



# Qualidade e evolução das águas subterrâneas na região centro-oeste do RS: uma abordagem hidrogeoquímica aplicada

Quality and evolution of groundwater in the west-central region of RS: an applied hydrogeochemical approach

T. De Vargas<sup>1\*</sup>; S. R. dos Santos<sup>1</sup>; P. A. R. Reginato<sup>1</sup>; F. S. Carlos<sup>1</sup>;  
T. A. Bortolin<sup>2</sup>; R. Belladona<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Pesquisas Hidráulicas/Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 91540-000, Porto Alegre-RS, Brasil

<sup>2</sup>Fundação Estadual de Proteção Ambiental, 90035-003, Porto Alegre-RS, Brasil

<sup>3</sup>Superintendência de Recursos Hídricos, Serviço Autônomo Municipal de Águas e Esgoto, 95052-500, Caxias do Sul-RS, Brasil

\*tiago.devargas@ufrgs.br

(Recebido em 24 de julho de 2025; aceito em 26 de novembro de 2025)

A hidroquímica é essencial para avaliar a qualidade da água subterrânea, identificar processos geoquímicos e apoiar a gestão sustentável dos recursos hídricos. Este estudo realizou a caracterização hidroquímica de poços tubulares nos municípios de São Vicente do Sul, Cacequi, Rosário do Sul e Vila Nova do Sul, visando avaliar a qualidade da água subterrânea, o risco de salinidade, os processos hidrogeoquímicos e a potencialidade para água mineral. Os parâmetros avaliados incluíram pH, dureza, sólidos totais dissolvidos, condutividade elétrica e concentrações de íons principais, menores e traços. A classificação hidroquímica foi realizada utilizando os diagramas de Piper, Stiff e US Dept. of Agriculture, enquanto a avaliação da qualidade da água seguiu os padrões estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021 e o potencial para água mineral considerou o Código de Águas Minerais. Os resultados indicaram predominância de águas bicarbonatadas cálcicas e mistas, características de áreas de recarga e fluxos recentes, bem como águas sódicas associadas a zonas de confinamento e evolução hidroquímica. Foram identificadas concentrações acima dos limites permitidos para fluoreto, nitrato, alumínio, ferro e manganês oriundas de processos naturais, enquanto o nitrato sugere contaminação antrópica. A análise espacial indicou maior confinamento e salinização no Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia, especialmente em São Vicente. Existe potencial para água natural mineral fluoretada e alcalino-terrosas cálcicas e magnesianas. A maioria das águas foi classificada como doce e adequada para consumo humano, dessedentação animal e irrigação. Este estudo reforça a importância do monitoramento contínuo para a gestão sustentável e segura dos recursos hídricos subterrâneos.

Palavras-chave: hidrogeoquímica, águas subterrâneas, qualidade da água.

Hydrochemistry is essential for assessing groundwater quality, identifying geochemical processes, and supporting the sustainable management of water resources. This study conducted the hydrochemical characterization of tubular wells in the municipalities of São Vicente do Sul, Cacequi, Rosário do Sul, and Vila Nova do Sul, aiming to evaluate groundwater quality, salinity risk, hydrogeochemical processes, and potential for mineral water exploitation. The evaluated parameters included pH, hardness, total dissolved solids, electrical conductivity, and concentrations of major, minor, and trace ions. Hydrochemical classification was performed using Piper, Stiff, and U.S. Department of Agriculture diagrams, while water quality assessment followed the standards established by Ordinance GM/MS No. 888/2021. The potential for mineral water was assessed based on the Brazilian Mineral Water Code. The results indicated a predominance of calcium-bicarbonate and mixed waters, typical of recharge areas and recent flow systems, as well as sodium-rich waters associated with confined zones and hydrochemical evolution. Concentrations exceeding the permissible limits were identified for fluoride, nitrate, aluminum, iron, and manganese, the latter mainly from natural processes, while nitrate suggests anthropogenic contamination. Spatial analysis indicated greater confinement and salinization in the Sanga do Cabral/Pirambóia Aquifer System, especially in São Vicente. There is potential for natural fluoridated mineral water and alkaline-earth waters rich in calcium and magnesium. Most waters were classified as fresh and suitable for human consumption, livestock watering, and irrigation. This study reinforces the importance of continuous monitoring for the safe and sustainable management of groundwater resources.

Keywords: hydrogeochemistry, groundwater, water quality.

## 1. INTRODUÇÃO

A qualidade da água subterrânea é essencial para os diferentes usos atribuídos aos recursos hídricos e águas minerais na sociedade e na economia. Apesar das águas minerais legalmente serem classificadas como minério e não recurso hídrico, elas devem ser incluídas na gestão sustentável dos aquíferos [1]. A hidroquímica é uma ferramenta elementar e indispensável para o conhecimento sobre o ambiente aquífero. Possui uma importância fundamental na caracterização dos aquíferos, avaliação da qualidade da água, identificação de processos geoquímicos, determinação da origem das águas, monitoramento de contaminação e apoio ao manejo sustentável [2].

Os elementos químicos caracterizados como constituintes principais, menores e traços são a base hidroquímica para avaliar a qualidade, evolução e a classificação de fácies hidrogeoquímicas [3]. Sooraj et al. (2025) [4] identificaram contaminação geogênica por  $F^-$  em aquíferos fraturados em rochas graníticas e metamórficas, em Chhattisgarh (Índia), avaliando as razões iônicas, as fácies hidrogeoquímicas e os processos de dissolução e troca iônica. Logo Koh et al. (2009) [5] discriminaram fontes de contaminação naturais de antrópicas e estabeleceram limiares para os contaminantes presentes nos aquíferos fraturados vulcânicos de Jeju, Coréia do Sul. Por outro lado, em análise similar para o aquífero Libres-Oriental (México), observou-se que a intensa interação água-rocha com os calcários e as rochas vulcânicas proporcionou elevadas concentrações de flúor nas águas subterrâneas classificadas como facies  $Ca-Mg-HCO_3^-$  [6].

