

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**

**FERNANDA FORIN DE SOUZA**

**HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS TERMAIS E NÃO TERMAIS DA REGIÃO DA  
CALDEIRA VULCÂNICA DE POÇOS DE CALDAS - MG**

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2024**

**FERNANDA FORIN DE SOUZA**

**HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS TERMAIS E NÃO TERMAIS DA REGIÃO DA  
CALDEIRA VULCÂNICA DE POÇOS DE CALDAS – MG**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para  
obtenção do Título de Mestre no Programa de Pós-Graduação  
em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal  
de Alfenas.

Orientador: Diego de Souza Sardinha

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2024**

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Souza, Fernanda Forin de .

Hidroquímica das águas termais e não termais da região da caldeira vulcânica de Poços de Caldas - MG / Fernanda Forin de Souza. - Poços de Caldas, MG, 2024.

56 f. : il. -

Orientador(a): Diego de Souza Sardinha.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) -  
Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2024.

Bibliografia.

1. Hidroquímica. 2. Águas subterrâneas. 3. Águas termais. 4.  
Classificação das águas. I. Sardinha, Diego de Souza, orient. II. Título.

FERNANDA FORIN DE SOUZA

**HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS TERMAIS E NÃO TERMAIS DA REGIÃO DA CALDEIRA VULCÂNICA DE POÇOS DE CALDAS  
- MG**

O Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Linha de Pesquisa: Recursos Hídricos e Meio Ambiente

Aprovada em: 18 de outubro 2024.

Prof. Dr. Diego de Souza Sardinha  
Presidente da Banca Examinadora  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Marcelo Ribeiro Barison  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Roni Antônio Mendes  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por **Diego de Souza Sardinha, Professor do Magistério Superior**, em 18/10/2024, às 14:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1359555** e o código CRC **1AB1E6DF**.

Dedico esse trabalho aos meus pais, Fausto e Elizabeth, à minha irmã Juliana, ao meu esposo Paulo e à minha filha Clarice.

## **AGRADECIMENTOS**

Meus mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que esta tese de mestrado se concretizasse.

Ao professor Dr. Diego Souza Sardinha, pela orientação, pelo incentivo, pelo encorajamento e suporte durante o desenvolvimento desta tese e, principalmente por todos os conhecimentos já passados desde a época de graduação.

Aos professores Marcelo Ribeiro Barison e Roni Mendes pelas correções e sugestões apresentadas para o enriquecimento deste trabalho.

À Jussara Marrichi, turismóloga responsável pelo Balneário de Pocinhos do Rio Verde, pela disponibilidade e informações passadas.

À Associação Atlética Caldense por permitir o estudo das águas por ela utilizada.

Aos funcionários da Thermas Antônio Carlos: Zé Paulinho, pelo acompanhamento durante a coleta de amostras para análises e ao Claudio pelo acompanhamento e orientação do uso da biblioteca da Thermas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo hidroquímico das águas termais e não termais da região da caldeira vulcânica de Poços de Caldas por meio do levantamento e caracterização das fontes, e avaliação da qualidade da água considerando análises físico-químicas. A caracterização hidroquímica pode ser obtida por meio do balanço iônico e cálculo de erro analítico, diagrama de Piper, cálculo do índice de troca de bases (itb) e cálculo das razões iônicas. Os pontos estudados estão localizados em áreas de ocorrência de litologias do tipo sienito Pedra Branca, tinguaito e nefelina sienito e foiaito. Mais de 64% dos pontos estudados possuem pH com valores altos, acima de 7,4. O grupo de águas termais apresentou maiores valores de temperatura, pH, condutividade, turbidez e sólidos totais dissolvidos (STD) e apresentou menores valores para potencial de oxidoredução (ORP). As análises apresentaram altas concentrações de sódio, bicarbonato e sulfato na maior parte das amostras. O estudo hidroquímico apontou a predominância de águas bicarbonatadas sódicas e alguns pontos como águas cloretadas sódicas. A maior parte dos pontos apresentou índice de troca de bases (itb) negativo devido a maior concentração de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  em relação ao cloreto. Quanto a temperatura a maioria foi classificada como mesotermal e secundariamente como termal e hipotermal. A classificação segundo a ordem dos cátions principais teve como resultado  $r\text{Na}^+ > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$  em todas as amostras, segundo a ordem dos ânions principais a maioria das amostras apresentaram  $r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^-$ . Alguns pontos obtiveram a ordem  $r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-}$  típicos de aquíferos em rochas cristalinas. A composição química das águas das fontes estudadas tem características atribuídas ao litotipo hospedeiro, processos de troca catiônica, intemperismo químico e maior tempo de contato água/rocha, provavelmente devido a hidrólise de ortoclásios e sanidinas (feldspato sódico) e dissolução incongruente de silicatos nefelinas.

Palavras-chave: hidroquímica; águas subterrâneas; águas termais; classificação das águas.

## ABSTRACT

This paper presents a hydrochemical study of the thermal and non-thermal waters of the Poços de Caldas volcanic caldera region through a survey and characterization of the sources, evaluation of water quality considering physical-chemical analyses. Hydrochemical characterization can be obtained through ionic balance and analytical error calculation, Piper diagram, Base Exchange index (BEI) calculation and ionic ratio calculation. The waters were classified according to the content of their main cations and anions. The points studied are located in areas where Pedra Branca syenite, tinguaita and nepheline syenite and foidite lithologies occur. More than 64% of the points studied have high pH values, above 7.4. The thermal water group showed higher values for temperature, pH, conductivity, turbidity and total dissolved solids (TDS) and lower values for oxidoreduction potential (ORP). The analyses showed high concentrations of sodium, bicarbonate and sulphate in most of the samples. The hydrochemical study showed a predominance of sodium bicarbonate waters and some points as sodium chloride waters. Most of the points had a negative base exchange index (BTE) due to the higher concentration of  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  compared to chloride. The classification according to temperature was mostly classified as mesothermal and secondarily as thermal and hypothermal. The classification according to the order of the main cations resulted in  $r\text{Na}^+ > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$  in all the samples, and according to the order of the main anions most of the samples showed  $r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^-$ , with some points having the order  $r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-}$ , typical of aquifers in crystalline rocks. The chemical composition of the waters of the studied sources has characteristics attributed to the host lithotype, cation exchange processes, chemical weathering and longer water/rock contact time, probably due to the hydrolysis of orthoclases and sanidines (sodium feldspar) and incongruent dissolution of nepheline silicates.

