tipo II (c), e; Tipo III (d), 2025



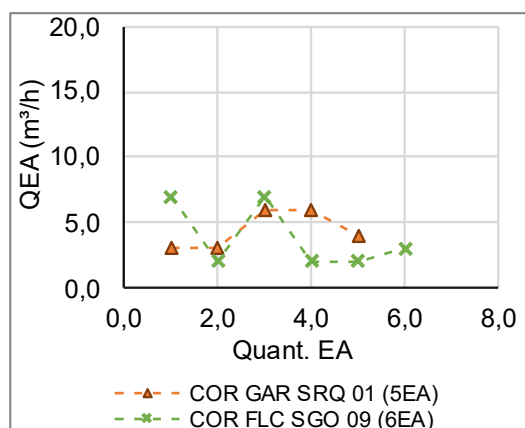
Fonte: Os autores, 2025.

Embora tenham sido descritas similaridades de comportamento das QEAs entre poços tubulares com o mesmo número de EA, por meio da classificação segmentada proposta — Tipos I, II e III —, constatou-se que o aumento do número de EA acabou por favorecer a individualização de comportamento nos poços tubulares analisados no SASG.

Os resultados obtidos permitem realizar algumas discussões importantes. Uma delas está relacionada à ocorrência de EAs associadas a rochas vulcânicas fraturadas (Grupo 4), o que é um fato esperado, pois as fraturas são consideradas os principais condicionadores no fluxo e armazenamento da água subterrânea. De acordo com Vargas et al. (2022), o conjunto de estruturas subverticais e sub-horizontais presentes nas rochas vulcânicas da região condiciona a ocorrência e o armazenamento de água, sendo que as estruturas sub-horizontais têm um papel importante na distribuição do fluxo da água subterrânea.

Assim, dependendo do tipo, quantidade, conexão e aberturas dessas estruturas, há ocorrência de diferentes vazões e, conseqüentemente, produtividade dos poços (maior transmissividade e capacidade específica).

Figura 9 - Flores da Cunha e Garibaldi (RS): Relação entre as QEA e as entradas de água dos poços tubulares com 5 e 6EA, 2025



Fonte: Os autores, 2025.

No entanto, a ocorrência de EAs associadas a rochas com estruturas vesiculares a amigdalóides não é um fator considerado ou aceito por muitos pesquisadores. Segundo Fernandes et al. (2016), as camadas vesiculares a amigdalóides não possuem muitas estruturas (em geral, quando ocorrem, são irregulares e caóticas), por isso essas camadas podem ser consideradas como barreiras hidráulicas (aquitardos). Para Fernandes et al. (2023), as estruturas que apresentam maior transmissividade estariam associadas a zonas de ocorrência de fraturamento hidráulico e zonas de peperitos e brechas.

A ocorrência de EAs associadas às camadas de rochas vesiculares a amigdalóides já foi registrada em diferentes trabalhos, que demonstram a importância dessas camadas para o fluxo e o armazenamento da água subterrânea. Segundo Reginato et al. (2015), a circulação de água nas rochas vulcânicas está associada a diferentes estruturas, sendo que a região de ocorrência de zonas vesiculares a amigdalóides ou de brechas vulcânicas tem grande importância, ainda mais que essas zonas estão associadas a contatos entre derrames. Para Elsenbruch (2017), as zonas de contato entre derrames e de ocorrência de brechas e rochas vesiculares são as principais zonas responsáveis pelo fluxo e armazenamento da água subterrânea. Por fim, Sanferari et al. (2022) identificaram a ocorrência de EAs associadas a contatos entre derrames ácidos e básicos, sendo que, junto a esses contatos, há ocorrência de brechas vulcânicas, zonas vesiculares a amigdalóides e camadas de rochas alteradas.

Para Peterlini et al. (2020), as zonas de ocorrência de rochas vesiculares a amigdalóides apresentam diferentes comportamentos, dependendo se há ou não ocorrência de fraturas associadas. Nas áreas onde há ausência de fraturas, não foi observada correlação entre a espessura das zonas vesiculares a amigdalóides e a produtividade dos poços, pois a ausência dessas estruturas só permite que a água se acumule na forma de “bolsões de água”. Assim, os poços que captam água dessas áreas tendem a perder produtividade ou mesmo esgotar. Isso também já foi identificado por Reginato et al. (2010), que demonstraram que poços que captam água associada às estruturas primárias de resfriamento das rochas vulcânicas (por exemplo, zonas vesiculares a amigdalóides) tendem a apresentar baixa transmissividade, capacidade específica e produtividade. Além disso, são poços que apresentam maior rebaixamento e dificuldade de recuperação quando da realização de ensaios de bombeamento. Por outro lado, Peterlini et al. (2020) identificaram a ocorrência de uma correlação entre a produtividade dos poços e a presença de zonas vesiculares a amigdalóides fraturadas, demonstrando que as fraturas associadas a essas zonas têm influência no processo de circulação e armazenamento, bem como na produtividade dos poços.