No Estado do Rio Grande do Sul, Goffermann et al. (2015) [7] realizaram a avaliação sistemática de parâmetros físico-químicos, como pH, condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD), dureza, além de concentrações de íons majoritários (como cálcio, magnésio, sódio, potássio, bicarbonato, cloreto e sulfato). Além disso, conseguiram classificar as águas subterrâneas, avaliar o grau de mineralização e salinização das águas, interpretar processos naturais e diferenciar águas jovens e antigas. Já Marimon et al. (2013) [8] aplicaram a hidroquímica de forma integrada para compreender os mecanismos de origem, mobilização e distribuição do flúor, correlacionando as características químicas das águas com os aspectos geológicos e hidrogeológicos do Sistema Aquífero Guarani e a potabilidade para consumo humano. Para tanto, esses autores observaram as diferentes fácies hidrogeoquímicas, as razões iônicas  $Na^+/Cl^-$ ,  $Ca^{2+}/HCO_3^-$  e  $Ca^{2+}/SO_4^{2-}$ , os processos de dissolução (fluorita, calcita, dolomita, gesso/anidrita), troca catiônica ( $Na^+$  substituindo  $Ca^{2+}$  em argilas) e a dessorção de  $F^-$  de minerais argilosos sob pH alcalino.

Estudos hidrogeoquímicos são parte fundamental para a caracterização de águas naturais minerais. Buscando entender as variações naturais e a confiabilidade de onze marcas de água mineral oriundas do Sistema Aquífero Serra Geral, no sul do Brasil, Reginato et al. (2024) [9] determinaram as principais características hidroquímicas e estimaram o grau de mineralização através da avaliação das fácies hidrogeoquímicas (bicarbonatadas cárnicas ou magnesianas), caracterização físico-química (pH médio: 7,10; CE média: 185,2  $\mu$ S/cm) e classificação mineral das águas (fluoretadas e pouco mineralizadas). Por outro lado, Santos et al. (2016) [10] analisaram 27 marcas de água mineral, abrangendo quatro países (Brasil, Portugal, Itália e França), com objetivo de avaliar a qualidade da água com base nos parâmetros físico-químicos pH, condutividade, STD, dureza, sais e elementos traço (incluindo metais pesados). Os resultados desses autores foram comparados com os limites estabelecidos pela legislação brasileira e identificaram duas marcas com  $NO_2^-$  e  $NO_3^-$  acima dos limites legais, recomendando monitoramento contínuo.

As concentrações de elementos traço na composição química das águas minerais apresentam uma relevância destacada, pois valores elevados podem indicar a existência de risco à saúde humana. Sunkari e Danladi (2016) [11] analisaram 10 marcas de água mineral provenientes de aquíferos de rochas precambrianas e sedimentares, localizadas em Accra (Gana). Esses autores focaram nos elementos traço As, Cd, Cu, Pb and Zn e constaram concentrações abaixo dos limites da Organização Mundial da Saúde (OMS) para todas às alíquotas, mostrando ausência de risco à saúde. Em uma revisão bibliográfica, Quattrini et al. (2016) [12] descrevem que as águas minerais contêm elementos funcionais para a saúde humana além da hidratação, com ações benéficas sobre digestão, metabolismo, função renal, óssea e cardiovascular. Essas autoras, também, elencam os

benefícios à saúde de cada composição química predominante: Bicarbonatadas  $\geq 600 \text{ mg/L HCO}_3^-$  (Neutralizam a acidez gástrica e auxiliam na dissolução de cálculos renais), Sulfatadas  $\geq 200 \text{ mg/L SO}_4^{2-}$  (Estimulam motilidade intestinal), Cálcicas  $\geq 150 \text{ mg/L Ca}^{2+}$  (Fonte de cálcio biodisponível e efeito protetor contra hipertensão), Magnesianas  $\geq 50 \text{ mg/L Mg}^{2+}$  (Melhoramento neuromuscular, redução de fadiga muscular e prevenção de doenças cardiovasculares), Sódicas  $\geq 200 \text{ mg/L Na}^+$  (Reposição eletrolítica), Fluoretadas entre 0,5-1,5 mg/L F<sup>-</sup> (Prevenção de cáries dentárias) e Ferruginosas  $\geq 1 \text{ mg/L Fe}^{2+}$  (Auxiliam no tratamento de anemias).

Na região centro-oeste do Estado do Rio Grande do Sul existem alguns estudos regionais caracterizando hidroquimicamente os aquíferos e confrontando a qualidade da água subterrânea com a legislação de potabilidade [7, 8]. Contudo, são ausentes publicações científicas sobre a qualidade da água subterrânea, em relação à potabilidade e o uso agrícola, e a potencialidade de água mineral na área que abrange as cidades de São Vicente do Sul, Cacequi, Rosário do Sul e Vila Nova do Sul. Diante desse cenário, o objetivo deste estudo é realizar uma caracterização hidroquímica das águas dos poços tubulares perfurados para captação de água subterrânea nas cidades de São Vicente do Sul, Cacequi, Rosário do Sul e Vila Nova do Sul, relacionando alguns parâmetros de qualidade da água com a Portaria GM/MS Nº 888 de 4 de maio de 2021 [13], identificando o risco de salinidade para irrigação, contextualizando o ambiente hidrogeoquímico do aquífero e avaliando o potencial de água natural mineral.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Área de Estudo

O estado do Rio Grande do Sul encontra-se subdividido em vinte e cinco bacias hidrográficas, que compõem três grandes regiões hidrográficas: Uruguai, Guaíba e Litoral. Os poços analisados localizam-se na região centro-oeste do estado, abrangendo os municípios de São Vicente do Sul, com população estimada em 8.259 habitantes, e Cacequi, com 11.324 habitantes, ambos inseridos na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí; Rosário do Sul, que conta com 37.700 habitantes e integra a Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria; e Vila Nova do Sul, com 3.935 habitantes, pertencente à Bacia Hidrográfica do Vacacaí - Vacacaí Mirim [14] (Figura 1). O clima da região é subtropical úmido, apresentando temperatura média anual entre 17°C e 20°C [15].