Keywords: hydrochemistry; groundwater; thermal waters; water classification.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Delimitação da caldeira vulcânica com as principais falhas.....	15
Figura 2- Mapa Geológico do Complexo Alcalino de Poços de Caldas .....	16
Figura 3- Fontes não termais .....	31
Figura 4- Fontes termais .....	32
Figura 5- Distribuição espacial dos pontos amostrados .....	32
Figura 6- Indicação do uso das águas das fontes Rio Verde, Pedro Botelho e dos Macacos...	39
Figura 7- Correlações de condutividade nas águas termais e não termais .....	39
Figura 8- Correlações de sólidos totais dissolvidos nas águas termais e não termais .....	40
Figura 9- Correlações de bicarbonato nas águas termais e não termais .....	40
Figura 10- Diagrama Eh x pH para as águas termais e não termais .....	41
Figura 11- Correlação entre o somatório de cátions e ânions e a distribuição dos erros e condutividade elétrica.....	43
Figura 12- Diagrama de Piper (meq/L) gerado para a classificação das amostras das águas termais e não termais .....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação das Águas .....	20
Tabela 2- Localização, nome do ponto e pontos de amostragem .....	22
Tabela 3- Erro admissível no balanço iônico .....	25
Tabela 4- Principais razões iônicas e relações iônicas (Hounslow, 1995). Valores teóricos e significados com a relação genética (Hem, 1985).....	27
Tabela 5- Referência para a Classificação de acordo com a temperatura. ....	28
Tabela 6- Referência para a classificação por íons principais em meq/L .....	28
Tabela 7- Referência para o ânion cloreto .....	28
Tabela 8- Referência para o ânion sulfato .....	29
Tabela 9- Referência para o ânion bicarbonato .....	29
Tabela 10- Referência para a classificação segundo Schoeller .....	29
Tabela 11- Dados de latitude, longitude e altitude dos pontos estudados .....	30
Tabela 12- Resultados dos parâmetros físicos e químicos .....	33
Tabela 13- Resultados dos parâmetros químicos .....	36
Tabela 14- Resultados de dióxido de silício, ferro, cobre e alumínio .....	38
Tabela 15- Valores máximos permitidos (VMP) para padrão de potabilidade .....	38
Tabela 16- Somatória dos cátions e ânions e diferença em mEq/L.....	42
Tabela 17- Tabela de porcentagem de erro com pH e condutividade .....	42
Tabela 18- Resultado da classificação dos pontos de acordo com a temperatura .....	46
Tabela 19- Resultado da classificação das águas termais e não termais .....	47

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
3.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO.....	15
<b>3.1.2</b>	<b>Aspectos históricos das fontes termais.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Poços de Caldas.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Pocinhos do Rio Verde .....</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>22</b>
4.1	LEVANTAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES DE ÁGUAS ....	22
4.2	MÉTODOS ANALÍTICOS .....	23
4.3	CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA.....	24
4.4	CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS .....	28
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>30</b>
5.1	LOCALIZAÇÃO.....	30
5.2	PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS .....	33
5.3	PARÂMETROS QUÍMICOS.....	35
5.4	ANÁLISE DE CORRELAÇÃO.....	39
5.5	CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA.....	41
5.6	CLASSIFICAÇÃO DAS FONTES TERMAIS E NÃO TERMAIS.....	45
5.7	PROVENIÊNCIA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA .....	47
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A depender de suas características, as águas podem ser divididas em diferentes classificações (CETESB, 2017). Para esta pesquisa o foco foi direcionado para as águas subterrâneas e para as águas termais. Existem algumas características que tornam o uso das águas subterrâneas mais vantajosas em relação às águas superficiais: elas sofrem menos influência de variações climáticas, possuem temperaturas constantes e podem ser extraídas próximo ao local de uso, além de serem menos vulneráveis à contaminação antrópica.

De acordo com a resolução CONAMA nº396/2008 as águas subterrâneas são águas que ocorrem naturalmente no subsolo, sendo um atributo essencial do ciclo hidrológico, infiltra-se no solo, passam por espaços vazios entre rochas e se armazenam em aquíferos, que podem ser de pequenas dimensões ou até milhares de km<sup>2</sup> (Brasil, 2008).

Além disso, o trajeto percorrido pelas águas após infiltrar-se no solo provoca sua depuração, tornando-a mais adequada para o consumo, podendo ser dispensada de tratamentos prévios, embora isto não signifique que as águas subterrâneas não sejam vulneráveis a contaminações, sendo necessário verificar sua qualidade constantemente.

Como mencionado por Mourão *et al.* (2000), as características físico-químicas das águas subterrâneas podem ser influenciadas por fatores intrínsecos ao aquífero, como a composição e natureza mineralógica da rocha, condições de circulação e armazenamento da água além da extensão do percurso subterrâneo e também por fatores externos como o clima e poluição.

As águas subterrâneas possuem um importante papel no abastecimento público, principalmente onde a água superficial é escassa ou imprópria para o consumo humano. Dessa forma, o uso de águas subterrâneas surge como um recurso complementar ou uma alternativa estratégica para o gerenciamento integrado das águas em áreas metropolitanas no Brasil e praticamente como único manancial em áreas rurais (Rebouças, 2013).

Já as águas termais são águas subterrâneas, mas com algumas particularidades. Kupper e Bergamo (2020), definem água termal como uma água natural de origem subterrânea, que contém em sua composição íons como sódio, magnésio, zinco, boro e manganês, originários das rochas componentes das camadas profundas do solo.

Segundo Todd (1980), as nascentes termais descarregam água com temperatura superior à das águas subterrâneas locais normais. Os termos relativos fontes quentes e fontes termais são comuns, em geral altamente mineralizadas e consistem em sua maior parte águas de lixiviação que foram modificadas em qualidade por sua passagem pelo subsolo. As águas termais possuem composições distintas, sendo diferentes entre si, pois dependem do local onde surgem, tipo de

rocha, clima, relevo e outros (Carvalho, 2013). Todd (1980), cita que os fenômenos hidrotermais envolvendo a liberação de água e vapor estão quase sempre associados a rochas vulcânicas e tendem a se concentrar em regiões onde ocorrem grandes gradientes geotérmicos.

O Código de Águas Minerais, decreto-Lei, nº 7841 de 1945, em seu capítulo VIII determina a classificação das fontes de água mineral quanto aos gases em fontes radioativas, fontes torioativas e fontes sulfurosas, e quanto à temperatura em fontes frias, fontes hipotermiais, fontes isotermiais e fontes hipertermiais (Brasil, 1945). Conforme Carvalho (2013), a classificação de águas termais sulfurosas é devida a temperatura alta e teor de enxofre, que as tornam com características peculiares distintas de outras águas, sendo utilizadas como medicamento contribuindo para o bem estar, qualidade de vida e recuperação da saúde.

Também se encontra na literatura o termo águas termominerais em referência às águas termais. O uso das águas termominerais para tratamento de saúde é uma prática antiga, utilizada como elemento terapêutico há mais de cinco mil anos em diversas culturas. Existem registros do uso pelos indianos, chineses, egípcios, gregos em diversas modalidades e tratamentos para muitas moléstias e situações (Hellmann; Rodrigues, 2017).

Ainda de acordo com Hellmann e Rodrigues (2017), o uso das águas como recurso terapêutico recebe diferentes denominações, que variam de acordo com: o tipo da água, temperatura, composição química, formas de utilização e até mesmo segundo as profissões que fazem uso do recurso, tais como balneoterapia, crenoterapia, talassoterapia, crioterapia, hidroterapia, hidroginástica, hidrologia médica, incluindo também o termo Termalismo Social. Em Minas Gerais, as principais estâncias termais e hidrominerais estão localizadas nos municípios de Poços de Caldas, Poços do Rio Verde (Caldas), Araxá, Caxambu, São Lourenço, Cambuquira, Lambari, Contendas do Rio Verde, Fervedouro, Patrocínio e Ibiraci (Caldas, 2024).

Na região de estudo, Caldas e Poços de Caldas, as águas termais e não termais são largamente utilizadas pela população local e por turistas. As fontes termais são de livre acesso e não estão livres de impactos negativos, seja por ações antrópicas ou geradas pela própria natureza, por constituintes encontrados nas rochas ou por produtos da meteorização. Os usos dessas águas dependem em grande parte de suas características físicas e químicas, sendo de notável importância a disponibilização de informações científica sobre estes recursos, para auxiliar na caracterização e avaliação da qualidade da água, que é um pré-requisito na tomada de decisão sobre seu uso.