Segundo Navarro et al. (2020), as zonas vesiculares a amigdalóides, que são feições de topo e de derrame, tendem a apresentar maior porosidade e permeabilidade, favorecendo o fluxo e a circulação, que é aumentada pela presença de fraturas ou pela alteração. Segundo os autores, o intemperismo dessa região de topo de derrame proporciona aumento da porosidade e permeabilidade, fazendo com

que a região de contato entre derrames seja uma interessante zona aquífera em pacotes de rochas vulcânicas.

As variações de vazões, tanto máximas (QEA\_máx.) quanto mínimas (QEA\_mín.), que ocorrem associadas às litologias do Grupo 2 (rochas com estruturas amigdalóides e/ou vesiculares) e Grupo 4 (basaltos fraturados) podem ser explicadas de diferentes formas. As camadas de rochas com estruturas amigdalóides e/ou vesiculares apresentam diferentes espessuras, bem como podem apresentar diferentes graus de fraturamento; por isso, há ocorrência de diferentes vazões associadas às entradas de água (QEA). Já o Grupo 4, representado por basaltos fraturados, pode apresentar diferentes tipos de estruturas tectônicas e graus de fraturamento, bem como estruturas primárias (disjunções verticais ou horizontais), o que influencia a vazão da entrada de água (QEA). Segundo Peterlini et al. (2020), as estruturas do tipo juntas de resfriamento não são muito favoráveis à circulação e ao armazenamento de água; por isso, não é possível identificar correlação entre essas estruturas e a produtividade dos poços.

Outro ponto que deve ser discutido é o comportamento das variações de vazões das EAs, dependendo do número e da profundidade de ocorrência da entrada de água. Os resultados indicam que o comportamento do aumento ou diminuição da vazão, com a ocorrência de maior número de entradas de água e maior profundidade, é variável, pois há poços que tendem a aumentar a vazão com o aumento da quantidade e profundidade de ocorrência de EAs (Tipo I), mas há poços que demonstram efeito contrário (Tipo II e Tipo III). Isso ocorre porque cada uma das EAs pode estar associada a diferentes litologias e estruturas (tectônicas, de resfriamento, contatos entre derrames, zonas vesiculares a amigdalóides), que estão associadas ao pacote de rochas vulcânicas existente na região onde foi perfurado o poço. Assim, cada região pode apresentar diferentes características geológicas e estruturais; por isso, os poços acabam por interceptar mais de uma EA, que apresenta diferentes vazões associadas. Assim, o comportamento de um local pode ser de aumento de vazão (Tipo I), mas, em outro, pode ocorrer o efeito contrário (Tipo II) ou variável (Tipo III).

No entanto, os resultados encontrados neste trabalho corroboram e demonstram a importância da ocorrência de zonas de rochas vesiculares a amigdalóides, de basaltos fraturados, bem como de brechas vulcânicas, como as zonas mais favoráveis ao fluxo e ao armazenamento da água subterrânea no SASG. Assim, essas zonas devem ser consideradas em estudos de prospecção e captação de água subterrânea do SASG, bem como em estudos de avaliação de recarga, reservas e gestão desse importante recurso hídrico.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio das análises estatísticas desenvolvidas, considerando as características hidrogeológicas das EA (QEA e número de EA) e suas respectivas descrições litológicas, foi possível identificar que: 49% das EAs são compostas pela presença de rochas com estruturas amigdalóides e/ou vesiculares em seus perfis geológicos; 27% são compostas por basaltos descritos como fraturados; 13%, por basaltos alterados e fraturados; 10%, generalizadas como camadas litológicas de basalto/riolitos, sem fraturas ou alterações; e 1% das EAs apresentaram brechas ou juntas injetáveis.

As QEAs superiores a 60,0 m<sup>3</sup>/h foram verificadas em perfis nos quais predominam basaltos com a existência de fraturas de diferentes intensidades (pouco ou muito fraturadas). Enquanto isso, grande parte das QEAs observadas (Grupo 2) registrou valores inferiores a 10,0 m<sup>3</sup>/h. As QEA\_mín., de 0,2 a 3,0 m<sup>3</sup>/h, independentemente do número de EA verificado, foram atribuídas à ocorrência de amígdalas, vesículas ou mesmo combinações de ambas, com ou sem a presença de fraturas no basalto de origem (Grupos 2 e 4). Os maiores valores de QEA\_máx., de 90,0 e 79,6 m<sup>3</sup>/h, foram extraídos de poços com 1 e 2 EA.

