

Avaliação hidrogeológica quali-quantitativa do aquífero fraturado Serra Geral, localizado no noroeste do Rio Grande do Sul

Hydrogeological quali-quantitative assessment of Serra Geral fractured aquifer in northwest of Rio Grande do Sul

Malva Andrea Mancuso¹ , Caroline Emiliano Santos¹ 

¹Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Linha 7 de Setembro, s/n, BR 386, km 40, CEP 98400-000, Frederico Westphalen, RS, BR (malvamancuso@ufsm.br; caroline_emiliano@hotmail.com)

Recebido em 23 de outubro de 2020; aceito em 26 de janeiro de 2021

Resumo

Um dos maiores aquíferos do Rio Grande do Sul é o aquífero fraturado Serra Geral. Ele corresponde a uma importante fonte de abastecimento de água para 46% dos municípios. Este estudo objetiva avaliar a influência do sistema de fraturas do sistema aquífero Serra Geral na produtividade e na qualidade das águas subterrâneas. Testes estatísticos, integrando parâmetros estruturais, hidrodinâmicos e hidroquímicos, foram realizados utilizando o programa estatístico PAST. A área de estudo abrange o município de Frederico Westphalen. A maior parte (75%) das captações do município não ultrapassa 186 m de profundidade. As captações que interceptam mais de uma zona de fratura têm maior capacidade específica (até 19,8 m³/h/m) e são menos profundas do que as que interceptam uma única zona de fratura. As vazões são da ordem dos 8 m³/h. Os poços próximos aos maiores lineamentos interceptam frequentemente várias zonas de fraturas e apresentam: estradas de água, nível dinâmico e estático menos profundos, maior vazão e maior capacidade específica em relação aos poços próximos a lineamentos menores. Os níveis piezométricos indicam tendência regional de escoamento de oeste para leste e nordeste. Predominam águas bicarbonatadas sódicas, sendo mais carbonatadas e mais cloretadas as águas de poços que interceptam uma única zona de fratura. O pH, entre 7 e 9,9, aumenta com a proximidade dos lineamentos e com o aumento da profundidade da captação. Apesar de 78% das águas apresentarem qualidade nos padrões de potabilidade para consumo humano, há poços com concentrações de ferro total e de fluoreto acima do permissível. Há indícios de contribuição de águas salinizadas de aquíferos mais profundos (fluxo ascendente) em poços que exploram o sistema aquífero Serra Geral.

Palavras-chave: Rochas basálticas; Estruturas lineares; Hidrodinâmica; Hidrogeoquímica; Sistema aquífero Serra Geral.

Abstract

The Serra Geral fractured aquifer (SASG) is one of the largest aquifers in Rio Grande do Sul state, Brazil, and it constitutes an important source of water supply for 46% of the counties. The present study aims to assess the influence of the SGAS fracture system on the productivity and groundwater quality. For this purpose, statistical tests were carried out, integrating structural, hydrodynamic, and hydrochemical parameters, by using PAST statistical software. The study area is the county of Frederico Westphalen. Most of the pumping wells (75%) do not exceed 186 m in depth. The wells that intercept more than one fracture zone have higher specific capacity (up to 19.8 m³/h/m) and are less deep than those that intercept a single fracture zone. The flow rate is around 8 m³/h. In comparison with wells close to smaller lineaments, those close to the largest lineaments often intersect several fracture zones and have inflow, dynamic, and static levels which are less deep, and higher flow rate and specific capacity. Potentiometric levels show a regional trend flow from west to east and northeast. Waters are mostly sodium bicarbonated, and well waters that intercept a single fracture zone are more carbonated and chlorinated; pH ranges from 7 and 9.9, increasing with the proximity of the lineament and with the increasing depth of the well. Water quality of 78% of wells is within standards for human consumption, but there are some cases with total iron and fluoride concentrations above the allowed levels. There is evidence of saline water contribution from deeper aquifers (upward flow) in wells that explore the SASG.

Keywords: Basaltic rock; Linear structures; Hydrodynamics; Hydrogeochemistry; Serra Geral aquifer system.

INTRODUÇÃO

A exploração da água subterrânea no Brasil é intensa (ANA, 2010), com 52% dos 5.570 municípios brasileiros sendo abastecidos total (36%) ou parcialmente (16%) por águas subterrâneas. Poços artesianos e fontes drenadas (nascentes) são utilizados para abastecimento humano e outros fins, como irrigação e dessedentação de animais. Estima-se que haja no país cerca de 400 mil poços perfurados sobre diversos aquíferos que, dependendo da sua geologia e das condições climáticas, são utilizados para o abastecimento (Zoby e Matos, 2002).

A Região Sul concentra 17,4% dos poços perfurados no país, dos quais 35% (19.512) estão localizados no estado do Rio Grande do Sul (CPRM, 2020). A importância do abastecimento de água por fontes subterrâneas é constatada pela Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2008), de acordo com a qual o Rio Grande do Sul tem 430 (86,7%) municípios abastecidos por poços profundos e 18 (3,6%) por poços rasos. Trata-se de percentual bem superior aos 39,3% dos municípios que utilizam captações de fontes superficiais (195 municípios). Um mesmo município pode apresentar mais de um tipo de captação (superficial, poço raso e/ou poço profundo), destacando-se que o abastecimento conjunto por poços profundos e captação superficial ocorre em 144 municípios (29,0%) e, em menor proporção, poço raso e captação superficial (1,6%), poços rasos e profundos (3,0%) e os três simultaneamente (1,4%). Entretanto, a maioria (56,0%) dos municípios do estado é abastecida exclusivamente por poços profundos, enquanto 10,1% são abastecidos exclusivamente por fonte superficial (IBGE, 2008).

A oferta hídrica do estado também se vê afetada por problemas de poluição e contaminação, principalmente em relação às captações de águas superficiais (em 37,0% delas), o que ressalta a importância das fontes de água subterrânea para o abastecimento, cujo percentual de poluição ou contaminação é consideravelmente inferior (10,0%) (IBGE, 2008). A qualidade da água subterrânea é um dos aspectos que contribui para a sua utilização como fonte de abastecimento, somado à precariedade ou à inexistência de serviços públicos de distribuição de água potável em zonas rurais ou áreas afastadas dos centros urbanos (Machado et al., 2016; Baum et al., 2015; Formentini et al., 2016), que é evidenciado pelo elevado número de domicílios abastecidos por poços ou nascentes (52,1%) (IBGE, 2015). Em relação às áreas urbanas, o percentual de abastecimento exclusivo por mananciais de águas subterrâneas é ainda maior, 58,0% (284 municípios), e 32,0% (156 municípios) com abastecimento por manancial superficial/misto (ANA, 2010).

Apesar da sua elevada demanda, principalmente para atender às comunidades isoladas que se encontram em zonas onde esse recurso representa a única fonte de água

para abastecimento, nem sempre é possível a sua utilização. Estudos regionais indicam que a constituição geológica dos aquíferos limita o uso das águas subterrâneas, por alterar as características químicas da água meteórica, como resultado dos processos geoquímicos atuantes no arcabouço rochoso (Mancuso et al., 2013, 2014b, 2015; Silva et al., 2014). A qualidade da água também pode ser modificada pela presença de estruturas geológicas, como falhas e fraturas, que atuam como meio de conexão entre aquíferos rasos e profundos, possibilitando a mistura entre águas com diferentes características geoquímicas (Machado, 2005; Machado e Freitas, 2000).

Um dos maiores aquíferos do Rio Grande do Sul é o Aquífero Serra Geral (SASG). Pela sua dimensão espacial, com 143.818 km², cobre 54% da superfície do estado (CPRM, 2005) e constitui importante, muitas vezes única, fonte de abastecimento de água dos municípios localizados sobre ele (ANA, 2010).

Considerando a dependência hídrica do aquífero fraturado da Formação Serra Geral (FSG) no noroeste do Rio Grande do Sul (Formentini et al., 2016), que abastece 90,1% dos municípios da região (Região Funcional de Planejamento RF9) (IBGE, 2008), o presente estudo teve como objetivo avaliar a influência do sistema de fraturas das rochas vulcânicas na produtividade e na qualidade das águas subterrâneas do SASG, com base em dados hidrogeológicos e estruturais.

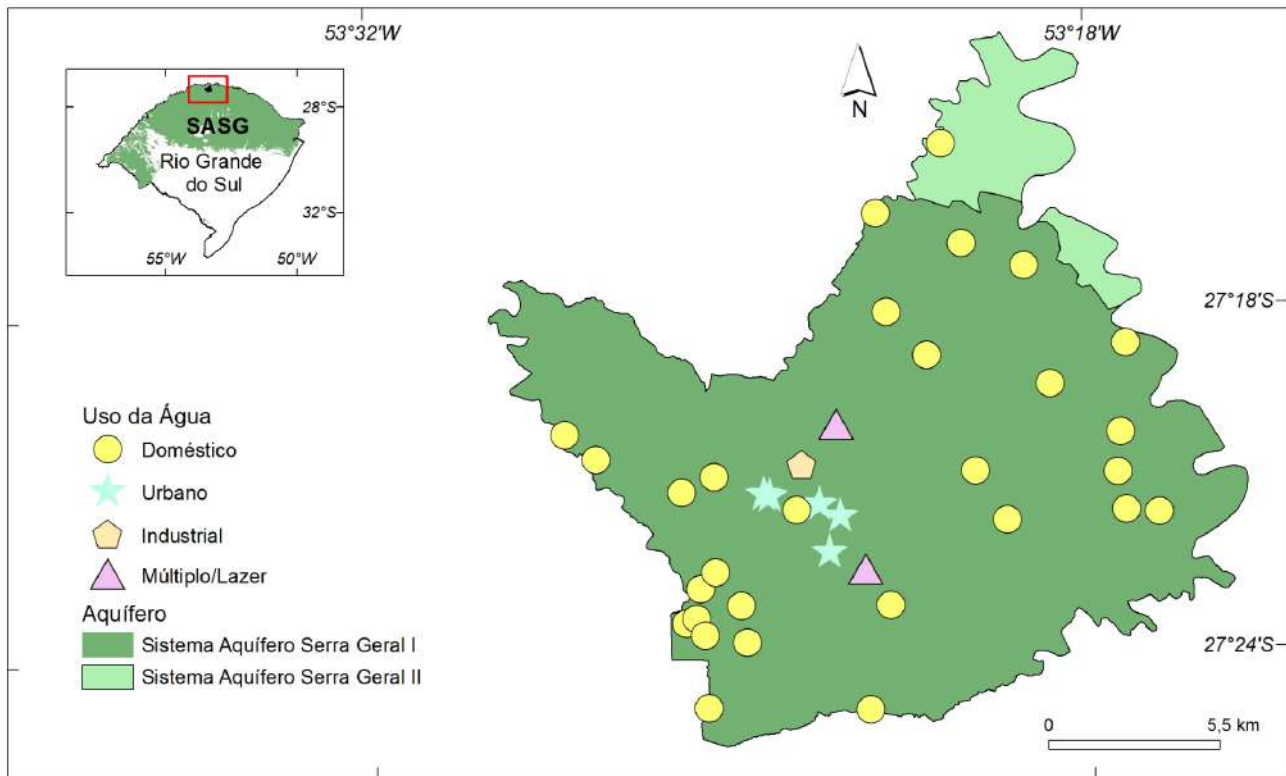
CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área piloto para a realização do estudo é o município de Frederico Westphalen (Figura 1), que ocupa uma área de 265 km² da região do Alto Uruguai, a noroeste do estado do Rio Grande do Sul. O município pertencente à Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea e possui uma população de 28.843 habitantes, 81% dela concentrada na zona urbana e 19% com residência na zona rural (IBGE, 2010).

O clima da área é do tipo Cfa (Köppen, 1931), temperado, subtropical úmido, com estações de verão e inverno bem definidas, com ocorrência de precipitação em todos os meses do ano e inexistência de uma estação seca definida. A temperatura média anual é de 18°C, com verões quentes, e a precipitação média anual é de 2.596 mm (Baum et al., 2015).