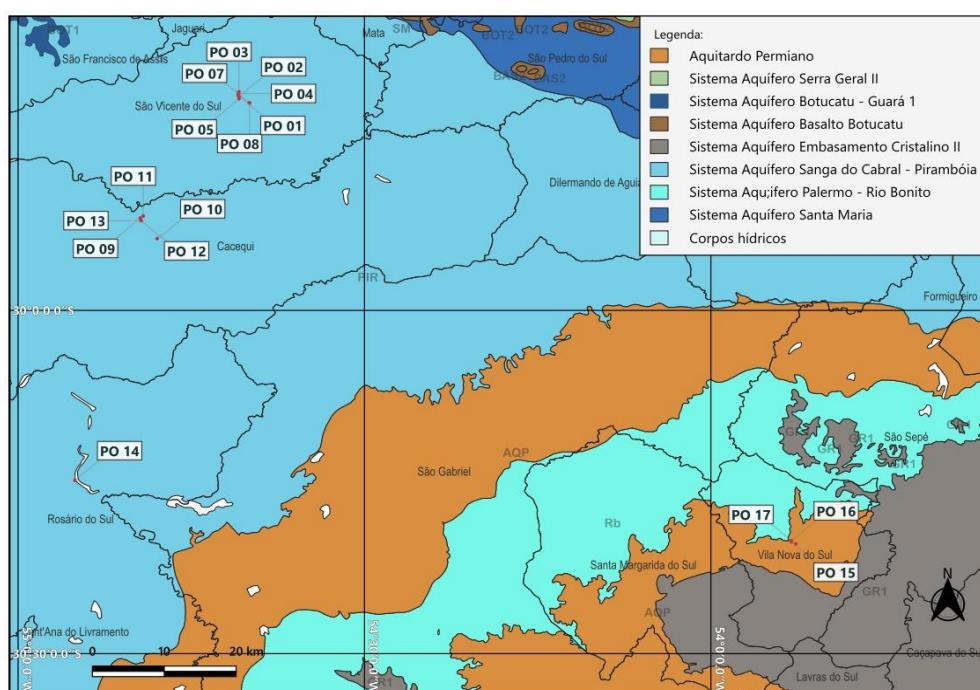


Figura 1. Mapa de localização e hidrogeológico dos municípios estudados.

De acordo com a Machado e Freitas (2005) [16], a hidrogeoquímica da área de estudo é caracterizada pelos Sistemas Aquíferos Botucatu/Guará, Sanga do Cabral/Pirambóia, Palermo/Rio Bonito e Embasamento Cristalino II. Esses autores descrevem o Sistema Aquífero Botucatu/Guará I com composição de águas predominantemente bicarbonatada cárcea, com teores variáveis de magnésio e sódio, e, em menor proporção, são identificadas águas do tipo cloretada sódica. Nas áreas aflorantes, compostas por arenitos quartzosos com intercalações pelíticas, observa-se baixa mineralização, com sólidos totais dissolvidos (STD) geralmente inferiores a 250 mg/L. Por outro lado, o Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia apresenta águas com composição variada entre bicarbonatada mista, sódica e cloretada sódica, com salinidades que partem de 100 mg/L nas áreas aflorantes, elevando-se para mais de 300 mg/L nas zonas confinadas, e atingindo entre 3.000 e 5.000 mg/L na região central, o que compromete seu uso para abastecimento público e irrigação. No Sistema Aquífero Palermo/Rio Bonito, as águas exibem salinidades variando entre 800 e 1.500 mg/L, podendo atingir concentrações superiores a 10.000 mg/L em grandes profundidades, caracterizando-se como salinas. Por sua vez, o Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II apresenta águas com salinidades geralmente inferiores a 300 mg/L nas áreas não influenciadas por sedimentos marinhos, sendo que poços perfurados em rochas graníticas podem apresentar enriquecimento em flúor.

## 2.2. Seleção e Análise dos Dados

Os dados hidroquímicos dos poços tubulares utilizados foram extraídos do banco de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), pertencente ao Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM), e do banco de dados de poços do grupo de Pesquisas de Águas Subterrâneas da UFRGS. Para a classificação hidrogeoquímica foram selecionadas vinte e uma análises físico-químicas pertencentes a dezessete poços, sendo que quatorze poços (PO 01 – PO 14) captam água do Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia e três poços (PO 15 – PO 17) captam do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II (Figura 1). Alguns desses poços apresentaram análises com mais de um período, aptas ao estudo, que contribuíram para observação da variabilidade de concentração de parâmetros. A triagem considerou as análises com valores de concentração para todos os elementos principais exigidos à classificação das águas e para o erro prático e teórico [17] e provenientes de poços tubulares com uso para o abastecimento público. As classificações das águas subterrâneas foram realizadas através do Diagrama de Piper e Diagrama de Stiff, no software Qualigraf v.1.17.

Por outro lado, a análise de valores máximos permitidos para potabilidade e para a concentração mínima para classificação de água mineral considerou cinquenta e oito análises químicas referentes a trinta e sete poços. A quantidade de análises avaliadas variou conforme o parâmetro químico (fluoreto, nitrato, alumínio, ferro, manganês, sulfato, magnésio e cálcio). Esses poços também apresentaram mais de um período de análise físico-química. Para a verificação do valor máximo permitido, para os elementos químicos selecionados, utilizou-se a Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 [13], enquanto, para a análise do potencial mineral das águas, utilizou-se o Código de Águas Minerais de 1945 [18]. A seleção e interpretação das razões iônicas foram baseadas em White et al. (1963) [19], Feitosa et al. (2008) [2], Marimon et al. (2013) [8] e Goffermann et al. (2015) [7]. Além disso, foi realizada estatística descritiva abordando média (Qtméd.), máxima (Qtmáx.), mínima (Qtmín.) e desvio padrão (dp), no software Microsoft Excel®.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise estatística mostrando os valores máximos, mínimos, médios e de desvio padrão para o pH, dureza, Sólidos Totais Dissolvidos (STD) e Condutividade Elétrica (CE) é apresentada na tabela 1. O pH apresentou uma média de 7,14, variando de levemente ácido a básico, mas permanecendo dentro do intervalo estabelecido para a potabilidade. A dureza da água oscilou entre branda e muito dura, conforme a classificação de Custódio e Lamas (1983) [17], sendo que 23 análises foram classificadas como branda, 5 como pouco dura, 22 como dura e 3 como muito

dura. Predominantemente, as águas classificadas como duras estão associadas ao Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia, na cidade de São Vicente. Segundo Alloway (2013) [20], as águas classificadas como duras e muito duras podem ter efeitos benéficos para a saúde humana, prevenindo problemas cardiovasculares. Com relação aos Sólidos Totais Dissolvidos (STD), foi observado um poço com valor acima do limite máximo permitido pela legislação de potabilidade. A elevação dos valores de STD, juntamente com a CE, ocorreu majoritariamente nas amostras provenientes de poços que captam água no Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia, também na cidade de São Vicente.