Devido à importância e a histórica utilização desse recurso, caracterizar a qualidade dessas águas subterrâneas por meio dos processos e análises hidroquímicas contribui para o seu

diagnóstico e preservação. Neste contexto, o presente trabalho tem como finalidade caracterizar e avaliar a qualidade das águas, levantando informações para compor um histórico de dados de monitoramento e comportamento das águas subterrâneas da região da Caldeira Vulcânica de Poços de Caldas, também com o propósito de suprir a carência de estudos sobre a hidroquímica das águas da região. As informações levantadas podem ser úteis para os órgãos competentes no momento de desenvolver políticas e instrumentos de gestão, que possa ser aplicado a temas de proteção e qualidade das águas.

## 2 OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo geral a avaliação hidroquímica das fontes de águas termais e não termais da região da caldeira vulcânica de Poços de Caldas - MG, bem como conhecer a sua classificação mediante análises físicas e químicas.

### 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dentre os objetivos específicos estão:

- a) Levantamento e caracterização das fontes de águas;
- b) Caracterização hidroquímica;
- c) Avaliação da qualidade das águas;
- d) Análise das razões iônicas e índice de troca de bases (itb);
- e) Classificação das águas termais e não termais.

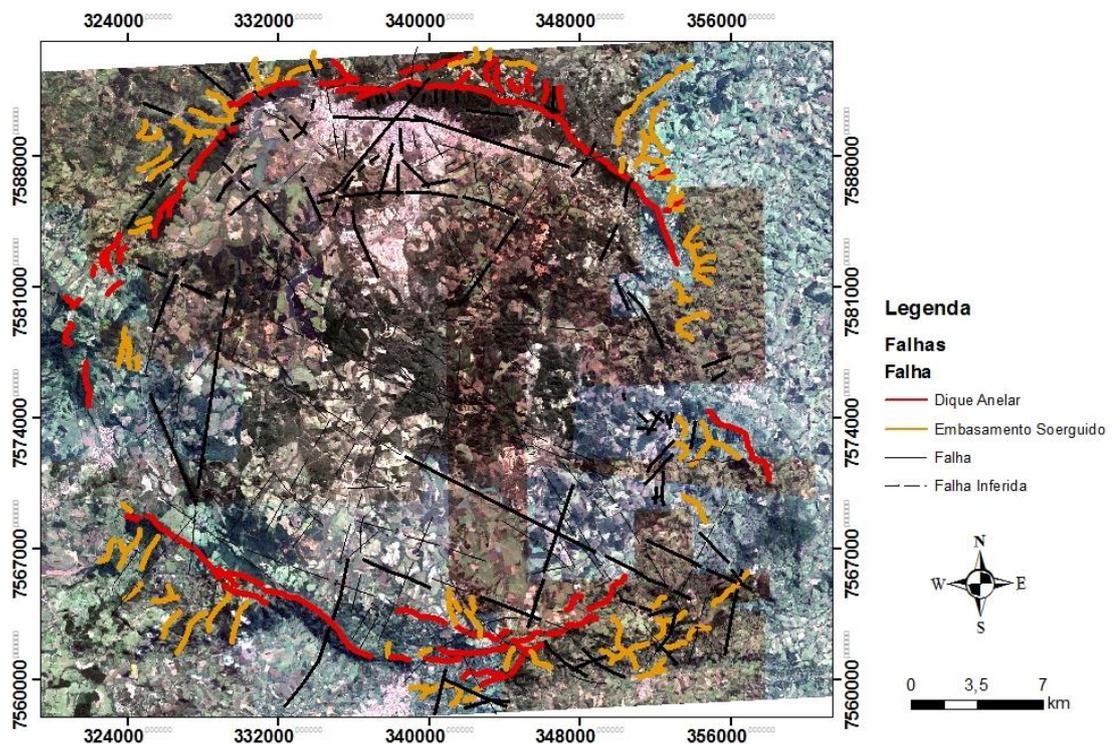
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na região sudoeste do estado de Minas Gerais, na estância hidromineral de Poços de Caldas e Pocinhos do Rio Verde (Caldas), que fazem divisa com o estado de São Paulo e tem como municípios limítrofes Bandeira do Sul e Botelhos ao norte, Andradas ao sul e Águas da Prata (estado de São Paulo) a oeste.

Poços de Caldas e Caldas são cidades que se destacam por estarem situadas no interior do complexo alcalino de uma caldeira vulcânica. A caldeira é delimitada por cristas e serras, constituindo uma estrutura circular com diâmetro médio de 30 km e extensão de 800 km<sup>2</sup> em superfície, formada pelas bordas da chaminé vulcânica sustentadas em cotas com cerca de 1500 a 1600 m (Figura 1).

Figura 1- Delimitação da caldeira vulcânica com as principais falhas



Fonte: Google Earth (2022).

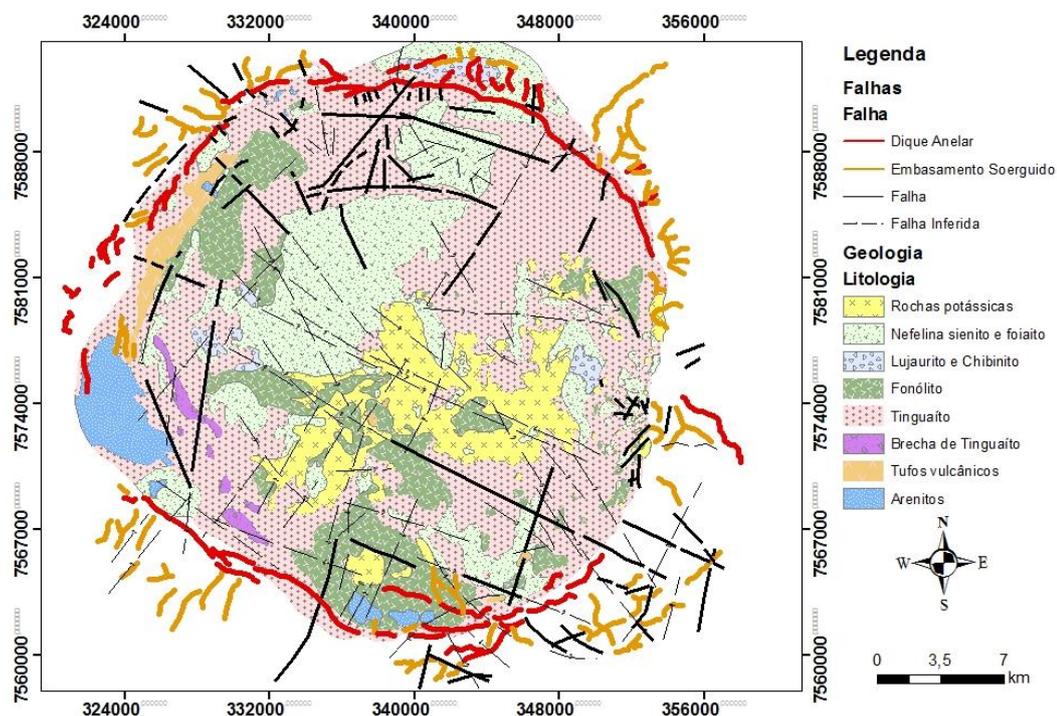
Legenda: Falhas: modificado de Ulbrich *et al.* (2002) e Indústrias Nucleares do Brasil (INB, 2011).