A rocha aflorante que predomina no Rio Grande do Sul são as rochas vulcânicas da FSG, que cobrem 54% do território do estado. Frederico Westphalen faz parte dos 368 municípios que têm mais de 50% do território sobre a FSG e está entre os 232 municípios que têm 100% da sua área sobre ela (Wildner et al., 2007).

Os basaltos aflorantes no município de Frederico Westphalen fazem parte do tipo Pitanga-Paranapanema, estando situados estratigraficamente logo abaixo do pacote das vulcânicas ácidas tipo Chapecó-Palmas (Dias e Parisi, 2007).



Fonte: Dados hidrogeológicos CPRM (2005, 2020).

Figura 1. Localização dos poços de abastecimento em operação no Sistema Aquífero Serra Geral I e II, no município de Frederico Westphalen (RS).

O conjunto de estratos intercala horizontes de arenito e/ou siltito nas cores avermelhadas e esverdeadas. Esses basaltos têm tonalidades variando de cinza-escuro a preto e castanho esverdeado (ocorrem variedades porfíricas e microporfíricas). A matriz porfírica apresenta fenocristais de plagioclásio e clinopiroxênio, com mineralogia constituída de: plagioclásio (56 a 65%), clinopiroxênio (25 a 38%), relictos de olivina (4 a 8%), opacos (1 a 2%), argilominerais (traço) e apatita (traço) (Dias e Parisi, 2007). Intercalados às corridas de lavas ocorrem isoladamente tufos riolíticos.

A FSG é o arcabouço geológico do SASG e tem a sua principal porosidade relacionada às zonas de fraturas da rocha. Do ponto de vista hidrogeológico, o SASG é classificado em SASG I, SASG II e SASG III. O município de Frederico Westphalen tem 92% do território sobre o SASG I, formado por rochas basálticas, amigdaloides, fraturadas e capeadas por espessa capa de solo avermelhado, que se configura como um aquífero com alta a média possibilidade para águas subterrâneas, onde predominam poços com capacidades específicas entre 1 e 4 m³/h/m (CPRM, 2005). Na porção norte do município, ocupando 8% do território, predominam os riolitos, riodacitos e, em menor proporção, os basaltos fraturados, correspondendo ao aquífero SASG

II, que tem média a baixa possibilidade para águas subterrâneas em rochas com porosidade por fraturas e capacidade específica inferior a 0,5 m³/h/m (CPRM, 2005) (Figura 1).

A recarga média da zona de alteração dos basaltos da FSG (aquífero livre) varia em função do uso do solo, sendo quantificada em 11,6% da precipitação na área urbana de Frederico Westphalen (Baum et al., 2015) e em 23,0% da precipitação em zona de Mata Atlântica preservada (Pasini et al., 2021).

O município de Frederico Westphalen beneficia-se de um sistema de abastecimento misto (águas superficiais e águas subterrâneas), com predomínio do uso de águas subterrâneas em comunidades rurais (uso doméstico) (Figura 1) e de águas superficiais na zona urbana do município. As águas subterrâneas são utilizadas principalmente para abastecimento doméstico em zonas rurais (76%) e urbanas (17%), sendo 5% dos poços ativos de uso múltiplo e 2% utilizados para o abastecimento industrial (CPRM, 2020).

O município possui 74 poços perfurados, dos quais 40% se encontram bombeando (Figura 1) e outros 5% estão equipados (sem estar em bombeamento, mas com equipamento instalado), 16% estão parados ou não foram instalados, 24% foram abandonados e os restantes 7% estão colmatados,

obstruídos ou secos. E 4% não apresentam informação sobre a sua situação (CPRM, 2020).

METODOLOGIA

Para avaliar a influência do sistema de fraturas da FSG na produtividade e na qualidade das águas do SASG, identificaram-se, inicialmente, os principais lineamentos da FSG no município de Frederico Westphalen. Na sequência, analisaram-se os dados da hidrodinâmica do aquífero fraturado e os dados hidrogeoquímicos das águas subterrâneas coletadas do SASG. Todas as informações foram sistematizadas em Sistema de Informação Geográfica (SIG) (ArcGIS® 10.2) (ESRI, 2014) e submetidas à análise estatística integrada. Detalham-se, a seguir, as etapas desta pesquisa.

Análise estrutural

Para realizar a análise estrutural do aquífero fraturado, mapearam-se as estruturas lineares negativas em escala 1:50.000 (Hasenack e Weber, 2010), utilizando modelos sombreados com base no modelo digital de elevação SRTM (Farr e Kobrick, 2000) de 1 arc-second (30 m de resolução), com os azimutes de insolação 0, 45 e 315° e altitude de insolação de 45°. Posteriormente, geraram-se no programa QGIS os diagramas de roseta de comprimento e frequência no complemento Line Direction Histogram (versão 2.3). O diagrama de roseta ponderado apresenta o comprimento com a atribuição de maior peso para lineamentos de maior comprimento, e o diagrama de frequência contabiliza a

frequência de lineamentos de acordo com a direção. A densidade de lineamentos no município foi calculada pela razão entre o somatório do comprimento de cada lineamento e a área do município, para posterior comparação com a densidade de drenagem, calculada pela razão entre o somatório do comprimento de cada drenagem e a área do município (ambas na escala 1:50.000).

Hidrodinâmica do SASG

A caracterização hidrodinâmica do aquífero fraturado foi realizada com base em dados de nível dinâmico (ND), nível estático (NE), cota topográfica (CT), profundidade do poço (Prof.), vazão (Q), vazão específica (Q/s), entrada inicial (EI) da água, entrada final (EF) da água e número total de entradas (E), de 74 poços disponíveis no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) (CPRM, 2020) e nas fichas de cadastro de poços e ensaios de bombeamento disponibilizadas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

Para analisar a possibilidade de relação hidrodinâmica entre o SASG e o Sistema Aquífero Guarani (SAG), utilizaram-se dados de cota topográfica, NE do SAG e topo do SAG (base do SASG) de 12 poços localizados na região noroeste do Rio Grande do Sul e sudoeste de Santa Catarina (Brasil), Missiones (Argentina) e Paraguai (Tabela 1). Esses dados permitiram, por interpolação, elaborar os mapas de potenciometria inferida do SAG e de base do SASG no município de Frederico Westphalen.

Na análise de dados hidrodinâmicos dos poços instalados no SASG, considerou-se a possibilidade de mistura de

Tabela 1. Base do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e potenciometria do Sistema Aquífero Guarani (SAG) de poços localizados na região noroeste do Rio Grande do Sul e sudoeste de Santa Catarina (Brasil), Missiones (Argentina) e Paraguai.

Poço	Cidade	Latitude S	Longitude W	Cota (m s.n.m.m.)		
				Topográfica	NE do SAG	Base SASG
ITÁ-06-CPRM	Itá-CPRM	-27,283333	-52,333333	398	291,3	26
SJO-01-CORNER	São João do Oeste	-27,098611	-53,591389	305	215,6	-962
Frigorífico PRENDA	Santa Rosa	-27,916667	-54,583333	280	102,4	-835
4-AR-01-RS	Aratiba-CPRM	-27,416667	-52,300000	338	291,0	-59
Termas do Prata	São Carlos	-27,076500	-53,051400	235	265,0	-509
SAGPY035IT	Bella Vista	-27,034098	-55,575843	195	148,15	-150*
PP-BR-8145	São Miguel do Oeste	-26,731683	-53,527724	650	391,0	-550
PP-RB-8651	S. Antônio das Missões	-28,516388	-55,227222	195	139,0	82
Cerro Azul	Cerro Azul	-27,636500	-55,497500	288	71,6	-150
G1636 SLU 5	Luis Gonzaga	-28,466667	-54,966667	190	120,0	106
G1044 SNI 3A	São Nicolau	-28,183917	-55,279444	148	94,5	24
Frigorífico PRENDA	Santa Rosa	-27,916667	-54,583333	280	102,4	-835

*Valor estimado com base nos poços próximos 20055 e 20043 do mapa do teto do SAG no Paraguai; NE: nível estático.
Fonte: OEA (2009) e CPRM (2020).

águas para os poços com cota de base inferior à potenciometria do SAG no local. A possibilidade de fluxo ascendente, do SAG para o SASG, foi indicada nos poços instalados no SASG que apresentaram NE ou ND inferior à potenciometria do SAG no local.

Hidrogeoquímica das águas subterrâneas do SASG

Para a caracterização hidrogeoquímica das águas subterrâneas do SASG, utilizaram-se os seguintes parâmetros de qualidade da água: temperatura, condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD), pH, turbidez, cor, sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloretos, carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, alcalinidade, alumínio, ferro, manganês, flúor e nitratos. Os dados hidroquímicos foram obtidos no SIAGAS (CPRM, 2020).

A classificação hidroquímica das águas subterrâneas realizou-se com apoio do diagrama de Piper, com base em dados de CE, sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloretos, carbonatos, bicarbonatos e sulfatos de 32 poços. Selecionaram-se as amostras entre os 74 poços instalados no SASG, por apresentar equilíbrio iônico na análise dos componentes, de acordo com a metodologia indicada por Logan (1965).

A classificação das águas subterrâneas quanto ao risco de salinização e de sodificação do solo foi realizada com apoio do diagrama United States Salinity Laboratory (USSL), desenvolvido pelo Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos, para o qual se utilizaram os parâmetros de pH, CE, sólidos totais dissolvidos, dureza total, sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloretos, carbonatos, bicarbonatos e sulfatos. Os diagramas de Piper e USSL foram gerados no programa QualiGraf (Möbus, 2014).

Considerando que 83% das captações do SASG no município são utilizadas para o abastecimento doméstico, avaliou-se a qualidade das águas do aquífero fraturado para fins de consumo humano, tendo como referência o padrão de potabilidade constante no Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5/2017, do Ministério da Saúde (Brasil, 2017).

A caracterização e a classificação hidroquímica realizaram-se com base em dados de qualidade das águas subterrâneas de 40 poços profundos (32 que apresentaram equilíbrio iônico na análise dos componentes e 8 com dados hidroquímicos parciais) que exploram o SASG no município e que estão disponíveis no SIAGAS (CPRM, 2020), na base de dados de qualidade das águas subterrâneas da Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea (Formentini et al., 2016) e em artigos publicados (Mancuso et al., 2013, 2014b, 2015).

Análise estatística integrada

Realizou-se a análise univariada (estatística descritiva) para o conjunto de parâmetros estruturais (distância aos lineamentos:

< 250 m, 250 – 500 m, 500 – 750 m, > 750 m), hidrodinâmicos (nível dinâmico, nível estático, profundidade, vazão, vazão específica, entrada final da água e número total de entradas) e hidroquímicos (temperatura, CE, sólidos totais dissolvidos, pH, turbidez, cor, sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloretos, carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, alcalinidade total, dureza, alumínio, ferro, manganês, flúor e nitratos).

Para avaliar a influência do sistema de fraturas da FSG nas características hidrodinâmicas e hidroquímicas das águas subterrâneas do SASG, realizaram-se testes estatísticos integrando parâmetros estruturais (orientação da estrutura linear e distância ao poço) com parâmetros hidrodinâmicos (nível dinâmico, nível estático, profundidade, vazão, vazão específica, entrada final da água e número total de entradas) e hidroquímicos (temperatura, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, pH, turbidez, cor, sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloretos, carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, alcalinidade total, dureza, alumínio, ferro, manganês, flúor e nitratos).

Os dados qualiquantitativos e estruturais submeteram-se ao teste de normalidade de Shapiro Wilk. Posteriormente, aplicaram-se os seguintes testes não paramétricos: teste de correlação de Spearman para identificar o grau de associação entre variáveis (estatística bivariada) e teste U de Mann-Whitney para amostras independentes, considerando a distância do poço ao lineamento (distantes ≤ 500 m e > 500 m e distantes ≤ 1.000 m e > 1.000 m) como variável de agrupamento.