Goffermann et al. (2015) [7] analisaram 59 amostras na região de São Gabriel, observando que a maioria delas se enquadraram nas categorias duras a muito duras, especialmente aquelas provenientes de zonas confinadas e de maior profundidade. Também verificaram valores de CE variando entre 42,3 e 3.740,00 µS/cm, e de STD entre 26,00 e 2.704,00 mg/L. Esses autores identificaram os menores valores de CE e STD nas áreas de recarga, indicando águas mais jovens, enquanto os valores significativamente mais elevados foram registrados em áreas com maior grau de confinamento. Na região de estudo, os resultados de pH, dureza, STD e CE estão enquadrados nos intervalos observados por Goffermann et al. (2015) [7]. Isso sugere que, do ponto de vista hidrogeoquímico, o Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia pode ter um grau de confinamento maior na cidade de São Vicente do que na cidade de Cacequi, onde são observados valores mais brandos de CE e STD.

*Tabela 1. Valores estatísticos para os parâmetros pH, Dureza, STD e CE.*

Parâmetros	pH	Dureza (mg/L)	STD (mg/L)	CE µS/cm
Valor máximo	8,60	266,00	564,00	1.021,00
Valor mínimo	5,90	12,00	42,00	14,80
Valor médio	7,14	94,25	181,42	291,60
Desvio padrão	0,74	68,79	124,21	233,88
Quantidade de análises	56	55	18	36

### 3.1 Classificação hidrogeoquímica

A classificação hidrogeoquímica observada no diagrama de Piper abrange águas do tipo bicarbonatada cálcica (10 análises), mista-mista (1 análise), bicarbonatada mista (9 análises) e bicarbonatada sódica (1 análises) (Figura 2). Os diagramas de Stiff apresentam a relação das concentrações dos elementos principais nas águas bicarbonatada cálcica (Figura 3a), bicarbonatada sódica (Figura 3b) e bicarbonatada mista (Figura 3c). As águas bicarbonatada cálcica predominam nas áreas de recarga e nos aquíferos com fluxo mais recente, indicando pouca interação com as rochas ou ausência de confinamento. Por sua vez, as águas bicarbonatada sódica estão associadas a zonas de fluxo mais lento ou confinado, apresentando teores moderados a elevados de sódio e processos de troca iônica entre cálcio e sódio [7]. A água bicarbonatada mista pode marcar a transição entre a bicarbonatada cálcica e bicarbonatada sódica. Por outro lado, a água mista-mista apresenta uma concentração maior de sulfato e está no Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia. A elevação de sulfato nas águas subterrâneas pode estar associada a mistura com águas subterrâneas mais profundas, do tipo sulfatada sódica que é associada à dissolução de minerais de sulfatos e aos processos de salinização, relacionando a uma maior evolução hidroquímica [7].

Na área de estudo, tanto no Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia quanto no Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II, as águas subterrâneas foram predominantemente classificadas como bicarbonatada cálcica e bicarbonatada mista, denotando um ambiente de fluxo recente, com pouca interação água-rocha, evoluindo para um fluxo que tende a se tornar mais lento, caracterizado pelas águas bicarbonatadas mistas. A maior parte das águas bicarbonatada mista (5 análise, 4 poços) e a bicarbonatada sódica (1 poço) são identificadas no Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia sob a cidade de São Vicente, corroborando com a presença de valores

mais elevados de STD, CE e águas duras, e consequentemente, com a inferência de um confinamento maior desse aquífero nessa cidade (ao norte) do que em Cacequi (1 análise, bicarbonatada mista), ao sul. No Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II há uma alternância na classificação entre bicarbonatada cárcea e mista em dois poços, mostrando a necessidade de um período maior de acompanhamento da variabilidade hidroquímica.