Em síntese, foram detectadas semelhanças de comportamento entre as QEAs e o número de EA, principalmente para os poços compostos de 2 e 3 EA. Já os poços com a presença de um número maior de EA não demonstraram a mesma correspondência entre essas características. Por fim, concluiu-se que a heterogeneidade e anisotropia, inerentes ao SASG como aquífero fraturado, refletem diretamente nas EA e, consequentemente, na produtividade verificada nos poços tubulares da região do Sistema Aquífero Serra Geral.



## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPERGS – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul, pelo financiamento do projeto (Termo de Outorga 23/2551-0001914-0 – Edital FAPERGS/CNPq 07/2022 – Programa de Apoio à Fixação de Jovens Doutores no Brasil), à Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) pelas informações e apoio técnico fornecidos, e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela infraestrutura. Esse trabalho compõe segmento do Projeto de Pesquisa intitulado: “Análise e Interpretação de Estruturas Condicionantes de Fluxo e Circulação de Água Subterrânea no Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul”.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, A. S.; REGINATO, P. A. R.; VARGAS, T. de; CARLOS, F. S.; BORTOLIN, T. A. Produtividade de Poços Tubulares Caracterizados por 2 duas Entradas de Água, localizados no Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) – RS. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA PARA O MEIO AMBIENTE, 8., 2025, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves, RS. Universidade de Caxias do Sul, 2025. p.1-6.
- BORTOLIN, T. A. **Estudo da recarga de Sistema Aquífero Serra Geral na bacia hidrográfica Taquari-Antas**. 2018. 200f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/188220>. Acesso em: 21 fev. 2025.
- BORTOLIN, T. A.; REGINATO, P. A. R.; LEÃO, M. I.; SCHNEIDER, V. E. Relação entre padrões Hidroquímicos e as profundidades de fraturas com entradas de água em rochas vulcânicas ácidas da Formação Serra Geral. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 30, n.1, p 99-108. 2016 DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v30i1.28585>
- CASSALI, G. T.; REGINATO, P. A. R.; ROSA, M. L. C. da C. Avaliação da Vulnerabilidade e do Risco Potencial de Contaminação de Água subterrânea no Município de Venâncio Aires – RS. **Associação Brasileira de Águas Subterrâneas**. Seção Estudos e Notas Técnicas, 2018. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29942/19327>. Acesso em: 4 abr. 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v34i3.29942>.
- ELSENBRUCH, D. S. **Relação dos Condicionantes Geológicos com a Produtividade dos Poços do Sistema Aquífero Serra Geral na Região Nordeste do Rio Grande do Sul**. 2017. 62f. Dissertação (Mestrado em Geologia, Geologia Sedimentar). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2017.
- FERNANDES A.J.; ROULEAU, A; VARGAS Jr. E. do A. **Structural Geology Applied to Fractured Aquifer Characterization**. The Groundwater Project. 2023. 189p. DOI: <https://doi.org/10.21083/978-1-77470-009-9h>.
- FERNANDES A.J., MALDANER C.H., NEGRI F., ROULEAU A., WAHNFRIED I. Aspects of a conceptual groundwater flow model of the Serra Geral basalt aquifer (São Paulo, Brazil) from physical and structural geology data. **Hydrogeology Journal**. v.24, n. 5, p.1199-1212. 2016. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10040-016-1370-6>
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIS ROESSELER/RS. **Base Cartográfica**: Seção 1 – Hidrografia. Escala 1:25.000. Disponível em: <https://ww2.fepam.rs.gov.br/bcrs25/>. Acesso em: fev.2025.
- FREITAS, M.A. DE; BINOTTO, R.B.; NANNI, A.S; RODRIGUES, A.L.M.; BORTOLI, C.R. Avaliação do potencial hidrogeológico, vulnerabilidade intrínseca e hidroquímica do Sistema Aquífero Serra Geral no Noroeste do RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.17, n.2, p.31-41,, 2012. DOI:[10.21168/rbrh.v17n2.p31-41](https://doi.org/10.21168/rbrh.v17n2.p31-41)
- KIRCHHEIM, R. E.; MATTIUZI, C. D. P.; FIGUEIRA, S. V. Hidrogeologia e Faciologia dos Derrames Serra Geral em SC: O SIAGAS como Ferramenta de Análise. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20.; ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 18., 2013,

Bonito-MS. **Anais**[...], 2013. p.1-8.,. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/1117>. Acesso em: 2 abr. 2025.