Empregou-se a análise de agrupamentos para identificar grupos de poços com características hidroquímicas e hidrodinâmicas semelhantes. As variáveis utilizadas para a análise de agrupamentos foram: temperatura, CE, sólidos totais dissolvidos, pH, turbidez, cor, sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloretos, carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, alcalinidade total, dureza, alumínio, ferro, manganês, flúor e nitratos e vazão específica, nível estático e nível dinâmico.

As análises estatísticas foram realizadas no programa Paleontological Statistics (PAST) (Hammer, 2017).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na área de estudo, identificaram-se 148 lineamentos com comprimento médio de 1,3 km. A maior frequência das estruturas lineares ocorre com orientação na faixa N-N30°W (27%) e N30°W-N60°W (24%), e a região central do município concentra a maior parte dessas estruturas (Figura 2). Dois lineamentos de grande importância, com direções N77°W (6,4 km) e N59°E (5,7 km), destacam-se na sua porção centro-sul.

Apesar da baixa frequência de estruturas, a região oeste é delimitada pela maior estrutura observada na escala de 1:50.000, com direção N36°W e 11,8 km de comprimento.

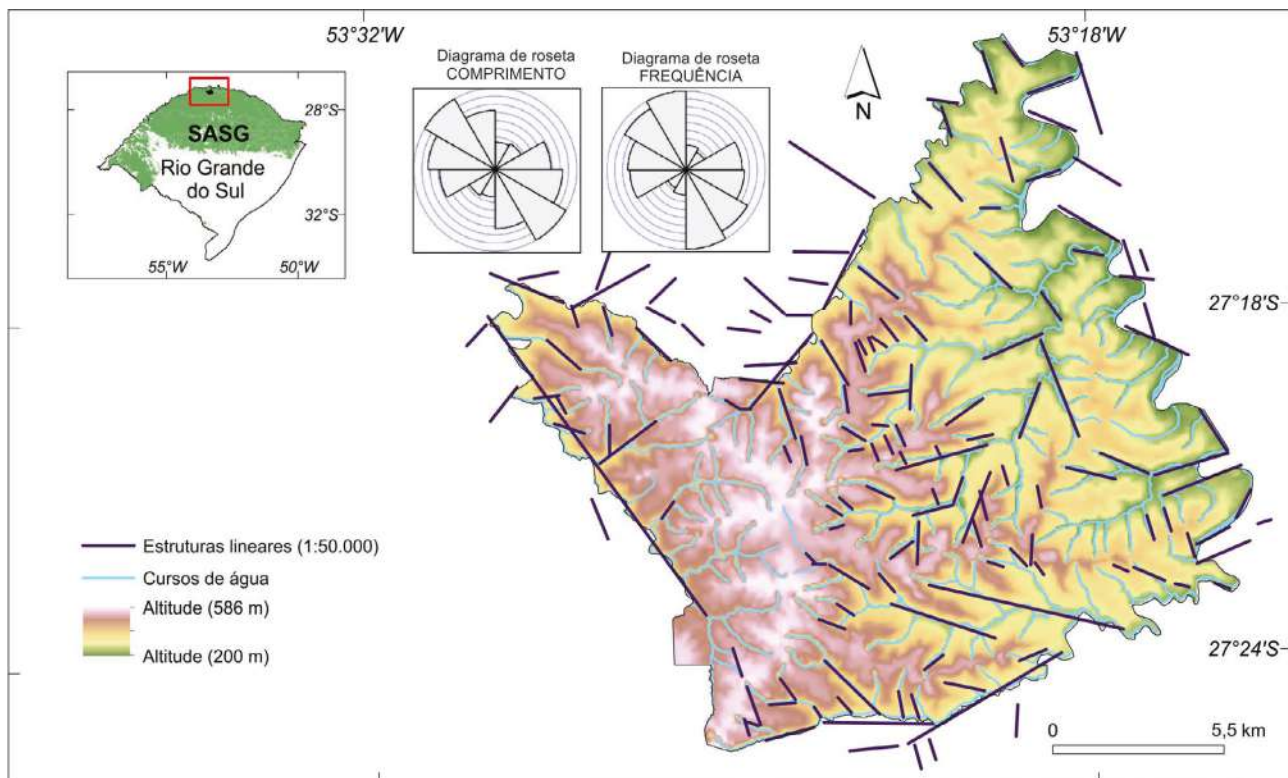


Figura 2. Estruturas lineares da Formação Serra Geral (SASG), mapeadas na escala 1:50.000, sobre o relevo e a hidrografia do município de Frederico Westphalen (RS).

Em extensão total, destacam-se as estruturas com direção N30°W e N60°W (50,6 km de comprimento total) e N60°W e N90°W (40,5 km de comprimento total). Os lineamentos com maior extensão média (para a escala 1:50.000) possuem direções no intervalo de N30°E e N60°E (1,8 km/lineamento). O mapeamento de 1.981 lineamentos morfotectônicos, realizado por imagens de satélite, permitiu identificar as direções NE-E e NW-W como sendo dominantes na região do Alto Rio Uruguai (Cunha et al., 2016).

A densidade de lineamentos é de 0,74 km/km², o equivalente a 54% da densidade de drenagem, que é de 1,36 km/km² (Figura 2).

Características hidrodinâmicas do SASG

O município tem 74 poços cadastrados no SIAGAS (CPRM, 2020). No entanto, o número de dados hidrogeológicos, construtivos e hidrodinâmicos disponíveis para análise depende do parâmetro selecionado. Na análise aqui realizada, utilizaram-se conjuntos de 45 a 71 poços para caracterizar a hidrodinâmica do aquífero fraturado (Tabela 2).

As captações do SASG têm profundidades que variam entre 40 e 528 metros, e 75% das perfurações não ultrapassam 186 m de profundidade. A base dos poços pode atingir

altitudes negativas (-36 m) nas zonas de depressões do relevo (264 m), assim como altitudes maiores (425 m) em zonas mais elevadas do relevo (539 m). A maior parte (75%) das perfurações tem a sua base inferior a 358,5 m de altitude.

A profundidade de entrada de água do poço (informada no cadastro do SIAGAS) indica, em aquíferos fraturados, a interceptação de uma zona de fratura saturada na formação rochosa. As captações do SASG no município apresentam até cinco entradas de água diferentes, como observado numa captação de 140 m de profundidade, que atingiu a altitude de 359 m na base. De 45 poços, 28% interceptam duas ou mais zonas de fratura saturada, o que não reflete numa maior vazão em relação aos poços que interceptam uma única zona de fratura (estes com mediana de 8 m³/h e vazões de até 17,8 m³/h em 75% dos casos). Contudo o maior número de entradas de água na captação resulta em ligeiro aumento da capacidade específica do poço, tanto nos valores mínimos (0,03 m³/h/m) como nos máximos (19,8 m³/h/m), indicando melhor capacidade de recuperação do sistema que se encontra interconectado.

Uma diferença significativa entre os poços que interceptam uma única zona de fratura e os que interceptam mais de uma zona é o aumento da profundidade dos níveis de água subterrânea (NE e ND) quando ocorre uma única

Tabela 2. Síntese das características construtivas dos poços e hidrodinâmica do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) no município de Frederico Westphalen (noroeste do Rio Grande do Sul).

Parâmetros	Unidade	Sistema Aquífero Serra Geral (74 poços)				
		Poços (nº)	Mínimo	Máximo	Mediana	3º quartil
Cota	m	68	211	558	465	498
Profundidade	m	71	40	528	140	186
Cota de Base	m	68	-36	425	241	358,5
Nível Dinâmico	m	51	12,36	346	95,0	126,04
Nível Estático	m	62	1,34	172,4	20,8	64,75
Vazão Específica*	m³/h/m	51	0,01	22,02	0,19	1,85
Piezometria	m	60	203,63	528	376,8	458,8
Vazão	m³/h	61	0,99	37,9	8	15,8
Entrada Inicial de Água	m	47	2,5	474	50	114
Entrada Final de Água	m	46	24	528	92	129
Nº de Entradas	--	45	1	5	1	2

*A vazão específica foi calculada com base em ensaios de bombeamento que tiveram nível estático, nível dinâmico e vazão de estabilização indicados (57% com duração ≥ 24 h, 13% com duração inferior a 24 h e 30% sem informação). Os resultados de ensaios com duração ≥ 24 h indicaram vazão específica, em m³/h/m, de: 0,02 mín., 19,8 máx., 0,34 mediana e 3º quartil de 2,09.

entrada de água no poço. Esse efeito se observa tanto no caso dos níveis de água estáticos (NE), com aumento de 66% na mediana das profundidades, que passa de 14,1 para 23,4 m, como no caso dos níveis de água dinâmicos (ND), que aumentam a sua profundidade em 39% (mediana), de 83,5 para 115,7 m.

Os poços com uma única entrada de água são mais profundos (75% atingem até 244,5 m de profundidade) em relação aos que têm mais de uma entrada de água (75% atingem até 162,7 m). Além disso, no caso de interceptar duas ou mais zonas de fraturamento, 75% dos poços têm a entrada inicial de água até os 50 m; essa profundidade aumenta para 132,5 m (165%) no caso de interceptar uma única zona de fratura. A mediana também reflete o aumento na profundidade da entrada inicial de água no poço, que passa de 36,0 para 84,5 m (136%) nas perfurações que interceptam uma única zona de fratura.

A maior parte dos poços (79% entre os que têm uma única entrada de água e 76% entre os que têm mais do que uma entrada de água) está localizada a menos de 1.000 m de um lineamento.

Nas proximidades (a menos de 1.500 m) dos maiores lineamentos (maiores que 2.200 m), os poços interceptam frequentemente (60% dos casos) várias zonas de fraturas, com entradas de água a menor profundidade, nível de água dinâmico (ND) e estático (NE) menos profundos, maior vazão (mediana 77% superior) e capacidade específica (mediana 79% superior) do que os poços instalados próximos a lineamentos menores (com até 2.200 m de comprimento), os quais interceptam uma única zona de fratura saturada (60% dos poços) e correspondem a captações mais profundas e com menor altitude de base, níveis de água mais profundos, vazões e capacidade específica inferiores.

Os níveis potenciométricos dos poços do SASG no município indicam uma tendência regional de escoamento de oeste para leste e nordeste, com cotas do nível de água subterrânea que variam de 203,6 a 528,0 m (Figura 3).

No SASG I, onde ocorrem rochas basálticas, amigdaloides, fraturadas e capeadas por espesso solo avermelhado (CPRM, 2005), predominam poços (entre os 70 perfurados) com capacidades específicas entre 1,0 e 0,6 m³/h/m (72% das instalações), 14% apresentam média de produtividade de 1,7 a 4,0 m³/h/m e 14% deles têm alta produtividade (entre 4,9 e 22,0 m³/h/m) (considerando 49 poços com informação). Os poços instalados na região norte do município, no SASG II, onde ocorrem basaltos fraturados, riolitos e riodacitos (CPRM, 2005), apresentam capacidade específica inferior a 0,4 m³/h/m (considerando dois poços com informação).