O complexo alcalino de Poços de Caldas trata-se de uma estrutura vulcânica circular que teve as primeiras manifestações no Cretáceo superior (87 milhões de anos) e evoluiu através de fases sucessivas por 27 milhões de anos (Moreira; Almeida; Câmara, 2001). De acordo com

Ellert (1959), ocorreram 6 fases para a formação do complexo alcalino: soerguimento do embasamento; atividades vulcânicas; formação de caldeiras; atividade magmática alcalina; formação dos diques anelares e intrusões de foiaitos, chibinitos e lujauritos. A caldeira vulcânica alcalina possui características diferenciadas, pois está inserida em um contexto geológico e geomorfológico muito diversificado com paisagens dotadas de rios, cachoeiras, planaltos, montanhas e vales, onde se destacam as fontes termais (Sardinha; Godoy, 2019).

Na região, as litologias predominantes, de origem alcalina são rochas plutônicas (foiaito) e sub-vulcânicas hipoabissais (tinguaítos), mas também são marcadas pela presença de representantes extrusivos (fonólitos, tufos e brechas vulcânicas). Ocorrem também os litotipos de transição como lujauritos e chibinitos, rochas potássicas (foiaito enriquecido de potássio, resultante da alteração por processos hidrotermais e de intemperismo do tinguaíto), afloramentos de arenitos e nefelina sienito (Figura 2).

Figura 2- Mapa Geológico do Complexo Alcalino de Poços de Caldas



Fonte: Adaptado de Ellert (1959); Bacha *et al.* (2020); INB (2011); Sardinha *et al.* (2015); Sardinha *et al.* (2018); Ulbrich *et al.* (2002).

Foiaítos e tinguaíto são rochas intrusivas, fonólitos, brechas e tufos são rochas vulcânicas, que são rochas densas, não porosas e com capacidade aquífera muito reduzida, de forma que as possibilidades de armazenar água estão condicionadas de acordo com o grau de meteorização e fraturamento (Cruz; Peixoto, 1991). A mineralogia preferencial dessas rochas é

composta por feldspato potássico (sanidina ou ortoclásio), feldspatóides (nefelina, leucita, sodalita, analcima), piroxênio sódico (egirina, egirina augita), hornblenda, biotita e plagioclásios (albita, oligoclásio) (Silva, 2020).

Segundo estudos de Cruz e Peixoto (1991), no interior do planalto ocorre grande número de falhas e fraturas abertas onde identificou-se, através de aerofotos, pelo menos três direções principais, exatamente no ponto de cruzamento das três fraturas é onde ocorre a surgência das águas termais (Fonte de Pedro Botelho e dos Macacos - Figuras 1 e 2). A circulação e armazenamento das águas subterrâneas termais estão restritos ao sistema de aquífero fraturado ou fissurado (Poços de Caldas, 2022).

A região da Caldeira situa-se na província geomorfológica denominada Planalto Sul de Minas que é subdividido em três unidades: a Superfície do Alto Rio Grande, o Planalto de São Pedro de Caldas e o Planalto de Poços de Caldas (CPRM, 1979). O relevo é caracterizado como ondulado e fortemente ondulado (Poços de Caldas, 2022).

O clima predominante da região da caldeira vulcânica é classificado, segundo Köppen (1948), como Clima subtropical de altitude (Cwb), mesotérmico de clima úmido com verão brando e inverno seco. A temperatura média do mês mais frio, que ocorre de abril a setembro, é de 14,3°C e a temperatura média do mês mais quente, de outubro a março, não ultrapassa 22°C. A redução da precipitação coincide com o final do outono, abrangendo os três meses de inverno, o período chuvoso inicia-se no mês de setembro e diminui gradativamente até março (Poços de Caldas, 2022).

De acordo com estudos de Sardinha *et al.* (2016), em séries históricas de 2003 a 2013 (10 anos de dados) janeiro é o mês com maior precipitação, máximo de 769 mm, mínima de 160 mm e uma média de 423,8 mm e agosto o mês mais seco, com máxima de 130,5 mm, mínima de 0 mm e média de 23,6 mm.

No planalto de Poços de Caldas predominam os solos classificados como Cambissolos háplicos distróficos (CXd) e Neossolos, com porções representativas de Argissolos Amarelo distróficos (PVAd), Latossolos Vermelhos distróficos (LVd) e Latossolos (Vical, 2018). Originalmente a caldeira vulcânica era coberta por formações florestais bem preservadas, com os cursos de águas acompanhados de florestas aluviais. Locais onde prevalece o solo aluminoso, com predomínio de lateritas, nos vales havia a presença da floresta semi-decidual, atualmente verifica-se alguns remanescentes de floresta semi decidual na parte sul da Serra São Domingos, que contribui diretamente com a recarga dos aquíferos. A cobertura vegetal nativa é composta de campos de altitude com vegetação arbórea e arbustiva, que são encontradas nas cabeceiras de drenagem, assim como matas de galeria ao longo dos cursos de águas.

### 3.1.2 Aspectos históricos das fontes termais

Mesmo antes da fundação inicial de Caldas e de Poços de Caldas, suas águas termais já eram utilizadas pelos índios Tapuias, que habitavam a região. Posteriormente, em busca por ouro e pedras preciosas, alguns desbravadores portugueses foram atraídos pelas águas de que era possível matar a sede dos cavalos e do gado que os acompanhavam (Reis, 2016).

Relatado também na literatura por Olavo Bilac: alguns caçadores portugueses vieram achar no meio do sertão as nascentes fumegantes — e alguns deles, um dia, pasmaram, vendo que um dos bebedouros dos animais do sertão era uma toalha d'água fervente (Pontes, 2004).

Segundo Pontes (2004), esses caçadores portugueses batizaram a região com nome de Caldas, em alusão a Caldas da Rainha (em Portugal), cidade com recursos hidrotermais de poderes curativos, utilizada para tratamentos, e muito frequentada pela família real. As fontes termais, as águas mineralizadas e a terra fértil, foram atrativas para que pessoas e famílias se estabelecessem no local.

### 3.1.3 Poços de Caldas

Em 1862 são registrados os primeiros estudos relativos às águas termais de Poços de Caldas, nos quais foram identificados dois conjuntos hidrológicos: a denominada fonte Pedro Botelho-Mariquinha-Chiquinha e a fonte dos Macacos. Esse estudo contemplou o planejamento e orçamento para a construção de um balneário e também as primeiras análises físico-químicas que caracterizou as águas como termais, com temperaturas médias de 45°C, classificando-as como sulfurosas e apropriadas para balnearioterapia (Poços de Caldas, 2022).

Segundo Reis (2016), depois de receber Dom Pedro II, Poços foi desmembrada do distrito de Caldas, em 1872, e tornou-se o município Poços de Caldas, inicialmente chamada de Nossa Senhora da Saúde de Poços de Caldas. A cidade foi planejada por um projeto urbanístico no entorno das fontes, que contemplava a divisão de quadras e lotes, a igreja matriz, o edifício da câmara, escola pública e chafarizes (Reis, 2016).

Em 1928 foi inaugurado um complexo envolvendo o hotel balneário Palace Hotel, Palace Cassino e o Parque Affonso Junqueira, e no ano de 1931 a Thermas Antônio Carlos, que passou a receber turistas para lazer e tratamentos de saúde, surgindo nessa época à primeira cidade balneária do Brasil (Poços de Caldas, 2022). Em pouco tempo as propriedades medicinais das fontes de águas quentes foram ganhando notoriedade, então a região passou a

receber profissionais da saúde renomados, interessados pelas propriedades curativas da água (Reis, 2016).