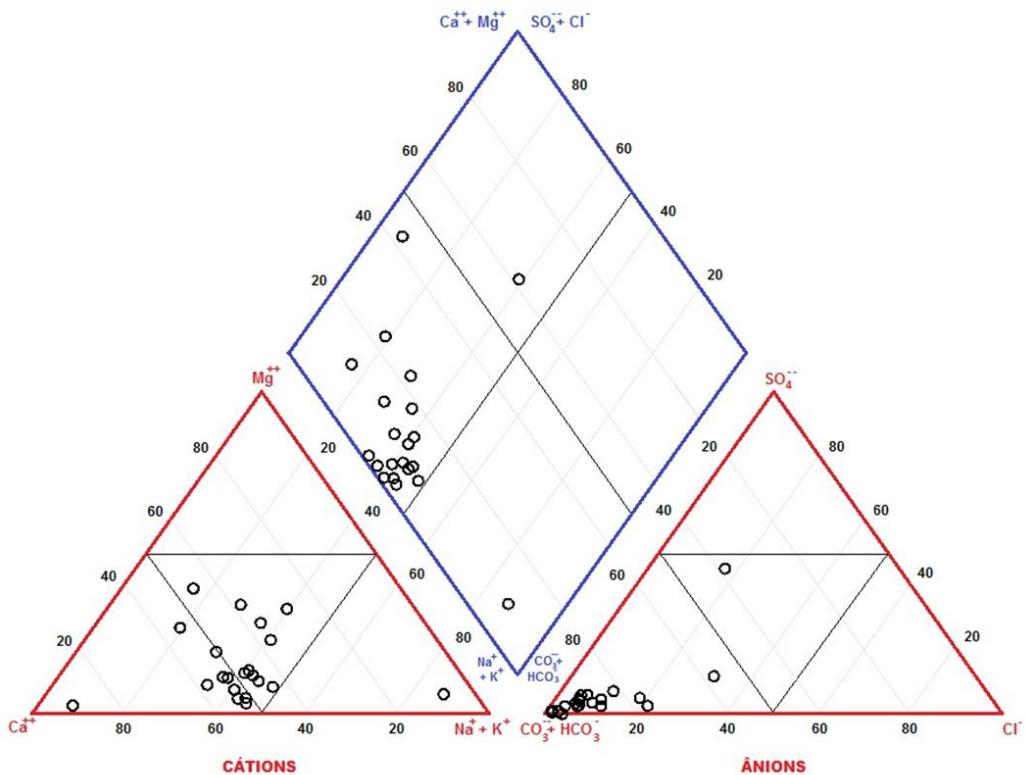


Figura 2. Diagrama de Piper mostrando a classificação das águas subterrâneas observadas na área.

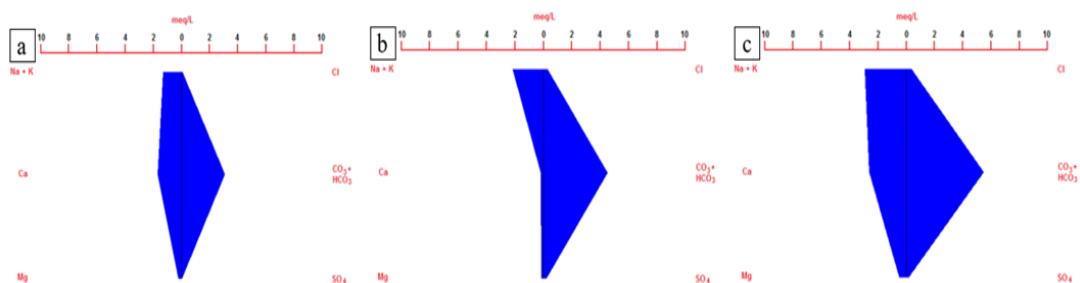


Figura 3. Diagrama de Stiff mostrando as diferentes geometrias hidroquímicas das águas bicarbonatada cárcea (a), sódica (b) e mista (c).

As razões iônicas, entre os elementos principais, podem sugerir processos hidrogeoquímicos de troca iônica, dissolução, precipitação, oxidação e redução. A análise das razões auxilia na interpretação da origem das águas classificadas nos diagramas de Piper e Stiff. White et al. (1963) [19] utilizaram as razões iônicas  $K^+ / Na^+$ ,  $HCO_3^- / Cl^-$ ,  $SO_4^{2-} / Cl^-$  das águas subterrâneas para indicar a interação água-rocha em diferentes ambientes geológicos. Esses autores observaram que a baixa proporção das razões  $K^+ / Na^+$  e  $SO_4^{2-} / Cl^-$  são indicativos de ambiente de rochas sedimentares areníticas.

Na área de estudo, as análises de água obtidas do Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia corroboram com essas proporções da bibliografia, exceto para a água classificada como

mista-mista que apresenta concentrações maiores de sulfato (Tabela 2). As razões  $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$  observadas nas tabelas 2 e 3 indicam o domínio do bicarbonato no sistema hidrogeoquímico. O bicarbonato é produto da dissolução de rochas carbonáticas através da hidrólise e o seu predomínio sobre os outros ânions indica que a água não é de circulação regional com longos períodos de residência [17]. O predomínio de cálcio na razão  $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$  corrobora para a inferência de dissolução de rochas carbonáticas [8]. Na área de estudo, é observado esse predomínio nos três poços do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II e em doze poços do Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia, sendo os valores máximos para  $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$  igual a 15,06 e 101,78, respectivamente (Tabelas 2 e 3).

*Tabela 2. Estatística descritiva das razões iônicas das águas captadas no Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia.*

	$\text{K}^+/\text{Na}^+$	$\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$	$\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$	$\text{Na}^+/\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+/\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$
Média	0,15	3,33	40,77	26,31	25,81	15,99	0,89
Mín	0,01	0,94	1,86	1,79	0,39	0,15	0,12
Máx	0,56	25,66	182,31	70,25	101,78	63,54	2,75
Desv. Pad	0,18	5,96	53,12	23,84	28,53	19,13	0,67
Nº de análises	10	16	16	10	15	16	15

*Tabela 3. Estatística descritiva das razões iônicas das águas captadas no Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II.*

	$\text{K}^+/\text{Na}^+$	$\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$	$\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$	$\text{Na}^+/\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+/\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$
Média	0,05	1,89	9,96	19,69	10,64	3,27	0,57
Mín	0,04	1,35	4,29	12,46	5,64	1,82	0,23
Máx	0,08	2,32	19,28	26,59	15,06	6,78	1,25
Desv. Pad	0,02	0,35	5,70	6,00	3,68	2,07	0,42
Nº de análises	4	5	5	4	5	5	5

A razão  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  pode indicar a existência de mais de uma origem do sódio. Quando o sódio apresenta uma proporção, pelo menos, duas vezes maior que o cloreto é um indicativo da ocorrência de processos de troca catiônica intensa do sódio com o cálcio procedente de argilominerais, especialmente a esmectita [8]. No Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia foram observados nove poços com a razão  $\text{Na}^+/\text{Cl}^- > 2$ , sendo o valor máximo 63,54 (Tabela 2). Por outro lado, no Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II foram observados valores acima da razão  $\text{Na}^+/\text{Cl}^- > 2$  em dois poços, sendo o valor máximo 6,78 (Tabela 3).

Os elevados valores da razão  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ , no Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia, provavelmente tem origem procedente de argilominerais, enquanto no Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II é possível que a dissolução do plagioclásio albítico e as trocas de íons entre o sódio, o cálcio e o magnésio sejam responsáveis pelo excesso de sódio em relação ao cloreto [21].