Do total de poços, 45% (21) estão instalados a uma distância de até 250 m de algum lineamento. Quando comparados os poços localizados próximos aos lineamentos (a menos de 250 m) com os poços mais distantes (a mais do que 250 m), é possível observar que os primeiros são menos profundos (75% deles apresentam profundidade inferior a 174,75 m, 15% a menos do que os outros) e apresentam os níveis estático (NE) e dinâmico (ND) mais próximos da superfície (a mediana da profundidade dos níveis é 54 e 19% inferior, respectivamente). Além disso, 27% deles interceptam mais do que uma zona de fratura saturada e estão localizados em zonas topograficamente baixas, apresentando maiores vazões (com mediana 22% superior à dos poços distantes) e maior capacidade específica (até 22 m³/h/m, e mediana 16% superior). O segundo grupo de poços mostra cinco deles com profundidades entre 50,0 e 180,5 m, 40% dos quais interceptam mais do que uma zona de fratura saturada (mais de uma zona de entrada de água a

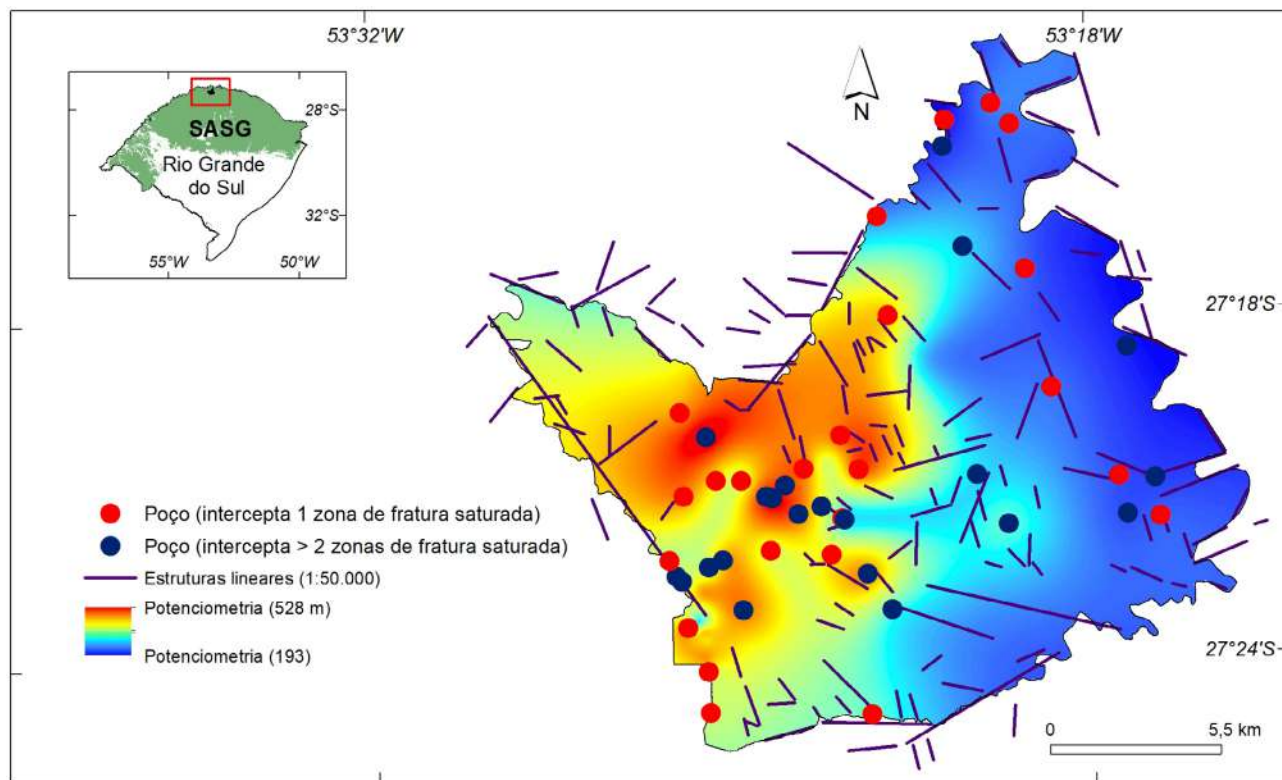


Figura 3. Tendência regional da potentiometria do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) no município de Frederico Westphalen (RS), estimada com base nos níveis potenciométricos dos poços instalados no SASG, e espacialização das estruturas lineares mapeadas na escala 1:50.000.

partir dos 15,3 m), a sudeste do lineamento, vazões médias de 14,8 m³/h e capacidade específica entre 0,2 e 7,1 m³/h/m (máxima observada em poço ao sudeste, distante 26,7 m do lineamento). Essas características indicam fraturas menores, condicionadas pela existência da fratura de maior porte.

No que se refere à possível relação hidrodinâmica entre o SASG e o SAG, não há indícios de possibilidade de artesianismo aflorante das águas do Aquífero Guarani no município (as cotas do nível estático do referido aquífero situam-se entre 178 e 213 m no município de Frederico Westphalen e encontram-se abaixo da superfície do terreno). Apesar de existirem zonas onde a potentiometria do SAG está acima da base dos poços do SASG, as cargas hidráulicas do NE do SASG são superiores às do SAG, o que levaria, em caso de conexão entre os sistemas, a uma contribuição de fluxo descendente, do SASG para o SAG, dada a diferença entre elas, à exceção do poço JP139 (que tem carga hidráulica 5 m inferior a do SAG, indicando a possibilidade de fluxo ascendente do SAG para o SASG).

Em situação de bombeamento, o ND atinge até 346 m de profundidade, com cota mínima de 142 m s.n.m.m. (com base em dados de 51 poços). Nesses casos, os rebaixamentos dos níveis de água do SASG durante o bombeamento

provocam inversão de cargas hidráulicas entre o SAG e o SASG em nove poços (JP114, JP120, JP122, JP132, JP133, JP134, JP135, JP138, JP142), indicando a possibilidade de contribuição de fluxo ascendente do primeiro para o último, em caso de conexão hidráulica entre os sistemas (Figura 4). Se isso ocorrer, a hidroquímica do SAG pode interferir na qualidade das águas do SASG.

Qualidade da água

A principal fonte de íons solúveis nas águas subterrâneas são os processos de alteração dos minerais (hidratação/hidrólise, dissolução, precipitação, oxi-redução e complexação) que compõem a rocha, sem considerar fatores externos como as contaminações, a composição das águas de recarga, entre outros.

A caracterização físico-química das águas subterrâneas presentes no SASG permitiu identificar e quantificar os principais constituintes químicos das águas do aquífero fraturado, resultantes de processos físicos e químicos do intemperismo das rochas.

Apesar de contar com 74 poços cadastrados no SIAGAS (CPRM, 2020), para caracterizar a hidroquímica do aquífero

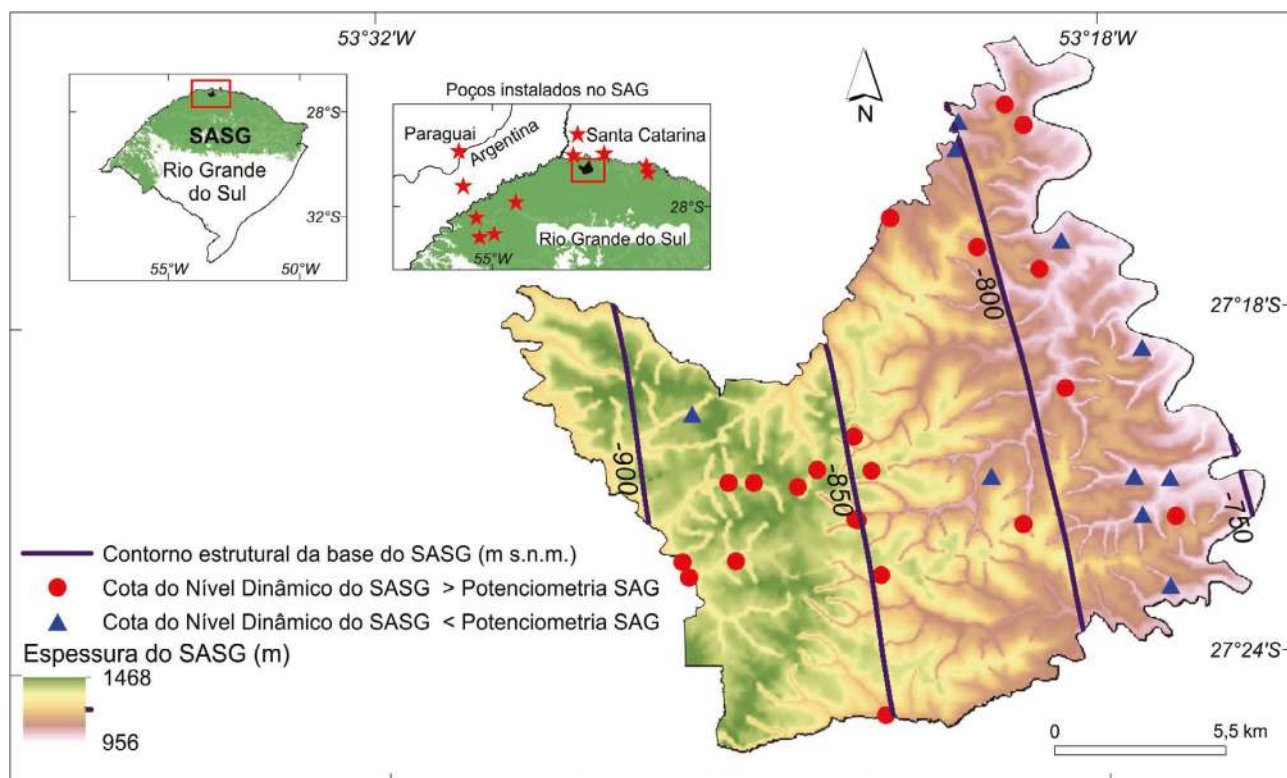


Figura 4. Espessura e contorno estrutural da base do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), com indicação da diferença entre o nível dinâmico (ND) do SASG e a potenciometria do Sistema Aquífero Guarani (SAG). Município de Frederico Westphalen (RS).

fraturado SASG foram utilizados entre 5 e 59 dados de qualidade das águas subterrâneas, dependendo da disponibilidade de dados de cada parâmetro (Tabela 3).

A composição física e química das águas reflete a mobilidade e a solubilidade dos elementos presentes no processo de intemperismo. Os cátions Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} são móveis e tendem a ser liberados facilmente, enquanto o K^+ é intermediário e o Al^{3+} e Fe^{3+} apresentam menor mobilidade na água. Assim, a biotita e o feldspato potássico podem ser fontes de Mg^{2+} e K^+ e os plagioclásios, que constituem até 65% das rochas da região (Dias e Parisi, 2007), podem ser fontes de Na^+ e Ca^{2+} . O sódio também pode ser derivado de troca catiônica com argilo-minerais e zeólitas (Freitas, 2016) que estão nos preenchimentos de horizontes vesiculares da rocha (Formação Serra Geral, fácies Parapanema), assim como os carbonatos (Wildner et al., 2007).

Os basaltos aflorantes no município (Folha Frederico Westphalen) apresentam as seguintes características lito-químicas: SiO_2 (48,2 a 50,8%), TiO_2 (2,18 a 3,71%), Fe_2O_3 (14,90 a 15,94%), CaO (8,08 a 10,05%), K_2O (0,91 a 1,64%), P_2O_5 (0,25 a 0,60%), MnO (< 0,24%), Cr_2O_3 (< 0,025%), Rb (15 a 30 ppm), Sr (266 a 498 ppm), Y (29 a 44 ppm), Zr

(142 a 258 ppm), Nb (12 a 25 ppm), Ba (307 a 520 ppm) (Dias e Parisi, 2007).

Em termos de adequabilidade, a maioria (78%) das amostras de águas subterrâneas apresentou qualidade nos padrões de aceitação para consumo humano em condições naturais. Contudo 53% das águas com análises de ferro total apresentaram elevadas concentrações (> 0,3 mg.L^{-1}) desse elemento; além disso, ocorrem casos de concentrações de fluoreto acima do permissível para consumo humano (18% das amostras apresentam $\text{F}^- > 1,5 \text{ mg.L}^{-1}$) e manganês (2 amostras com $\text{Mn} > 0,1 \text{ mg.L}^{-1}$), decorrentes da solubilização dos minerais presentes nas rochas.

Concentrações elevadas de fluoreto (entre 1,74 e 7,10 mg.L^{-1}) também foram observadas em águas subterrâneas do SASG, no noroeste do RS (Ametista do Sul, Frederico Westphalen, Cristal do Sul e Rodeio Bonito) (Mancuso et al., 2014b). Estudos mineralógicos de solos do município de Frederico Westphalen constataram a presença de flúor-apatita [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$] (Silva et al., 2008), indicando potencial de contribuição dos basaltos intemperizados como fonte de flúor. Contudo concentrações anômalas do íon também foram observadas na zona confinada do SAG, no vale do Rio Uruguai e região, e que foram associadas a

Tabela 3. Síntese dos resultados das características químicas das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) no município de Frederico Westphalen (noroeste do Rio Grande do Sul).