Em Poços de Caldas as fontes termais estão distribuídas no Fontanário Pedro Botelho, que abastece o Palace Hotel, Termas Antônio Carlos e o fontanário Pedro Botelho; e Fontanário dos Macacos, que abastece o Balneário Mário Mourão e o Fontanário dos Macacos. Além destes, também merecem destaque os fontanários de águas minerais: Biagio Varalo de Cima, Boca do Leão, Cambará, Filtro, Inocência Malaquias (Monjolinho), Fontanário Iolanda, Ipê, José Afonso Junqueira, José de Jacó, José Francisco da Silva, Martinico Prado, Mercado, Parque Vila Nova, Santa Rosália, Santa Terezinha, Sebastião Trindade e Teresina Rocchi.

As fontes Pedro Botelho e dos Macacos, embora sejam águas de circulação a grande profundidade, possuem uma captação de forma superficial. As fontes que abastecem a Termas Antônio Carlos, na cidade de Poços de Caldas (Grupo Pedro Botelho), são águas que emergiam através de um conglomerado 5 metros abaixo do nível da rua e em três pontos onde minava a água, que foram chamados de Pedro Botelho, Mariquinha e Chiquinha. Já a fonte dos Macacos, precisou de uma escavação de 2,40 metros até o conglomerado e uma única surgência (Poços de Caldas, 2022).

Os registros históricos da primeira captação das águas termais, tanto do grupo Pedro Botelho como fonte dos Macacos, datam de 1882 e foram executadas pelo mestre pedreiro Antônio Alves da Silva, que encontrou as águas do grupo Pedro Botelho (situada à margem esquerda do Ribeirão de Caldas) com vazão de 15 m<sup>3</sup>/h (Tabela 1). A 600 metros acima das fontes do Grupo Pedro Botelho nasce a fonte dos Macacos, que ao emergir permite a captação em três níveis diferentes, no superior com vazão de 5 m<sup>3</sup>/h, no médio a 4,60 metros, aproximadamente 7,5m<sup>3</sup>/h e no nível inferior 8,33 m<sup>3</sup>/h (Biblioteca das Termas Antônio Carlos, 2024).

Próximo à prefeitura da cidade de Poços de Caldas existem três bicas de águas com propriedades medicinais: Amélia, José de Jacó e Sinhazinha. A água da fonte Sinhazinha Radioativa Sulfurosa possui composição química semelhante à das fontes termais, com a temperatura e vazão mais baixa. Estudos realizados por geólogos da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC) apontam que a água é também de circulação profunda, mas sofre um resfriamento devido à percolação mais lenta nas zonas superficiais (Poços de Caldas, 2022).

Tabela 1- Classificação das Águas

	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura (°C)	Classificação quanto a temperatura	Classificação quanto a salinidade	Radioatividade (Mache)
Grupo Pedro Botelho	15	44	Hipertermal	Águas sulfurosas-bicarbonatadas	1.5
Água dos Macacos	20	41	Termal	Águas sulfurosas-bicarbonatadas	2.2

Fonte: Biblioteca das Thermas Antônio Carlos (2024).

De acordo com documentos do acervo histórico da biblioteca da Thermas Antônio Carlos (2024), inicialmente a fonte era situada na Rua Pernambuco, com sua nascente sob o pátio do Grande Hotel, onde foi feito um furo de sonda na profundidade de 134,27 metros chegando a obter uma vazão de 65.000 litros de água por dia, ou seja, 2,7 m<sup>3</sup>/h. Com alguns serviços de terraplanagem e nivelamento na Rua Pernambuco, a prefeitura fez uma nova captação abaixo da calçada da Rua Minas Gerais, 15 metros acima da rocha, sendo esta fonte então afetada por águas do lençol freático, com uma vazão de 800 litros por dia, ou seja, 0,03 m<sup>3</sup>/h (Biblioteca das Thermas Antônio Carlos, 2024).

### 3.1.4 Pocinhos do Rio Verde

Do mesmo modo, Pocinhos do Rio Verde recebeu seu nome por causa dos pequenos poços de águas que surgiram na localidade às Margens do Rio Verde. Em 1870, a pedido do governo brasileiro, o médico Dr. Ragnell realizou as primeiras análises químicas e descobriu que as águas que surgiam às margens do Rio Verde continham ácidos: clorídrico, carbônico, silícico e provavelmente sulfúrico, assim como bases, sódio e provavelmente potássio (Caldas, 2024).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024), a cidade possui o mais antigo hospital termal em funcionamento no mundo. A cidade também contempla um hotel balneário, fundado há mais de 130 anos, recebendo hóspedes que ali se abrigavam para tratar de diversos males. As águas curativas estão localizadas no atual Balneário Dr. Reynaldo de Oliveira Pimenta, construído em 1940 no distrito de Pocinhos do Rio Verde em Caldas. As fontes possuem 3 bicas, Rio Verde, São José, Samaritana e outra que foi descoberta recentemente por um funcionário do balneário que será tratada nessa pesquisa como Poço sem nome. De acordo com o funcionário esse poço teria uma profundidade de 50 metros.

As fontes do Balneário Dr. Reynaldo de Oliveira Pimenta, em matéria publicada no jornal O Globo em (1874), o Dr. Regnell citou que as águas localizadas à margem direita do

Rio Verde, a  $\frac{3}{4}$  de légua da cidade de Caldas, eram compostas por dois olhos d'água sulfúrea aproveitáveis na maior parte do ano e mais outro olho d'água ao lado oposto do rio, aproveitável apenas na vazante do mesmo rio.

Os três olhos de águas nascem das fendas de um só rochedo que atravessa o rio, em pequena quantidade, com temperatura de 25°C nos dois olhos de água e 21°C no outro, sendo a temperatura da água do rio 13°C e a da atmosfera 15°C. As águas foram classificadas como sulfúreas e também alcalinas pela presença de carbonato de sódio (O Globo, 1874).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia foi realizada por meio de um trabalho de gabinete e de campo para o levantamento de poços tubulares profundos e águas termais na cidade de Poços de Caldas e nas cidades circunvizinhas, que fazem parte da caldeira vulcânica: Poços de Caldas e Caldas (Pocinhos do Rio Verde).

### 4.1 LEVANTAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES DE ÁGUAS

Foram levantados 14 pontos para a coleta de amostras (Tabela 2): 4 pontos de águas termais (Pedro Botelho, Chiquinha, Mariquinha e Macacos), 7 pontos de águas com características químicas peculiares, sendo consideradas sulfurosas e radioativas (Poço sem nome, São José, Samaritana, Rio Verde, Amélia, José de Jacó e Sinhazinha), 2 pontos de água mineral com captação superficial (Amélia e Monjolinho) e 1 ponto de água mineral subterrânea (Caldense, poço com 276 metros de profundidade). Os primeiros 5 pontos foram coletados em Pocinhos do Rio Verde e os demais coletados em Poços de Caldas, a coleta das amostras foi realizada em 20 de janeiro de 2023.

Tabela 2- Localização, nome do ponto e pontos de amostragem

Localização	Nome	Ponto
<b>Caldas (Pocinhos do Rio Verde)</b>	Poço sem nome	P1
	São José	P2
	Samaritana	P3
	Rio Verde	P4
	Amorosa	P5
	Caldense	P6
	Pedro Botelho	P7
<b>Poços de Caldas</b>	Chiquinha	P8
	Mariquinha	P9
	Amélia	P10
	José de Jacó	P11
	Sinhazinha	P12
	Macacos	P13
	Monjolinho	P14

Fonte: Autora (2024).