### 3.2 Potabilidade e água mineral

Ao avaliar a potabilidade das águas dos poços, observando o valor máximo permitido (VMP) da Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 [13], foram identificados cinco parâmetros químicos acima do VMP: fluoreto, nitrato, alumínio, ferro e manganês (Tabela 4); os parâmetros  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Ca}^{2+}$  não possuem VMP. O fluoreto atingiu a concentração de 2,09 mg/L em um poço que explota água do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II, ultrapassando o limite estabelecido para o consumo humano (1,5 mg/L). A presença excessiva de flúor também foi identificada no Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia, sendo associada a processos naturais de interação água-rocha [7, 22]. A ingestão de água com altas concentrações de flúor pode ocasionar doenças

como fluorose dentária (até 4 mg/L), fluorose esquelética (até 10 mg/L) e câncer (acima de 10 mg/L) [20].

O alumínio apresentou concentrações superiores ao VMP em 22 análises, variando entre 0,2 e 12,7 mg/L. Goffermann et al. (2015) [7] também identificaram algumas amostras com teores elevados desse elemento, atribuindo essa ocorrência à acidificação natural da água em determinados setores, o que promove a solubilização de minerais aluminosos. Os elementos ferro e manganês, usualmente associados, apresentaram concentrações predominantemente abaixo do VMP. No entanto, foram observados valores acima do recomendado para o ferro em 13 análises (0,3 a 1,5 mg/L) e para o manganês em 5 análises (0,15 a 0,42 mg/L). O enriquecimento desses elementos no sistema pode ser atribuído ao confinamento do aquífero e às condições redutoras, típicas de ambiente anóxico, que favorecem a solubilização de minerais portadores de ferro e manganês.

*Tabela 4. Valores estatísticos dos parâmetros fluoreto, nitrato, alumínio, ferro, manganês, sulfato, magnésio e cálcio (mg/L).*

Parâmetros	F <sup>-</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Al <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
Quantidade de análises	39	21	26	37	27	56	57
Valor máximo	2,09	17,60	12,70	1,50	0,42	35,00	97,00
Valor mínimo	0,10	0,05	0,02	0,09	0,003	0,10	2,40
Valor médio	0,31	1,72	1,64	0,34	0,08	5,30	26,97
Desvio padrão	0,32	3,78	2,47	0,40	0,10	5,98	21,53
VMP	1,50	10,00	0,20	0,30	0,10	-	-
CM	0,02	22,59*	-	50,00	-	30,00	48,00

VMP: Valor Máximo Permitido pela Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 [13]; aplicado para F<sup>-</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup> e Mn<sup>2+</sup>. CM: Concentração Mínima para classificação de água mineral (Brasil (1945) [18]; Brasil (2014) [24]), aplicado para F<sup>-</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Ca<sup>2+</sup>. CM\* é o valor transformado de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> para N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>; conforme Chandrashekhar (2014) [25], 100 mg/L de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> equivale a 22,59 mg/L de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Por fim, o nitrato permaneceu dentro dos limites permitidos na maioria das análises, exceto em uma, na qual foi registrada a concentração de 17,6 mg/L. Essa análise é proveniente de um poço tubular localizado em área rural que apresenta uma profundidade total de 110 m e um nível estático de 16,48 m. Esse valor de concentração é indicativo de contaminação antrópica nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia sob o município de Cacequi. Apesar de ser um evento pontual, é significativo e recomenda-se a realização de campanhas adicionais de coleta e análise, a fim de verificar a persistência de concentrações elevadas desse contaminante. A concentração de nitrato em águas subterrâneas, em condições naturais, costuma situar-se entre 0,1 e 10 mg/L, sendo que ambientes não impactados apresentam níveis geralmente inferiores a 2 mg/L, podendo atingir até 3 mg/L antes de serem considerados contaminados; valores superiores a 5 mg/L podem indicar influência antrópica, associada ao uso de fertilizantes, ao descarte de esgoto e à presença de dejetos animais [23].

Ainda, na Tabela 4, também são observados os valores mínimos de concentração química para caracterizar uma água como natural mineral. Foram identificados três elementos químicos, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e F<sup>-</sup>, com valores de concentração potenciais para águas naturais minerais na região. Valores de concentração de Ca<sup>2+</sup> acima de 48 mg/L [18] foram observados em quatorze análises (nove poços), conferindo um potencial para águas do tipo alcalino-terrosas cárnicas. Por outro lado, somente uma análise apresentou concentração de Mg<sup>2+</sup> acima de 30 mg/L [18], sugerindo, que localmente possa ocorrer águas do tipo alcalino-terrosas magnesianas. O fluoreto foi identificado nas trinta e oito análises químicas observadas, com concentrações acima de 0,02 mg/L [24], apresentando um valor médio de 0,31 mg/L. Essa constatação atribui, na área de estudo, ao Sistema Aquíferos Sanga do Cabral/Pirambóia o potencial para águas natural mineral alcalino-terrosas (cárnicas e magnesianas) e fluoretadas, enquanto para o Embasamento Cristalino II

somente água natural mineral fluoretada. Os parâmetros  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$  não são considerados para a classificação de água natural mineral.

### 3.3 Salinidade da água subterrânea

A salinidade dos aquíferos foi avaliada em vinte e uma análises de dezessete poços, sendo que todas apresentaram classificação como água doce. A salinidade é um parâmetro importante para avaliar a qualidade da água para consumo humano, dessedentação animal e irrigação. Conforme o diagrama da US Dept. of Agriculture são observadas 7 análises com classificação C0 – S1, 3 análises C1-S1 e 11 análises C2-S1 (Figura 4). C0-S1 representa o risco nulo de sódio e salinização da água, desta forma não há restrições para a irrigação. O campo C1-S1 representa o risco baixo de sódio e de salinização, sendo essas águas fracamente sódicas adequadas à maioria das culturas e solos, com exceção para solos com baixa permeabilidade, e podem ser utilizadas para quase todos os solos com fraco risco de formação de teores nocivos de sódio. Já o campo C2-S1 são águas que devem ser utilizadas com precaução, preferencialmente em solos silto-arenosos, siltosos ou arenó-argilosos e possuem fraco risco de formação de teores nocivos de sódio nos solos.