Parâmetros	VMP	Sistema Aquífero Serra Geral (74 poços)				
		Amostras (nº)	Mínimo	Máximo	Mediana	3º quartil
pH		59	7	9,9	8,5	9,5
Temperatura da Água (°C)	–	49	17	24	20,5	21,5
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	–	56	111,2	1045	255,5	340,3
Sólidos Dissolvidos Totais (mg.L^{-1})	1.000	37	109,9	733	216,5	254,5
Dureza Total ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)	500	38	2	116	27	68
Cor (mg Pt-Co/l)	15	21	2	100	3	27,5
Odor (intensidade)	6	25	2	9	6	8
Turbidez (NTU)	5	29	0,1	44	0,7	6,9
Alcalinidade Total ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)		26	30	200	111,5	135
Alumínio Total (mg Al L^{-1})	0,2	5	0,03	0,19	0,05	0,18
Bicarbonato ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)		39	0,5	215	100	123
Cálcio Total (mg Ca L^{-1})	–	39	0,1	38	9	18
Carbonato ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)		20	1,11	99	22,9	39,75
Cloreto Total (mg Cl L^{-1})	250	29	0,04	113	3,3	11,1
Ferro Total (mg Fe L^{-1})	0,3	15	0,1	2,0	0,4	1,2
Fluoreto Total (mg F L^{-1})	1,5	39	0,1	10,6	0,3	0,8
Magnésio Total (mg Mg L^{-1})	–	38	0,08	12	1,75	5,2
Manganês Total (mg Mn L^{-1})	0,1	11	0,03	0,36	0,03	0,05
Matéria Orgânica		26	0,3	4,0	0,6	0,8
Nitrogênio Nitrato (mg N L^{-1})	10	10	0,08	1,77	0,95	1,41
Potássio Total (mg K L^{-1})	–	17	0,2	4	0,5	0,7
Sódio Total (mg Na L^{-1})	200	35	1,31	194	48	78
Sulfato ($\text{mg SO}_4 \text{ L}^{-1}$)	250	32	0,1	114,5	4	9,35

VMP: valor máximo permitido, definido pelo padrão de potabilidade da Portaria nº 5/2017 do Ministério da Saúde (Brasil, 2017).

fluxos ascendentes de aquíferos mais profundos (Pré-SAG) (Manzano e Guimarães, 2009).

As águas do SASG no município têm pH entre 7,0 e 9,9, com valores médios entre 7,9 (25º percentil) e 9,5 (75º percentil). Em 25% dos casos, o pH é superior a 9,5, com maior alcalinidade das águas subterrâneas nos poços próximos aos lineamentos e elevada correlação (0,64) com a profundidade da última entrada de água. Estudos de caracterização hidroquímica do SASG, realizados na região nordeste do Rio Grande do Sul, também apontam o aumento de pH com a profundidade dos poços (Reginato et al., 2013).

Na região do Alto Uruguai, norte/noroeste do Rio Grande do Sul e oeste de Santa Catarina, de 7.620 amostras as águas subterrâneas no SASG, 4,73% apresentaram valores anômalos de condutividades elétricas (superior a $378,35 \mu\text{S.cm}^{-1}$), sendo o valor de *background* de $117,35$ a $378,35 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (Freitas, 2016). Na região de estudo, 20% das águas subterrâneas do SASG apresentam condutividades elétricas entre 386 e $1045 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (valores enquadrados na classificação de anômalos), com mínima de $111,2 \mu\text{S.cm}^{-1}$ e mediana de $253 \mu\text{S.cm}^{-1}$.

De acordo com a distribuição da salinidade em classes, definidas por Freitas (2016), apenas 2% das águas coletadas são jovens, infiltradas recentemente pela recarga meteórica através do manto de alteração da rocha ígnea ($\text{CE} < 117,35 \mu\text{S.cm}^{-1}$), e 78% são águas típicas do SASG (entre $117,35$ e $378,35 \mu\text{S.cm}^{-1}$). Entre as águas coletadas próximas aos lineamentos (< 250 m), 50% apresentam condutividade elétrica até $282,7 \mu\text{S.cm}^{-1}$, o que representa um valor 15% superior ao medido nas águas coletadas a uma distância superior a 250 m dos lineamentos.

Todos os poços se enquadram no padrão de potabilidade da água para consumo humano no que se refere aos sólidos totais dissolvidos (STD), uma vez que eles são inferiores a $733 \text{ mg STD L}^{-1}$.

Na maior parte dos poços (75%), as temperaturas das águas subterrâneas são inferiores a $21,5^\circ\text{C}$. Contudo foram observados valores de até 24°C , no poço JP107, que está localizado a sudoeste da área, a 1.044 m do maior (extensão de 1.850 m) lineamento. Entre os poços que têm uma única entrada de água, a temperatura mínima (de 19°C) é 2°C superior a dos poços que interceptam mais de uma zona de fratura (que é de 17°C). A temperatura máxima e

a mediana também é superior (1°C), o que pode estar relacionado à maior profundidade dessas captações.

Os poços que têm mais de uma entrada de água estão localizados mais próximos dos maiores lineamentos, e 75% das águas deles apresentam concentrações de até $1,60\text{ mg.L}^{-1}$ de flúor, $79,00\text{ mg.L}^{-1}$ de sódio, $0,55\text{ mg.L}^{-1}$ de potássio, $27,90\text{ mg.L}^{-1}$ de cálcio, $8,00\text{ mg.L}^{-1}$ de magnésio, $16,58\text{ mg.L}^{-1}$ de sulfato e $85,00\text{ mg CaCO}_3\text{ L}^{-1}$ de dureza total. Esses valores são consideravelmente superiores (em 59, 31, 9, 35, 28, 31 e 20%, respectivamente) aos observados nas águas de poços que interceptam uma única zona de fratura. A presença de ferro é também maior (a mediana de $0,9\text{ mg Fe L}^{-1}$ é 56% superior à dos poços com uma única entrada de água).

As águas de poços que interceptam uma única zona de fratura são mais carbonatadas do que as com mais de uma entrada de água (50% delas têm até $29,9\text{ mg CO}_3^{2-}\text{ L}^{-1}$, que é um valor 78% superior), à semelhança dos cloretos (75% das águas têm até $19,75\text{ mg Cl}^{-1}\text{ L}^{-1}$, 40% a mais do que o observado em poços que interceptam duas ou mais zonas de fraturas).

Os valores máximos de condutividade elétrica ($1045\text{ }\mu\text{S.cm}^{-1}$), SDT (733 mg.L^{-1}) e sulfatos ($114,5\text{ mg SO}_4^{2-}\text{ L}^{-1}$) foram encontrados no poço JP133, localizado na porção sudeste da área, a 48 m de um lineamento N73°E. Essas águas apresentam alta salinidade, de acordo com o critério USSSL, contendo elevados teores de sódio ($192\text{ mg Na}^{+}\text{ L}^{-1}$), cloreto ($89\text{ mg Cl}^{-1}\text{ L}^{-1}$) e cálcio ($32,1\text{ mg Ca}^{2+}\text{ L}^{-1}$). Durante o bombeamento, o poço JP133 apresenta cota do nível dinâmico das águas subterrâneas inferior à cota do nível estático das águas do Sistema Aquífero Guarani, reforçando as evidências de fluxos ascendentes do SAG para o SASG.

As águas subterrâneas do SASG apresentam salinidade fraca (CE entre 100 e $250\text{ }\mu\text{S.cm}^{-1}$) (49% dos poços) e média (CE entre 250 e $750\text{ }\mu\text{S.cm}^{-1}$) (49% dos poços) (Figura 5). A maior parte dessas águas (79%) é fracamente sódica e, em menor proporção (14%), medianamente sódica. Entre as águas com salinidade média, ocorreram três casos de águas altamente sódicas (JP137, JP139 e G460/FW9), representando perigo de formação de teores nocivos de sódio nos solos (forte risco de sódio, com razão da absorção de sódio entre 15,4 e 18,5).

Segundo a classificação das águas para uso na irrigação, pelo método do USSSL, 55% dos poços apresentam águas de salinidade fraca e francamente sódica, 21% dos poços apresentam águas com salinidade média e francamente sódica e 14% têm águas com salinidade média e medianamente sódica (Figura 5). Em menor proporção, ocorrem águas altamente sódicas, com salinidade fraca (3%) a média (7%).

Águas do SASG tipo bicarbonatadas sódica, sulfatada sódica e cloretada-sulfatada sódica são encontradas em zonas de alto confinamento do SAG (oeste e sul do Paraná) (Athayde et al., 2014). Na região de menor confinamento (zona central e norte do Paraná), predominam águas bicarbonatadas cálcicas, mas teores de sódio da ordem de até

$18,74\text{ mg.L}^{-1}$ são atribuídos a misturas de águas de diferentes aquíferos (Celligoi et al., 2019; Bongioiolo et al., 2014) ou a um maior tempo de residência no sistema, como sugerido por Bongioiolo et al. (2014).

No nordeste do Rio Grande do Sul, zona de afloramento do SAG, as águas do SASG têm características bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (Matos et al., 2018; Bongioiolo et al., 2014); mas, no noroeste do estado (zona de alto confinamento do SAG), são do tipo bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas ou bicarbonatadas sódicas (Freitas et al., 2012).

Na área deste estudo, encontrou-se mais de um tipo hidroquímico nas águas subterrâneas do SASG, principalmente bicarbonatadas, com variação de cálcicas a sódicas. Naturalmente as águas evoluem de cálcicas para sódicas, e, de acordo com as análises hidroquímicas, há predomínio de águas bicarbonatadas sódicas (69% dos poços), seguidas pelas águas bicarbonatadas mistas ($\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg}$ e uma amostra $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na}$) (21% dos poços) e cálcicas (7% dos poços). Apenas um poço (JP139) apresentou águas do tipo sódica mista ($\text{Cl} > \text{SO}_4$) (Figura 6).

Para Mocellin e Ferreira (2009), as águas bicarbonatadas sódicas, mistas, magnesianas e sulfatadas sódicas são um reflexo de mistura de águas entre o SASG e águas provenientes de aquíferos sotopostos, principalmente do SAG. Para Athayde et al. (2007), a possibilidade de mistura confirma-se pela similaridade hidroquímica entre ambos aquíferos (as águas do SASG apresentam enriquecimento em sódio, cloreto, sulfato e pH), além das elevadas temperaturas, também observadas na região por Mancuso et al. (2014a). O enriquecimento de sódio também é indicado como evidência de mistura com águas profundas por Teixeira e Viero (2017), que atribuem a sua proveniência aos aquíferos confinados sedimentares da Bacia do Paraná.

Reginato et al. (2013) indicam que os silicatos presentes nas rochas vulcânicas ácidas (riodacitos) e básicas (basaltos) são fontes de cálcio, magnésio e sódio e contribuem para a presença de sais desses elementos nas águas subterrâneas da região.