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.

MICROSOFT CORPORATION. Microsoft Excel: Versão 365. Redmond, WA: Microsoft, 2024.

NAVARRO, J.; TERAMOTO, E. H.; ENGELBRECHT, B. Z.; KIANG, C. H. Assessing hydrofacies and Hydraulic properties of basaltic aquifers derived from geophysical logging. **Brazilian Journal of Geology**. v.50, n.4, p.1-12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-48892020200013>

PETERLINI, G.; PINESE, J. P. P.; CELLIGOI, A. Fatores Geológicos e Pedológicos que Influenciam na Produtividade Hídrica do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) na Região Norte do Estado do Paraná. **Revista Caminhos de Geografia**. v.21, n.78, p. 173-191, 2020. DOI: <http://doi.org/10.14393/RCG217853137>.

QGIS Development Team. Versão 3.40.5. Open Source Geospatial Foundation Project, 2025. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>. Acesso em: 04 março 2025.

QUAGGIO, C. S.; GASTMANS, D.; KIRCHHEIM, R.; BATISTA, L. V. Variações na composição das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral em território brasileiro e sua relação com anomalias hidrogeoquímicas. **Revista Águas Subterrâneas**. v.32, n.3, p. 283-294, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v32i3.29085>.

REBOUÇAS, A. da C.; FRAGA, C. G. Hidrogeologia das Rochas Vulcânicas do Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**. [S. l.], n.12, p.30-55, 1988. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v12i1.11282>.

REBOUÇAS, A. da C. **Recursos Hídricos Subterrâneos da Bacia do Paraná – Análise de Pré-Viabilidade**. 1976. 152f. Tese (Doutorado Livre Docência). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.44.2014.tde-02062014-141431>.

REGINATO, P.A.R.; LEÃO, M. I.; BORTOLIN, T. A.; DUTRA, T. de O.; ATHAYDE, G. B.; ATHAYDE, C. de V. M. Circulação da água subterrânea nas rochas vulcânicas da formação Serra Geral na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 15., 2015, Bento Gonçalves-RS. **Anais** [...]. Bento Gonçalves, 2015. p.1-8.

REGINATO, P.A.R.; AHLERT, S.; GILIOLI, K. C. Hidrodinâmica de diferentes aquíferos fraturados associados à formação Serra Geral na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16; ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 17., 2010, São Luís-MA. **Anais** [...]. São Luís, 2010. p.1-9. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22990/15107>. Acesso em: 24 mar. 2025.

REGINATO, P. A. R.; STRIEDER, A. J. 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, 13., 2004. **Anais** [...]. p.1-9. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23398/15487>. Acesso em: 2 abr. 2025.

RODRIGUES, D. S.; CAMPOS, J. E. G. Amostragem em Estudos Hidroquímicos e Isotópicos em Águas Subterrâneas: A importância do conhecimento dos perfis dos poços para a interpretação de dados. **Derbyana**, [S. l.], v. 45, e819, 2024. DOI: 10.69469/derb.v45.819.

SANFERARI, A; REGINATO, P.A.R.; QUILLFELDT, S.D. O contato entre derrames vulcânicos como condicionante da ocorrência e da produtividade de aquíferos fraturados. **Revista Águas Subterrâneas**. v.36, n.2, e-30137, p. 1-17, 2022. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v36i2.30137>.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Levantamento geológico integrado da bacia hidrográfica do Guaíba**: carta geológica: FolhaSH.22-V-D – Caxias do Sul. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. Porto Alegre (Brasil). 1 mapa color. Escala 1:250.000. Material cartográfico. (2010). Disponível em: <https://geosgb.sgb.gov.br/downloads/#>. Acesso em: 15 fev. 2025.

---

SOUZA, M. E. R. **Variação do Nível de Água e Métodos de Recarga no Sistema Aquífero Serra Geral (SASG): Estudo de uma Bacia Hidrográfica Experimental Localizada no município de Caxias do Sul, RS**. 2022. 107f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/253184>. Acesso em: 2 abr. 2025.

VARGAS, T.; BOFF, F.E.; BELLADONA, R.; FACCIONI, L.F. REGINATO, P.A.R.; CARLOS, F.S. 2022. Influence of geological discontinuities on the groundwater flow of the Serra Geral Fractured Aquifer System. **Groundwater for Sustainable Development**. [S. l.], v. 18, p.1-14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100780>.

---

Recebido em: 17/04/2025

Aceito para publicação em: 28/08/2025