Em todos os pontos de amostragem foram retirados dados relativos às coordenadas e altitude. Para isso, foi utilizado GPS (Global Positioning System) modelo Garmin GPSMAP 62S (precisão de  $\pm 3$  metros) e, Central Meteorológica Brunton – ADC Summit, pressão atmosférica (resolução 0,1 hPa  $\pm 1,5$  mb) e altímetro (resolução 1,0 metro  $\pm 3,0$  metros).

## 4.2 MÉTODOS ANALÍTICOS

As águas foram monitoradas *in situ* utilizando equipamento com eletrodos de leitura direta no próprio local de amostragem, medidor portátil U-50 Multiparameter Water Quality Checkers da Horiba (Horiba, 2009) previamente calibrado para temperatura a (0°C); pH 4,00 (4,01 ± 0,01 a 25 ± 0,2°C) e 7,00 (7,01 ± 0,01 a 25 ± 0,2°C); condutividade elétrica com solução padrão de KCl (1,0 mmol/L) de condutividade elétrica conhecida, 147 µS/cm a 25°C; oxigênio dissolvido com solução de sulfito de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) < 0,1 mg/L de O<sub>2</sub>; turbidez com água deionizada (0 NTU) e solução de turbidez padrão (100 NTU); sólidos totais dissolvidos com água deionizada (0,0 µS/cm) e solução de NaCl (100,0 µS/cm) e potencial redox (solução Zobell de 223 a 233 mV).

Com isso, foram analisadas as seguintes variáveis: temperatura (sensor de platina de -10°C a 55°C ± 0,3°C); pH (método de eletrodo de vidro, de 0,0 a 14,0 ± 0,1 pH); condutividade elétrica (método do eletrodo 4AC, de 0,0 a 100,0 µS/cm ± 0,1 %); oxigênio dissolvido (OD) (método polarográfico, de 0,0 a 50,0 mg/L ± 0,2 mg/L); turbidez (fonte de luz LED, de 0,0 a 800,0 NTU ± 1,0 NTU), sólidos totais dissolvidos (STD) (método de conversão de condutividade 0 g/L to 100 g/L ± 5 g/L) e potencial redox (eletrodo de platina, de -2000 a 2000 mV ± 15 mV) (Horiba, 2009).

As amostras foram coletadas e armazenadas em frascos de polietileno opaco branco, previamente lavados com água deionizada, ácido clorídrico (1:1) e novamente com água deionizada por três lavagens, sendo deixados em temperatura ambiente com a boca para baixo sobre papel filtro absorvente. No momento da amostragem, os frascos foram ambientados com água do próprio local (fonte), sendo posteriormente acondicionados em caixa térmica contendo gelo. Posteriormente, as amostras foram transportadas para o Laboratório de Ecossistemas Aquáticos e Solos (LEAS) da UNIFAL-MG, campus Poços de Caldas para análise, conforme ABNT/NBR 9898 (1987).

Os teores de Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> foram determinados por Fotômetro de Chama MOD. 910 MS (padrão de Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> de 20 e 100 ppm) resolução de 1,0 ppm ± 0,1 ppm (Analyser, 2010). Os teores de cálcio e magnésio (método colorimétrico calmagita 0,0 a 4,00 mg/L, Ca<sup>2+</sup> ± 0,09 mg/L e Mg<sup>2+</sup> ± 0,08 mg/L com CaCO<sub>3</sub>), fosfato PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (método do ácido ascórbico, de 0,02 a 2,5 ± 0,01 mg/L), sulfato SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (método sulfaver 4, de 0 a 70 mg/L ± 0,9 mg/L), nitrato NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (método de redução de cádmio, de 0 a 30,0 ± 0,3 mg/L); sílica (método silicomolibdato, de 1,0 a 75,0 ± 1,0 mg/L); alumínio total (método do aluminon, de 0,013 a 0,80 ± 0,013 mg/L); cobre total

(método do bicinconinato, de 0,02 a  $5,00 \pm 0,02$  mg/L) e ferro total (método da orto-fenantrolina, de 0,03 a  $3,00 \pm 0,017$  mg/L) foram quantificados por espectrofotômetro modelo DR 890 da Hach Company (Hach, 2013a). As amostras com teores acima do padrão de leitura foram diluídas com água deionizada e calculadas conforme Hach (2013a).

A alcalinidade ( $\text{HCO}_3^-$ ) foi determinada pelo método titulométrico, titulação digital com ácido sulfúrico 0,02 N para a faixa de concentração entre 1,0 e  $500 \pm 1,7$  % (Hach 2013b). Para cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) foi utilizado o método argentométrico ou método de Mohr com titulação em solução padrão de nitrato de prata 0,0141M para a faixa de concentração entre 0,0 e  $100 \pm 1,7$  % (APHA, 2017).

A partir dos resultados de alcalinidade ( $\text{HCO}_3^-$ ) e do potencial hidrogeniônico (pH) foi possível realizar a determinação das concentrações de carbono inorgânico na forma de íons de carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) seguindo a equação (1) de Mortatti *et al.* (2006).

$$[\text{CO}_3^{2-}] = \frac{K_2[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}^+]} \quad (1)$$

Onde:  $K_2$  é uma constante de equilíbrio =  $4,69 \times 10^{-11}$ .

A correlação entre parâmetros das amostras foi realizada por meio do Coeficiente de Correlação em software de planilha de cálculo. O coeficiente é uma medida do grau de correlação linear entre duas variáveis quantitativas que varia de -1 e 1. Os valores de pH e Eh foram utilizados para a identificação do ambiente de deposição através do diagrama Eh-pH de Krauskopf (1972).

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA

Para a avaliação da qualidade das análises químicas, foi realizado o cálculo do balanço iônico, ou erro analítico. Fizeram parte do cálculo do balanço iônico os cátions: sódio, potássio, magnésio e cálcio; e os ânions: cloreto, sulfato, bicarbonato, nitrato, fosfato e carbonato.

A concentração total dos cátions deve ser próxima à concentração dos ânions, o resultado é expresso em porcentagem e o valor da desigualdade representa o erro da análise. Para calcular o balanço iônico, inicialmente é necessário transformar as unidades das concentrações de mg/L para meq/L, através da equação (2).

$$\frac{meq}{L} = \frac{C}{\frac{A}{n}} \quad (2)$$

Onde: C = Concentração do elemento em mg/L;

A = Massa atômica do elemento;

n = número de oxidação.

O erro analítico, determinado pelo coeficiente de erro das análises, é calculado pela equação (3).

$$e (\%) = \left| \frac{\Sigma \text{ cátions} - \Sigma \text{ ânions}}{\Sigma \text{ cátions} + \Sigma \text{ ânions}} \right| \times 100 \quad (3)$$

Custodio e Llamas (1983) estabelecem limites de erros aceitáveis em função da condutividade (Tabela 3).

Tabela 3- Erro admissível no balanço iônico

<b>Condutividade (µS/cm)</b>	<b>Erro admissível (%)</b>
50	30
200	10
500	8
2000	4
>2000	4

Fonte: Custodio e Llamas (1983).

O Diagrama de Piper é uma ferramenta importante para a classificação e comparação dos grupos de águas quanto à presença de cátions e ânions dominantes, fornecendo a classificação hidroquímica de determinada amostra. O diagrama também pode ilustrar o caráter químico das águas termais e das águas subterrâneas contribuindo para identificar o grau de correspondência entre as áreas de origem, ou seja, segundo Olivier, Venter e Jonker (2011), na ajuda para observar se elas podem compartilhar de uma área de origem comum. O software utilizado foi o Qualigraf (Mobus, 2014).