As águas sódicas bicarbonatadas (Na-HCO_3) ocorrem em 69% dos poços. São águas pouco mineralizadas (CE entre 154 e $505\text{ }\mu\text{S.cm}^{-1}$, com maior frequência entre 201 e $313\text{ }\mu\text{S.cm}^{-1}$), com pH de neutro a básico (entre 7,5 e 9,8) e mediana de 8,9. São águas evoluídas quimicamente, com maior tempo de residência na rocha, e a sua composição química responde principalmente à interação entre as águas de recarga meteórica com os minerais das zonas de fraturas. O domínio do sódio deve-se à reação de intercâmbio iônico desse elemento adsorvido por cálcio e magnésio em solução, o qual diminui o estado de saturação mineral da calcita (CaCO_3) e da dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] e induz à dissolução dos minerais e à geração de HCO_3^{-} (Manzano e Guimarães, 2009). Isso explica o aumento das concentrações de Na^{+} e HCO_3^{-} e a diminuição das concentrações de

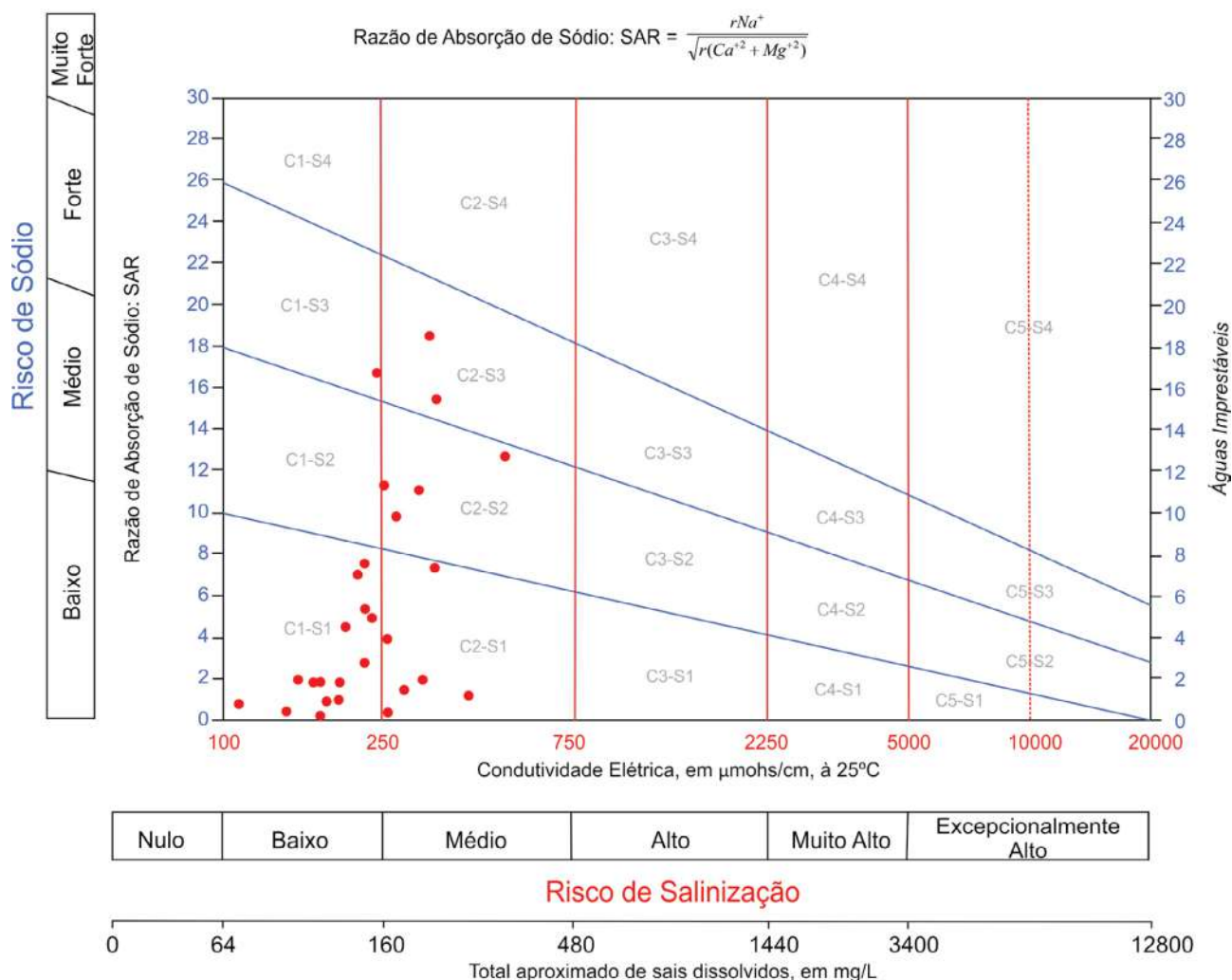


Figura 5. Classificação das águas para uso na irrigação, segundo o United States Salinity Laboratory (USSL), de Riverside, que se baseia na razão de adsorção de sódio (SAR) e na condutividade elétrica (CE) da água; categorizando a água de acordo com a salinidade (de C0 a C5) e a razão de absorção de sódio (de S1 a S4).

Ca^{2+} e Mg^{+2} . As águas apresentam boa relação direta entre STD em meq/L e teores de sódio ($R^2 = 0,85$) e forte a moderada relação indireta entre estes últimos e os teores de cálcio ($R^2 = -0,71$) e magnésio ($R^2 = -0,60$). O intercâmbio iônico modifica a ordem de abundância entre os cátions em relação às zonas de recarga e induz à dissolução de minerais carbonatados ao diminuir a atividade de Ca^{2+} e Mg^{+2} na água, o que faz com que a alcalinidade aumente progressivamente em toda a zona, onde o intercâmbio iônico é dominante. Nessas águas, os teores de sódio têm forte correlação com o aumento do pH ($R^2 = 0,81$). No que se refere às razões iônicas (expresas em miliequivalente por litro), as águas bicarbonatadas sódicas apresentam muito alta rNa^+/rCl^- (com valores extremos da ordem de 10^2).

Em 21% dos poços, as águas são bicarbonatadas mistas, pouco mineralizadas (CE entre 111 e 407 $\mu S \cdot cm^{-1}$) e apresentam muito forte ($R^2 = 0,94$) a forte ($R^2 = 0,80$) relação (em meq/L) entre STD e teores de cálcio e cloreto, respectivamente, o que indica a influência desses íons na sua salinidade. As águas bicarbonatadas mistas têm predominância de cloretos (com mediana de 10 mg $Cl^- L^{-1}$) sobre os sulfatos (com mediana de 4,3 mg $SO_4^{2-} L^{-1}$), conforme indica a mediana da razão iônica rCl^{2+}/rSO_4^{2-} , que é de 2,81, e pH entre 7,1 e 8,3. A dissolução de calcita incorpora à água Ca^{2+} (com mediana de 23 mg $Ca^{2+} L^{-1}$). As águas bicarbonatadas mistas apresentam razão rCa^{2+}/rSO_4^{2-} muito alta (da ordem de 19,45), indicando possível dissolução de carbonatos ou alteração de plagioclásio.

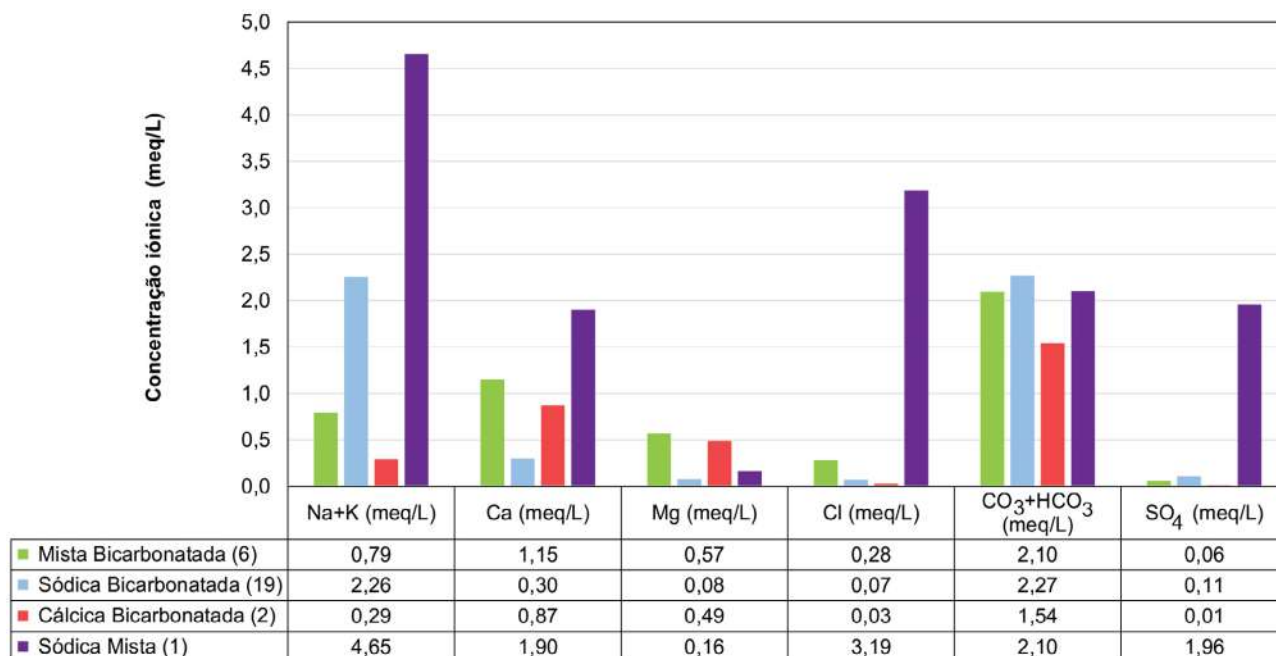


Figura 6. Valores da mediana (em miliequivalente por litro) da distribuição iônica (cátions e ânions) de cada tipo hidrogeoquímico (misto bicarbonatado, sódico bicarbonatado e cálcico bicarbonatado) presente nas águas coletadas do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG). O tipo sódico misto representa o valor de uma única amostra de água, a do poço JP139.

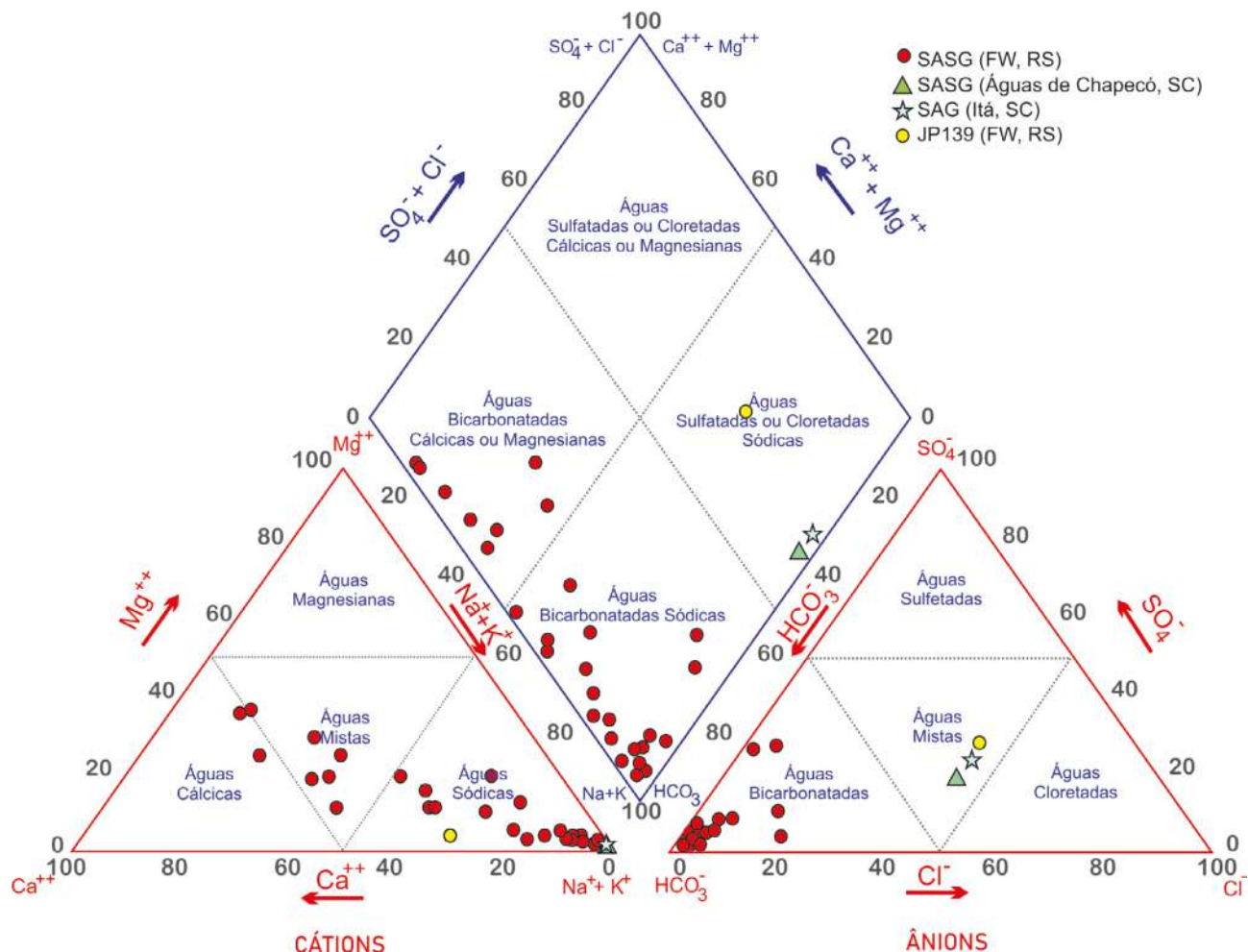
Somente 7% das águas apresentam tipo hidroquímico bicarbonatada cálcica, indicando que são águas jovens, de recarga mais recente e típicas do SASG (Machado, 2005; Nanni, 2008). Essas águas são pouco mineralizadas ($CE < 177 \mu S \cdot cm^{-1}$), com pH médio de 7,7, sendo pouco evoluídas quimicamente e com pouco tempo de residência. A sua composição química deve responder à interação da água de chuva com os minerais e gases do terreno, em zonas superficiais sujeitas à recarga.