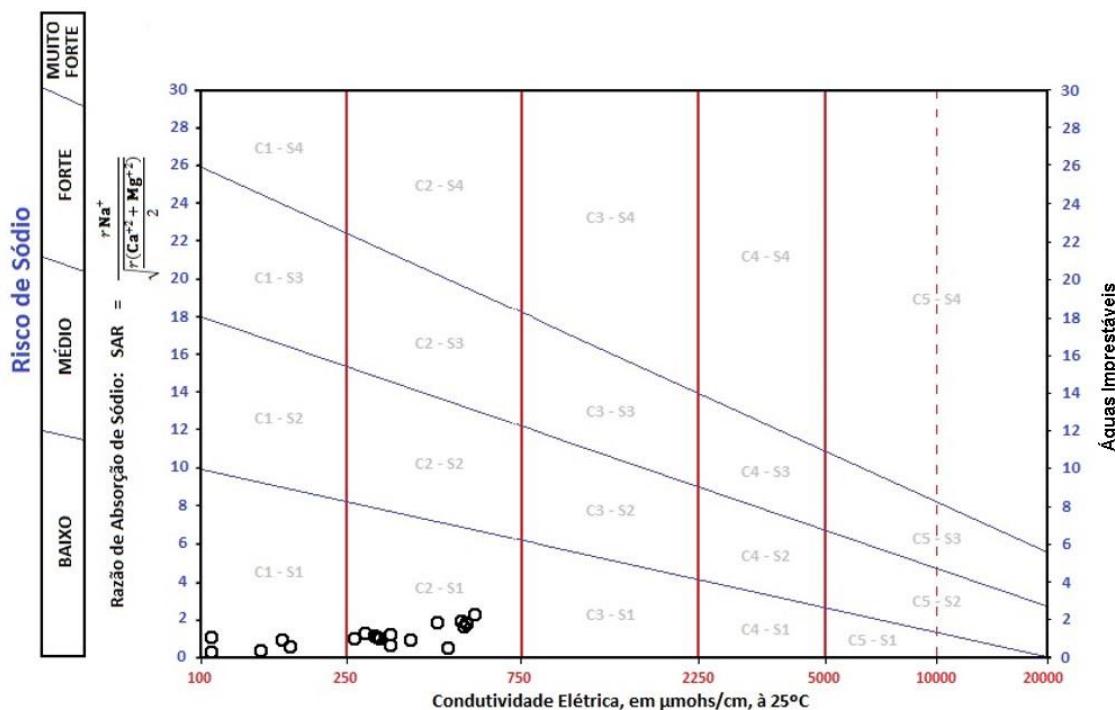


Figura 4. Diagrama da US Dept. of Agriculture com as classificações da qualidade das águas para irrigação quanto ao risco de salinização e o risco de sódio.

## 4. CONCLUSÃO

Este estudo realizou uma caracterização hidrogeoquímica das águas subterrâneas na região centro-oeste do Estado do Rio Grande do Sul, abrangendo os municípios de São Vicente do Sul, Cacequi, Rosário do Sul e Vila Nova do Sul. O principal objetivo foi classificar as águas subterrâneas, avaliar alguns parâmetros quanto à potabilidade, identificar o risco de salinização para irrigação e abordar o potencial para água mineral natural.

As análises hidroquímicas indicaram predominância de águas bicarbonatada mista e sódica, duras e muito duras e valores maiores de STD e CE, associadas ao Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia, na cidade de São Vicente, indicando grau de confinamento maior do que na cidade de Cacequi. A classificação hidrogeoquímica, para toda a amplitude da área de estudo,

mostrou predomínio de águas bicarbonatada cálcica e mista, que podem ser associadas a áreas de recarga e fluxos recentes que tendem a evoluir para um fluxo mais lento, indicando interação moderada com o meio aquífero. As razões iônicas  $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$  e  $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$  indicam o domínio do bicarbonato e sugerem a dissolução de carbonato no ambiente hidrogeoquímico. Por outro lado, a razão  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  indicou processos de troca catiônica do sódio vinculada aos argilominerais e, provavelmente, dissolução de plagioclásio e trocas de íons entre o sódio, o cálcio e o magnésio. Ressalte-se, adicionalmente, o potencial efeito benéfico da elevada dureza para a saúde humana.

A análise dos parâmetros físico-químicos revelou que, embora a maioria das amostras apresente qualidade compatível com os padrões de potabilidade, foram identificadas excedências ao VMP em cinco parâmetros químicos — fluoreto, nitrato, alumínio, ferro e manganês. A ocorrência de concentrações elevadas de fluoreto, alumínio, ferro e manganês foi atribuída a processos naturais de interação água-rocha, especialmente em ambientes confinados e sob condições redutoras, que favorecem a solubilização desses elementos. Por sua vez, a presença de nitrato está relacionada a fontes de contaminação antrópica, enquanto a elevada concentração de fluoreto, embora de origem natural, representa um risco potencial à saúde pública, podendo ocasionar patologias relacionadas a fluorose dentária.