Para o cálculo das porcentagens de cátions e ânions (expressas em mEq/L) utilizou-se as equações 4 e 5. Quando um cátion ou ânion supera 50% do conteúdo iônico total, a água subterrânea é classificada pela espécie predominante, e quando isto não ocorre, classifica-se a água pelos dois elementos mais abundantes.

$$X(\%) = \frac{C}{([Na^+] + [K^+]) + [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]} \times 100 \quad (4)$$

$$X(\%) = \frac{A}{[HCO_3^-] + [Cl^-] + [SO_4^{2-}]} \times 100 \quad (5)$$

Onde: C = concentração de  $Na^+ + K^+$ ,  $Ca^{2+}$  ou  $Mg^{2+}$ ;

A = concentração de  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$  ou  $SO_4^{2-}$ ;

X = distribuição percentual de cada espécie iônica C (cátion) ou A (ânion).

Segundo Schoeller (1962 *apud* Manassés, 2009), o índice de troca de íons ou troca de bases é a relação entre os íons trocados e os íons da mesma natureza que existiam primitivamente. A razão iônica, ou índice hidrogeoquímico, possuem seus valores em meq/L e são indicados pelo sinal r. As razões iônicas r entre os íons dissolvidos na água subterrânea podem indicar a relação entre as características daquela água com o terreno no qual ela está inserida, indicar a ação de fenômenos modificadores ou uma característica específica daquela água (Custodio; Llamas, 1983).

Relações iônicas ( $rMg^{2+} \div rCa^{2+}$ ), ( $rCa^{2+} \div rMg^{2+}$ ), ( $rK^+ \div rNa^+$ ), ( $rNa^+ \div rCl^-$ ) e ( $rCl^- \div rHCO_3^-$ ) foram calculadas a partir das principais razões iônicas contidas em (Hem, 1985). A interpretação dos resultados das razões iônicas e do tipo iônico (Tabela 4) também foi feita com base em Hounslow (1995), que apresentam valores indicativos para a interpretação da rocha fonte e os possíveis processos hidroquímicos atuantes: [ $Na^+ \div (Na^+ + Cl^-)$ ]; [ $Mg^{2+} \div (Mg^{2+} + Ca^{2+})$ ]; [ $SiO_2 \div (Na^+ + K^+ - Cl^-)$ ]; [ $(Na^+ + K^+ - Cl^-) \div (Na^+ + K^+ - Cl^- + Ca^{2+})$ ]; e ( $Cl^- \div \sum \text{ânions}$ ).

Tabela 4- Principais razões iônicas e relações iônicas (Hounslow, 1995). Valores teóricos e significados com a relação genética (Hem, 1985)

Razão iônica	Variações teóricas	Significado
$rMg^{2+} \div rCa^{2+}$	0,25 - 0,33	-Água de circulação em rocha de composição granítica
	0,33 - 1,50	-Águas continentais
	> 0,9	-Contato com água do mar ou fluxo através de rocha básica; possível influência de terrenos dolomíticos
$rCa^{2+} \div rMg^{2+}$	> 1,0	-Relação com os litotipos ricos em silicatos magnesianos
	$\pm 5,0$	-Água do mar
	> 1,0	-Indicação de intrusão marinha
$rK^+ \div rNa^+$	0,02 - 0,025	-Água do mar
	0,09 - 0,60	-Água de circulação em rochas com composição granítica
	0,004 - 0,280	- "Água doce"
$rNa^+ \div rCl^-$	< 0,0876	-Substituição do $Na^+$ por $Ca^{2+}$ e $Mg^{2+}$
	< 0,7	-Precipitação de sais de $Na^+$
	> 0,7	-Fluxo através de rochas cristalinas ou vulcânicas
$rCl^- \div rHCO_3^-$	0,5	-Fluxo normal por rochas cristalinas
	0,1 - 0,5	-Águas continentais
	20 - 50	-Água do mar
$[Na^+ \div (Na^+ + Cl^-)]$	> 0,5	- Fonte de sódio outra que não halita, como a albita ou a troca iônica
	= 0	- Dissolução de halita
	< 0,5 e STD > 500	- Enriquecimento em sais, água do mar
	< 0,5 e STD 50-500	- Erro de análise
	< 0,5 e STD < 50	- Água da chuva
	= 0,5 e $HCO_3^-/SiO_2 > 10$	- Intemperismo de dolomita
	< 0,5 e $HCO_3^-/SiO_2 > 10$	- Intemperismo de dolomita e calcário
	> 0,5 e $HCO_3^-/SiO_2 > 10$	- Dissolução de dolomita, precipitação de calcita ou água do mar
	> 0,5 $HCO_3^-/SiO_2 < 5$	- Minerais ferromagnesianos
	< 0,5 $HCO_3^-/SiO_2 < 5$	- Intemperismo de granito
$[SiO_2 \div (Na^+ + K^+ - Cl^-)]$	< 1	- Troca catiônica
	1-2	- Intemperismo de albita
	> 2	- Minerais ferromagnesianos
$[(Na^+ + K^+ - Cl^-) \div (Na^+ + K^+ - Cl^- + Ca^{2+})]$	0,2-0,8	- Intemperismo de plagioclásio possível
	< 0,2 ou > 0,8	- Intemperismo de plagioclásio não provável
	> 0,8 e STD > 500	- Água do mar, salmoura ou
$(Cl^- \div \sum \text{ânions})$	> 0,8 e STD < 100	- Água da chuva
	< 0,8	- Intemperismo de rocha

Fonte: Hem (1985); Hounslow (1995).

Em águas subterrâneas os valores do índice de troca de bases (itb) pode ter valores positivos ou negativos, geralmente próximo de 0. Se há amolecimento (troca de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  por  $Na^+$  e  $K^+$ ), seu valor tende a diminuir, enquanto se houver endurecimento, tende a aumentar. Em águas em que os íons de  $Cl^-$  e  $Na^+$  são dominantes pode haver um notável amolecimento, então o valor do itb é pouco afetado, devido à presença de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  estarem em quantidade muito menor que de  $Na^+$ . Neste caso é recomendado usar como itb:

$$itb = \frac{rCl - r(Na + K)}{r(SO_4 + HCO_3 + NO_3)} \quad (6)$$

#### 4.4 CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS

Para classificar as águas de acordo com a sua temperatura foi adotado a convenção de Custódio e Llamas (1983) na Tabela 5.

Tabela 5- Referência para a Classificação de acordo com a temperatura

Classificação	T (°C)
Hipotermal	< 25°C
Mesotermal	entre 25°C e 35°C
Termal	entre 35°C e 45°C
Hipertermal	> 45°C

Fonte: Custodio; Llamas (1983, p. 1064).

As águas também podem ser classificadas de acordo com os ânions e cátions principais. Custodio e Llamas (1983) e Schoeller (1962 *apud* Manassés, 2009), propuseram as seguintes classificações das águas de acordo com seus íons principais. Essa classificação apresenta uma relação de íons principais que são identificadas com um número que representa a ordem de ânions e uma letra que representa a ordem de cátions principais (Tabelas 6, 7, 8, 9).