O único poço com águas sódicas mistas é o JP139, que capta águas de até 240 m de profundidade (intercepta a zona de fratura a 118 m de profundidade), com pH de 9,8 e $450 mg \text{ STD } L^{-1}$. São águas com forte mineralização (White, 2013), em que o cátion predominante é o Na^+ ($4,6 \text{ meq } L^{-1}$), enquanto o ânion Cl^- ($3,19 \text{ meq } L^{-1}$) prevalece sobre os sulfatos ($rCl^-/SO_4^{2-} = 1,63$) e os bicarbonatos ($rCl^-/rHCO_3^- = 1,52$) (Figura 6). Os teores de $1,9 \text{ meq } Ca \text{ } L^{-1}$ são os maiores entre os grupos hidrogeoquímicos analisados, indicando o enriquecimento em cálcio.

As águas do poço JP139 têm características hidroquímicas tipo Na-Cl-HCO₃, semelhantes às águas do SASG coletadas em Águas Chapecó (SC) (S-235-BR-ACH) e no SAG, coletadas em Ita (SC) (S-230-BR-ITA), onde ocorrem teores de Cl (entre 2 e $4 \text{ meq } L^{-1}$) superiores aos de SO₄ (entre 1 e $2 \text{ meq } L^{-1}$) (Manzano e Guimarães, 2009) (Figura 7). O trânsito das águas com $Cl^- < SO_4^{2-}$ para $Cl^- > SO_4^{2-}$ ocorre

com o aumento de salinidade, pela solubilidade relativa dos sais disponibilizados pela rocha. Os sais carbonatados são menos solúveis e, quando a água se satura em minerais carbonatados, aumentam as concentrações de SO₄²⁻ até atingir a saturação em minerais sulfatados, enquanto as concentrações de cloreto crescem de forma praticamente indefinida (Manzano e Guimarães, 2009). O poço JP139 apresenta enriquecimento de cloretos, em relação aos outros poços instalados no SASG, mas a sua composição hidroquímica (com menores teores) difere da distribuição iônica das águas sódicas mistas dos poços próximos de Iraí (RS) (SASG), Ilha Redonda (SC) (SASG) e São Carlos (SC) (SAG), que têm $SO_4^{2-} > Cl^-$ (Figura 8). Estes últimos têm características hidroquímicas atribuídas à influência de mistura com águas ascendentes do SAG ou, até, de aquíferos mais profundos (Freitas, 2016; Bregolin, 2015). Os elevados teores de Cl⁻, Na⁺ e F⁻ das águas do JP139, associados a uma carga hidráulica (de NE) inferior a do SAG (possibilitando fluxo ascendente), podem indicar uma provável contribuição de águas salinizadas de aquíferos mais profundos.

Entre os poços que apresentam a carga hidráulica do ND inferior à estimada para o NE do SAG no local, seis (JP114, JP122, JP134, JP135, JP138 e JP142, com dados hidroquímicos disponíveis) indicam águas subterrâneas do tipo bicarbonatadas sódicas. Contudo a mediana das concentrações iônicas desses poços supera as encontradas nas águas do



Fonte: Dados hidroquímicos das águas subterrâneas do SASG (também do poço JP139) (CPRM, 2020) e poços S-235-BR-ACH (Águas Chapecó, SC) (SAG) e S-230-BR-ITA (Itá, SC) (SAG) (Manzano e Guimarães, 2009).

Figura 7. Tipos hidroquímicos das águas subterrâneas do SASG no município de Frederico Westphalen, com predomínio de águas sódicas bicarbonatadas e mistas ou cálcicas bicarbonatadas, com destaque para o poço JP139 que tem águas sódicas mistas, à semelhança das águas coletadas no Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), em Águas Chapecó (SC) (S-235-BR-ACH) e no SAG, em Itá (SC) (S-230-BR-ITA).

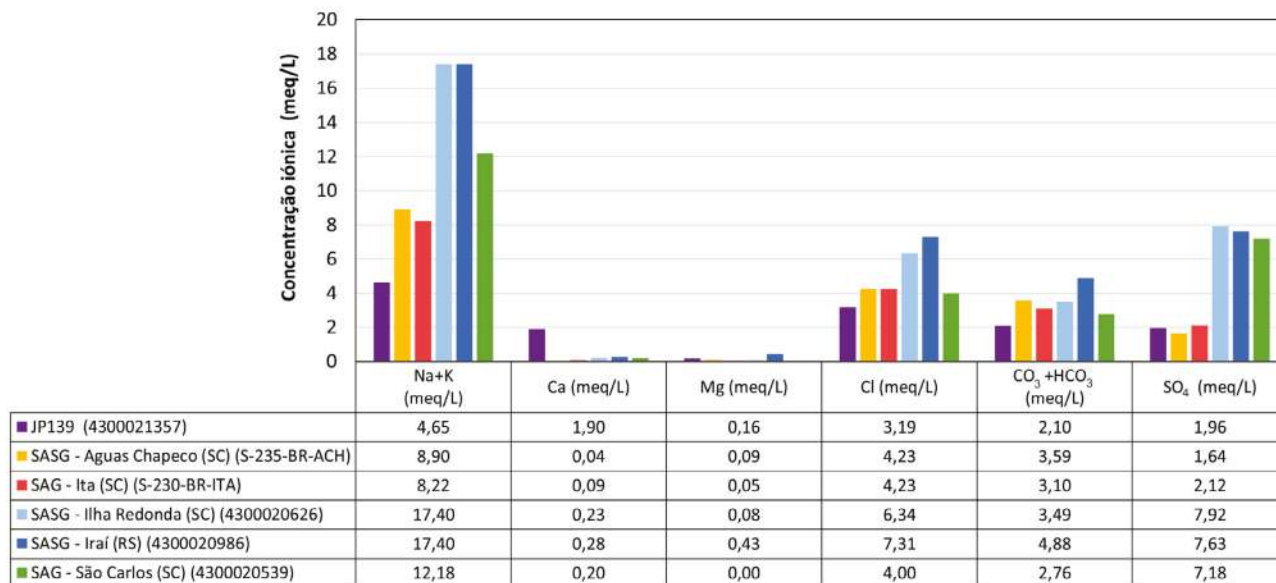
mesmo tipo (bicarbonatadas sódicas) no município. Entre os íons, destacam-se o sulfato (com mediana 139% superior), o cloreto (com mediana 125% superior) e o magnésio (com mediana 84% superior). Entre essas águas (JP138, JP142, JP135) estão as maiores concentrações de fluoreto (de 2,9 a 4,8 mg.L⁻¹), com o valor extremo (10,6 mg.L⁻¹) obtido no JP139, que concentra águas mais salinas (STD de 450 mg.L⁻¹) com intercâmbios iônicos moderados (Na/Cl de 1,46) e pH de 9,3.

De acordo com Manzano e Guimarães (2009), águas com maiores conteúdos de F são encontradas em zonas mais quentes e profundas do SAG, havendo evidências de fluxos ascendentes de aquíferos sotopostos ao SASG ao

longo do Rio Uruguai, no extremo oeste dos estados de SC e RS (Freitas, 2016). Considerando as características hidroquímicas e hidrodinâmicas dos poços JP114, JP122, JP134 e, principalmente, do JP135, JP138 e JP142, há indícios de influência de águas mais profundas (mais mineralizadas) no enriquecimento iônico das águas subterrâneas por eles captadas.

CONCLUSÕES

No município de Frederico Westphalen, a maior frequência de estruturas lineares ocorre entre as direções N-N30°W



Fonte: Dados hidroquímicos do SASG-Águas Chapecó (SC) (S-235-BR-ACH) e SAG-Ita (SC) (S-230-BR-ITA) (Manzano e Guimarães, 2009); SASG-Ilha Redonda (SC) (4300020626) e SASG-Irai (RS) (4300020986) (Bregolin, 2015); SAG-São Carlos (4300020539) (Freitas, 2016; Bregolin, 2015).

Figura 8. Distribuição iônica (meq.L⁻¹) de águas do tipo sódico misto coletadas em poços e nascente (Ilha Redonda) localizados próximos à área de estudo, com águas identificadas como provenientes do Sistema Aquífero Guarani (SAG) (São Carlos e Ita) ou instalados no SASG mas com forte influência das águas com artesianismo do SAG (Ilha Redonda, Águas de Chapecó e Irai).

(27%) e N30°W-N60°W (24%), e os lineamentos com maior extensão média ocorrem nas direções N30°E-N60°E.

Os poços instalados no SASG atingem 528 m de profundidade, mas a maior parte deles (75%) não ultrapassa a profundidade de 186 m. Contudo os poços que interceptam uma única zona de fratura são mais profundos (75% atingem até 244,5 m) e suas águas são mais carbonatadas e mais cloretadas. Os poços próximos às maiores estruturas lineares interceptam frequentemente várias zonas de fraturas e apresentam entradas de água, ND e NE menos profundos, maiores vazão e capacidade específica.

Os dados de potenciometria dos poços mostram uma tendência de fluxo regional de oeste para leste e nordeste, com cotas de nível de água subterrânea que acompanham o relevo e variam de 528,0 a 203,6 m.

Embora tenha sido encontrado mais de um tipo hidroquímico nas águas subterrâneas no SASG, predominam as águas bicarbonatadas sódicas (69% dos poços), seguidas pelas águas bicarbonatadas mistas (principalmente com Ca > Na > Mg) (21% dos poços). Em termos de qualidade, 78% das amostras do SASG encontram-se nos padrões de aceitação para consumo humano em condições naturais. Contudo se observam elevadas concentrações de ferro total em 53% dos poços e concentrações de fluoreto em 18% dos poços acima do permissível para consumo humano. As águas do SASG no município têm

pH entre 7,0 e 9,9, com aumento da alcalinidade com a proximidade dos lineamentos e com o aumento da profundidade da captação.

O único poço com águas sódicas mistas é o JP139, com pH de 9,8 e 450 mg STD L⁻¹. Nesse poço, as águas têm características hidroquímicas tipo Na-Cl-HCO₃, semelhante às águas do SASG, coletadas em Águas Chapecó (SC), e do SAG, coletadas em Ita (SC). São águas em que o cátion predominante é o sódio e o ânion cloreto prevalece sobre os sulfatos e os bicarbonatos. A relação entre o nível potenciométrico do SASG e a potenciometria do SAG, associada às características hidroquímicas das águas subterrâneas (SASG e SAG), indica provável contribuição de águas salinizadas de aquíferos mais profundos (fluxo ascendente) no poço JP139 instalado no SASG.