O potencial para água natural mineral fluoretada foi observado em todos os poços que apresentaram análise química com o parâmetro fluoreto e, além disso, identificou-se potencial para águas alcalino-terrosas cálcica e magnesiana no Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia. A maioria das águas analisadas apresentou salinidade classificada como doce, sendo, portanto, adequada para o consumo humano, a dessedentação animal e, com algumas restrições, para a irrigação.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento e ao CNPq pela bolsa de iniciação científica PIBIC para o aluno de graduação que participou deste estudo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Portugal Júnior PS, Reydon BP, Portugal NS. As águas minerais no Brasil: uma análise do mercado e da institucionalidade para uma gestão integrada e sustentável. *Ambiente & Água*. 2015 abr;10(2):413-30. doi: 10.4136/ambi-agua.1357
- Feitosa FAC, Manoel Filho J, Feitosa EC, Demétrio JGA, organizadores. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro (RJ): CPRM; 2008.
- Mestrinho SSP. Geoquímica das águas subterrâneas. In: Feitosa FAC, Manoel Filho J, Feitosa EC, Demétrio JGA, organizadores. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro (RJ): CPRM; 2008. p. 359-79.
- Sooraj S, Thomas J, Baruah MP. Hydrogeochemical characterization and potential geogenic source of fluoride contamination in Gariaband district of southern Chhattisgarh, India. *Environ Geochem Health*. 2025;47:106. doi: 10.1007/s10653-025-02402-2
- Koh D-C, Chae G-T, Yoon Y-Y, Kang B-R, Koh G-W, Park K-H. Baseline geochemical characteristics of groundwater in the mountainous area of Jeju Island, South Korea: Implications for degree of mineralization and nitrate contamination. *J Hydrol*. 2009;376:81-93. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.07.016
- Roy PD, García-Arriola OA, Selvam S, Vargas-Martínez IG, Sánchez-Zavala JL. Geochemistry of some fluoride and nitrate enriched water resources from the Oriental Basin: A prospective health risk hotspot from eastern-central Mexico. *Environ Geochem Health*. 2025;47:114. doi: 10.1007/s10653-025-02421-z
- Goffermann M, Viero PA, Silva EB. Caracterização hidrogeológica e hidroquímica das águas subterrâneas da região de São Gabriel, RS. *Pesqui Geocienc*. 2015 set/dez;42(3):239-61. doi: 10.22456/1807-9806.78123

8. Marimon MPC, Roisenberg A, Suhogusoff AV, Viero AP. Hydrogeochemistry and statistical analysis applied to understand fluoride provenance in the Guarani Aquifer System, Southern Brazil. *Environ Geochem Health.* 2013;35:391-403. doi: 10.1007/s10653-012-9502-y
9. Reginato PAR, Pletsch JS, Vargas T, Carlos FS. Variações de pH e CE na hidroquímica das águas minerais do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) envasadas no Estado do Rio Grande do Sul. *Águas Subterr.* 2024;38(1):e-30253. doi: 10.14295/ras.v38i1.30253
10. Santos EJ, Oliveira Junior DR, Hermann AB, Sturgeon RE. Chemical quality of bottled mineral waters from markets of Curitiba-PR-Brazil. *Braz Arch Biol Technol.* 2016;59:e16160111. doi: 10.1590/1678-4324-2016160111
11. Sunkari ED, Danladi IB. Assessment of trace elements in selected bottled drinking water in Ghana: A case study of Accra metropolis. *Int J Water Resour Environ Eng.* 2016;8(10):137-42. doi: 10.5897/IJWREE2016.0685
12. Quattrini S, Pampaloni B, Brandi ML. Natural mineral waters: chemical characteristics and health effects. *Clin Cases Miner Bone Metab.* 2016 Sep-Dec;13(3):173-80. doi: 10.11138/ccmbm/2016.13.3.173
13. Brasil. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília (DF): Diário Oficial da União; 07 mai 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>.
14. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Cidades e Estados do Brasil [Internet]; 2025 [citado em 30 mai 2025]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>.
15. Scotti AAV, Petsch C, Secretti E, Ben FD, Nascimento GM, Schnorr GG, et al. Série atlas municipais: Atlas geoambiental de São Vicente do Sul. Santa Maria (RS): Atena; 2021. doi: 10.22533/at.ed.831211105
16. Machado JLF, Freitas MA. Projeto Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul: Relatório final. Porto Alegre (RS): CPRM; 2005.
17. Custodio E, Llamas MR. Hidrologia subterrânea. 2. ed. Barcelona (ES): Ômega S/A; 1983.
18. Brasil. Decreto-Lei nº 7.841, de 8 de agosto de 1945. Código de águas minerais. Dispõe sobre o aproveitamento das águas minerais, termais, gasosas e outras de propriedades semelhantes. Brasília (DF): Diário Oficial da União; 10 ago 1945. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto-lei/del7841.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/del7841.htm).
19. White DE, Hem JD, Waring GA. Chemical composition of subsurface waters. In: Fleischer M, editor. *Data of Geochemistry.* 6. ed. Washington (DC): United States Government Printing Office; 1963. p. 1-59. (Geological Survey Professional Paper, 440-F).
20. Alloway B. *Essentials of medical geology.* Dordrecht (NL): Springer Netherlands; 2013.
21. Manzano M, Guimaraens M. Estudio del origen de la composición química de las aguas subterráneas del Sistema Acuífero Guarani. Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guarani. SBCC/01/04 e 1/1018.1. Montevideo (UY): Tahal Consultin Eng Ltda, Seinco SRI, Hidroestruturas SA, Hidrocontrol SA, Hidroambiente SA; 2009.
22. Kern ML, Vieiro AP, Machado G. The fluoride in the groundwater of Guarani Aquifer System: the origin associated with black shales of Paraná Basin. *Environ Geol.* 2008;55:1219-33. doi: 10.1007/s00254-007-1067-1
23. United States Environmental Protection Agency (EPA). Report on the Environment [Internet]. Washington (DC): EPA; 2008 [citado em 15 jul 2025]. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1002S1J.TXT>.
24. Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral. Portaria nº 540, de 20 de dezembro de 2014. Estabelece critérios para classificação e caracterização das águas minerais naturais e potáveis de mesa. Brasília (DF): Diário Oficial da União; 22 dez 2014. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/diarios/DOU/2014/12/19/Secao-1>.
25. Chandrashekhar B. Re: How can I convert the grams of nitrate ( $\text{NO}_3$ ) to Nitrate nitrogen ( $\text{N}-\text{NO}_3$ ) using standard graph equation ( $\text{Y}=\text{MX}+\text{C}$ )? [Internet]. ResearchGate; 2014 [citado em 15 jul 2025]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/post/How-can-I-convert-the-grams-of-nitrate-NO3-to-Nitrate-nitrogen-N-NO3-using-standard-graph-equation-YMX-C>.