No caso do rebaixamento dos níveis de água do SASG, durante o bombeamento (nível dinâmico), ocorre inversão entre as cargas hidráulicas (SAG e SASG) em nove poços, indicando possibilidade de fluxos ascendentes de aquíferos sotopostos ao SASG, em caso de conexão hidráulica entre os sistemas. Essas águas são do tipo bicarbonatadas sódicas, mas apresentam enriquecimento de sulfato, cloreto e magnésio (em menor proporção) em relação às águas dos outros poços também instalados no SASG, indicando possível influência da contribuição ascendente de águas mais profundas.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas (ANA). (2010). *Atlas Brasil: Abastecimento urbano de água*. Brasília: ANA. Disponível em: <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/ResultadosEstado.aspx>>. Acesso em: 27 jun. 2020.
- Athayde, G. B., Athayde, C. M., Rosa Filho, E. F., Licht, O. A. B. T. (2014). Contribuição ao estudo da conectividade entre os Sistemas Aquíferos Serra Geral (SASG) e Guarani (SAG) no Estado do Paraná, Brasil. *Boletim Paranaense de Geociências*, 71, 136-145. <https://doi.org/10.5380/geo.v71i0.31790>
- Athayde, G. B., Müller, C. V., Rosa Filho, E. F., Hindi, E. (2007). Estudo sobre os tipos das águas do Aquífero Serra Geral, no município de Marechal Cândido Rondon – PR. *Águas Subterrâneas*, 21(1), 111-122. <https://doi.org/10.14295/ras.v21i1.16174>
- Baum, C. A., Mancuso, M. A., Fritzen, R. R., Delarmelin, W. C. (2015). Água e saúde pública. Ação junto a secretaria de saúde, Campinas. *2º Congresso de Extensão da Associação de Universidades do Grupo de Montevideú*. Campinas: AUGM. Disponível em: <<https://www.ufsm.br/pro-reitorias/pre/2015/10/09/ufsm-no-2-congresso-de-extensao-da-augm/>>. Acesso em: 27 maio 2020.
- 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*, 32(1), 141-160. <https://doi.org/10.22564/rbgf.v32i1.402>
- Brasil. (2017). Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Anexo XX - do Controle e da vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. *Diário Oficial da União*, 190(Supl.). Disponível em: <<https://portalarquivos2.saude.gov.br/images/pdf/2018/marco/29/PRC-5-Portaria-de-Consolidacao-o-n-5-de-28-de-setembro-de-2017.pdf>>. Acesso em: 2 ago. 2020.
- Bregolin, A. J. G. (2015). *Radônio em águas subterrâneas de estâncias termais selecionadas do noroeste do Rio Grande do Sul e sudoeste de Santa Catarina*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: Instituto de Geociências - UFRGS.
- Celligoi, A., Corcória, J. A., Pinese, J. P. P. (2019). Análise hidroquímica dos Aquíferos Guarani e Serra Geral no município de Ipirorã-PR. *Caminhos de Geografia – Revista Online*, 20(72), 77-93. <https://doi.org/10.14393/RCG207242096>
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). (2005). Serviços Geológicos do Brasil. *Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul*. Escala: 1:750.000. Brasília: Ministério de Minas e Energias / Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral.
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). (2020). *Banco de dados de poços* (SGB/CPRM). Serviço Geológico do Brasil / CPRM. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php>. Acesso em: 27 jul. 2020.
- Cunha, G. G., Roisenberg, A., Pulgati, F. H., Freitas, M. A. (2016). Hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Serra Geral na região do Alto Rio Uruguai, Noroeste do Rio Grande do Sul e sua relação espacial com a tectônica rúptil. *Pesquisas em Geociências*, 43(1), 55-67. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.78192>
- Dias, A. A., Parisi, G. N. (2007). *Programa Geologia do Brasil*. Projeto Geologia para Apoio aos Arranjos Produtivos de Gemas do Rio Grande do Sul, RS, Frederico Westphalen, folha SG.22-Y-C-II. Porto Alegre: CPRM, 73 p.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2014). ArcGIS for Desktop Advanced. Release 10.2.2. Redlands: ESRI.
- Farr, T. G., Kobrick, M. (2000). *The shuttle radar topography mission: a global DEM*. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 27 maio 2020.
- Formentini, J., Mancuso, M. A., Albuquerque Filho, J. L. (2016). Estruturação de base de dados de qualidade das águas subterrâneas voltada para a gestão da Bacia do Rio da Várzea, Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 6, 88-97. Disponível em: <https://www.abge.org.br/downloads/revistas/RBGEA_2016.pdf>. Acesso em: 27 maio 2020.
- Freitas, A. F. (2016). *Hidrogeoquímica e isotopia de águas com alta salinidade do sistema aquífero serra geral na região do Alto Rio Uruguai, Brasil*. Tese (Doutorado). Porto Alegre: Instituto de Geociências - UFRGS.
- 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 Sistema Aquífero Serra Geral no Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 17(2), 31-41. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v17n2.p31-41>

- Hammer, Ø. (2017). *PAleontological STatistics Version 3.15*. Reference manual. Natural History Museum. University of Oslo, 253 p.
- Hasenack, H., Weber, E. (org.). (2010). *Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul*. Escala: 1:50.000. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 1 DVD-ROM. (Série Geoprocessamento n.3). Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/labgeo/index.php/dados-espaciais/250-base-cartografica-vetorial-continua-do-rio-grande-do-sul-escala-1-50-000>>. Acesso em: 2 jun. 2020.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2008). *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*. Tabela 1752 - Número de municípios, total e os com serviço de abastecimento de água, por tipo de captação, Tabela 1753 - Número de municípios, total e os com captação de água, por existência e tipo de poluição ou contaminação na captação. Brasil: IBGE Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1752>>, <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1753>>. Acesso em: 25 ago. 2020.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2010). *Censo Demográfico 2010*. Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. Tabela 200 - População residente, por sexo, situação e grupos de idade - Amostra - Características Gerais da População. Brasil: IBGE Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/200>>. Acesso em: 8 out. 2020.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2015). *Indicadores de Desenvolvimento Sustentável*. Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. Tabela 1159 - Distribuição percentual de moradores em domicílios particulares permanentes por tipo de abastecimento de água e situação do domicílio. Brasil: IBGE Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1159>>. Acesso em: 27 maio 2020.
- Köppen, W. (1931). *Grundriss der Klimakunde*. Berlin: Walter de Gruyter.
- Logan, J. (1965). *Interpretação de Análises Químicas da Água*. Recife: US. Agency for International Development.
- Machado, A. V. M., Santos, J. A. N., Nogueira, L. T., Nogueira, M. T., Oliveira, P. A. D. (2016). Acesso ao abastecimento de água em comunidades rurais: o desafio de garantir os direitos humano à água. *XII Congresso Nacional de Excelência em Gestão & III Inovarse - Responsabilidade Social Aplicada*, p. 14. Rio de Janeiro.
- Machado, J. L. F. (2005). *Compartimentação espacial e arcabouço hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul*. Tese (Doutorado). Porto Alegre: Escola Politécnica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos.
- Machado, J. L. F., Freitas, M. A. (2000). Hidroquímica do Aquífero Serra Geral no oeste de Santa Catarina. *1st Joint World Congress on Groundwater*. Fortaleza: ABAS.
- Mancuso, M. A., Formentini, J., Griebeler, J. S. (2014a). Caracterização de hipotermalismo na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. *XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, 18 p. Belo Horizonte: ABAS. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28324/18430>>. Acesso em: 23 out. 2020.
- Mancuso, M. A., Manfio, J., Schroeder, J. K., Glusczak, A. G., Griebeler, J. S., Sperandio, D. G., Kerkhoff, E. L. W., Pessotto, I. P., Centenaro, N. (2015). *Caracterização da qualidade e da quantidade das águas subterrâneas utilizadas para o abastecimento de municípios da região do Alto Uruguai (RS)*. Engenharias na Extensão Universitária, 1, 53-83. Santa Maria: FACOS-UFSM.
- Mancuso, M. A., Schroeder, J. K., Silva, S. J. L. (2013). Análise dos teores de flúor nas águas de abastecimento público em municípios localizados sobre o aquífero Serra Geral, RS. *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Bento Gonçalves: ABRH. Disponível em: <<https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=155&SUMARIO=3973>>. Acesso em: 27 maio 2020.
- Mancuso, M. A., Schroeder, J. K., Silva, S. J. L. (2014b). Aplicação da geoestatística às ocorrências de íon fluoreto nas águas de abastecimento público de municípios localizados no Aquífero Serra Geral, no noroeste do Rio Grande do Sul, Brasil. *XXII Congresso da Água/XVI ENASB/XVI SILUBESA*. Lisboa: APRH.
- Manzano, M., Guimarães, M. (2009). *Hidroquímica regional del SAG estudio del origen de la composición química de las aguas subterráneas del Sistema Acuífero Guaraní*. Avanços no Conhecimento do Sistema Aquífero Guaraní. Tomo 2. Inventário e amostragem. Hidroquímica zona sul e norte. Isotopia. Volumen 8: Informe final de Hidroquímica Regional. Montevideu. 225 p.
- Matos, A. B., Reginato, P. A. R., Athayde, G. B. (2018). Compartimentação hidrogeológica do Sistema Aquífero Guarani na escarpa da serra geral no nordeste do RS. *Águas Subterrâneas*, 32(1), 130-139. <https://doi.org/10.14295/ras.v32i1.28965>
- Möbus, G. (2014). *Software QualiGraf, v.1.17*. Ceará: Departamento de Recursos Hídricos, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Disponível em: <<http://www5.funceme.br/qualigraf/mi/midia/show/3>>. Acesso em: 2 jun. 2020.

- Mocellin, R. C., Ferreira, F. J. F. (2009). Conectividade e compartimentação dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani no sudoeste do estado do Paraná, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 39(3), 567-579. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2009393567579>
- Nanni, A. S. (2008). *O flúor em águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul: origem e condicionamento geológico*. Tese (Doutorado). Porto Alegre: Instituto de Geociências - UFRGS. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/13785/000653223.pdf?...1>>. Acesso em: 23 out. 2020.
- Organização dos Estados Americanos (OEA). (2009). *Aquífero Guarani: programa estratégico de ação. Relatório do Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani*. Edição bilíngue. Brasil, Argentina, Paraguai, Uruguai. Organização dos Estados Americanos.
- Pasini, F., Mancuso, M. A., Fortes, P. R., Breunig, F. M., Fritzen, R. R. (2021). Recarga de Aquífero em Floresta Estacional Decidual Nativa (Bioma de Mata Atlântica). *Ciência Florestal*, no prelo.
- Reginato, P. A. R., Ahlert, S., Schneider, V. E. (2013). Caracterização hidroquímica do Sistema Aquífero Serra Geral na região nordeste do Rio Grande do Sul. *Águas Subterrâneas*, 27(1), 65-78. <https://doi.org/10.14295/ras.v27i1.27061>
- Silva, J. L. S., Santiago, M. R., Mancuso, M. A., Löbner, C. A., Dressler, V. L., Melo, T. C., Goffermann, M. (2014). Concentrações anômalas de flúor em águas subterrâneas. *Ciência e Natura*, 36(2), 745-768. <https://doi.org/10.5902/2179460X13457>
- Silva, R. V., Vendruscolo, R., Santos, A. T., Andrade, A. M. H. (2008). Caracterização mineralógica de solos na região de Frederico Westphalen, RS. *XX Salão de Iniciação Científica*. Porto Alegre: UFRGS.
- Teixeira, G. V., Viero, P. A. (2017). Evolução hidrogeoquímica dos aquíferos mesozoicos da porção sul da bacia do Paraná no oeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Águas Subterrâneas*, 31(1), 36-51. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i1.28577>
- White, M. M. (2013). *Geochemistry*. Nova Jersey: Wiley-Blackwell.
- Wildner, W., Ramgrab, G., Lopes, R. C., Iglesias, C. M. F. (2007). *Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Sul*. Escala 1:750.000. Porto Alegre: CPRM. 1 DVD-ROM. Programa Geologia do Brasil, Mapas Geológicos Estaduais.
- Zoby, J. L. G., Matos, B. (2002). As águas subterrâneas no Brasil e sua inserção na política nacional de recursos hídricos. *XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. Florianópolis: ABAS.