Tabela 6- Referência para a classificação por íons principais em meq/L

Ânions			Cátions				
<b>1</b>	rCl <sup>-</sup>	> rSO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	> rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>a</b>	rNa <sup>+</sup>	> rMg <sup>2+</sup>	> rCa <sup>2+</sup>
<b>2</b>	rCl <sup>-</sup>	> rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	> rSO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<b>b</b>	rNa <sup>+</sup>	> rCa <sup>2+</sup>	> rMg <sup>2+</sup>
<b>3</b>	rSO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	> rCl <sup>-</sup>	> rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>c</b>	rMg <sup>2+</sup>	> rNa <sup>+</sup>	> rCa <sup>2+</sup>
<b>4</b>	rSO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	> rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	> rCl <sup>-</sup>	<b>d</b>	rMg <sup>2+</sup>	> rCa <sup>2+</sup>	> rNa <sup>+</sup>
<b>5</b>	rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	> rCl <sup>-</sup>	> rSO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<b>e</b>	rCa <sup>2+</sup>	> rNa <sup>+</sup>	> rMg <sup>2+</sup>
<b>6</b>	rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	> rSO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	> rCl <sup>-</sup>	<b>f</b>	rCa <sup>2+</sup>	> rMg <sup>2+</sup>	> rNa <sup>+</sup>

Fonte: Custodio; Llamas (1983, p. 1060).

Também foi adotada para a classificação das águas a tabela de referência para o ânion cloreto (Tabela 7), sulfato (Tabela 8), bicarbonato (Tabela 9) e a tabela de referência para a classificação das águas segundo Schoeller (1962 *apud* Manassés, 2009), (Tabela 10).

Tabela 7- Referência para o ânion cloreto

Grupo de cloretado	Denominação	Valor rCl (meq.L <sup>-1</sup> )	Observação
<b>1</b>	Hiperclorinado	>700	
<b>2</b>	Cloretado	700 a 420	
<b>3</b>	Cloretado forte	420 a 140	Água do mar até a saturação de 560 meq.L <sup>-1</sup>
<b>4</b>	Cloretado médio	140 a 40	
<b>5</b>	Oligocloretado	40 a 15	
<b>6</b>	Cloretado normal	<10	

Fonte: Custodio; Llamas (1983, p. 1062).

Tabela 8- Referência para o ânion sulfato

Grupo de sulfatos	Denominação	Valor rSO <sub>4</sub> (meq.L <sup>-1</sup> )	Observação
1	Hipersulfatado	>58	
2	Sulfatado	58 a 24	Água do mar até 58meq.L <sup>-1</sup>
3	Oligosulfatado	24 a 6	
4	Sulfatado normal	<6	

Fonte: Custodio; Llamas (1983, p. 1062).

Tabela 9- Referência para o ânion bicarbonato

Grupo de bicarbonatos	Denominação	Valor rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq.L <sup>-1</sup> )
1	Hiperbicarbonatado	>7
2	Bicarbonatado normal	7 a 2
3	Hipobicarbonatado	<2

Fonte: Custodio; Llamas (1983, p. 1062).

Tabela 10- Referência para a classificação segundo Schoeller

Tipo	Caráter	Subtipo	Caráter	Parcial	Caráter
1	rCl <sup>-</sup> > rNa <sup>+</sup>	A	rCa <sup>2+</sup> > rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$\alpha$	rCa <sup>2+</sup> > rSO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	Itb (+)	-	-	$\alpha\beta$	rCa <sup>2+</sup> = rSO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	-	ab	rCa <sup>2+</sup> = rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$\beta$	rCa <sup>2+</sup> < rSO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	-	B	rCa <sup>2+</sup> < rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	-
2	rCl <sup>-</sup> = rNa <sup>+</sup>	A	rCa <sup>2+</sup> > rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	-
	Itb = 0	Ab	rCa <sup>2+</sup> = rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	-
	-	B	rCa <sup>2+</sup> < rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	-
3	rCl <sup>-</sup> < rNa <sup>+</sup>	A	rCa <sup>2+</sup> > rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	-
	Itb (-)	Ab	rCa <sup>2+</sup> = rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	-
	-	B	rCa <sup>2+</sup> < rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$\alpha$	rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> > rMg <sup>2+</sup> + rCa <sup>2+</sup>
	-	-	-	$\alpha\beta$	rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> = rMg <sup>2+</sup> + rCa <sup>2+</sup>
-	-	-	$\beta$	rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> < rMg <sup>2+</sup> + rCa <sup>2+</sup>	

Fonte: Custodio; Llamas (1983, p. 1062).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 LOCALIZAÇÃO

Os dados de referência geográfica (latitude e longitude) retirados nos locais de coleta estão apresentados na Tabela 11. Fazem parte das fontes do Balneário Dr. Reynaldo de Oliveira Pimenta, as fontes São José, Samaritana, Rio Verde e Poço sem nome (Figuras 3 a, b, c e d). Na entrada da cidade há uma fonte de água mineral superficial, a Fonte Amorosa (Figura 3 e), situada na entrada do Grande Hotel Pocinhos. Qualquer pessoa tem acesso para beber e levar a água para casa, essa fonte não faz parte das fontes do Balneário e não é usada para tratamentos terapêuticos (Caldas, 2024).

Tabela 11- Dados de latitude, longitude e altitude dos pontos estudados

<b>Ponto</b>	<b>Longitude</b>	<b>Latitude</b>	<b>Erro ± (m)</b>	<b>Altitude (m)</b>
<b>P1</b>	353280	7573879	3	1004
<b>P2</b>	353151	7573785	8	1044
<b>P3</b>	353190	7573809	8	1048
<b>P4</b>	353172	7573868	8	1050
<b>P5</b>	353364	7574435	4	1061
<b>P6</b>	338455	590277	3	1218
<b>P7</b>	337775	7589880	3	1205
<b>P8</b>	337775	7589880	3	1205
<b>P9</b>	337775	7589880	3	1205
<b>P10</b>	338020	7590109	6	1206
<b>P11</b>	338020	7590109	6	1206
<b>P12</b>	338020	7590109	6	1206
<b>P13</b>	338245	7589596	3	1172
<b>P14</b>	339105	7589193	3	1244

Fonte: Autora (2024).

A Figura 3 (f) é o Fontanário Inocência Malaquias, também chamado de Monjolinho, em Poços de Caldas, é uma água mineral, possui 3 bicas no subsolo em uma estrutura de alvenaria e 2 bicas na calçada do local. A Figura 3 (g) são as fontes Amélia, José de Jacó e Sinhazinha, em frente à prefeitura de Poços de Caldas.

A casa de bombas das águas termais do fontanário Pedro Botelho está localizada no subsolo a 5 metros abaixo do nível da rua (Figuras 4 a, b e c), de onde foram retiradas as amostras deste estudo. O local possui um fontanário para acesso da população em frente a Thermas Antônio Carlos (Figura 4 d). A fonte dos Macacos, que está localizada na praça dos Macacos junto ao Balneário Dr. Mário Mourão, conta com 3 bicas para acesso da população.

Figura 3- Fontes não termais



Fonte: Autora (2024).

Legenda: (a) São José; (b) Samaritana; (c) Rio Verde; (d) Poço sem nome; (e) Amorosa; (f) Monjolinho; (g) Fontanários Amélia José de Jacó e Sinhazinha.

Observa-se na Figura 5 a distribuição espacial dos pontos junto da litologia local e grupo de falhas. Os pontos amostrados em Pocinhos do Rio Verde estão todos situados sobre o Sienito Pedra Branca, sendo que P1 e P2 sobre uma falha do embasamento soerguido. Já os pontos amostrados em Poços de Caldas estão todos localizados no cruzamento de 3 falhas geológicas principais, como já observado por Cruz e Peixoto (1991), além disso, com exceção do P14 que está sobre nefelina sienito e foiaito os demais pontos encontram-se sobre tinguaiços.

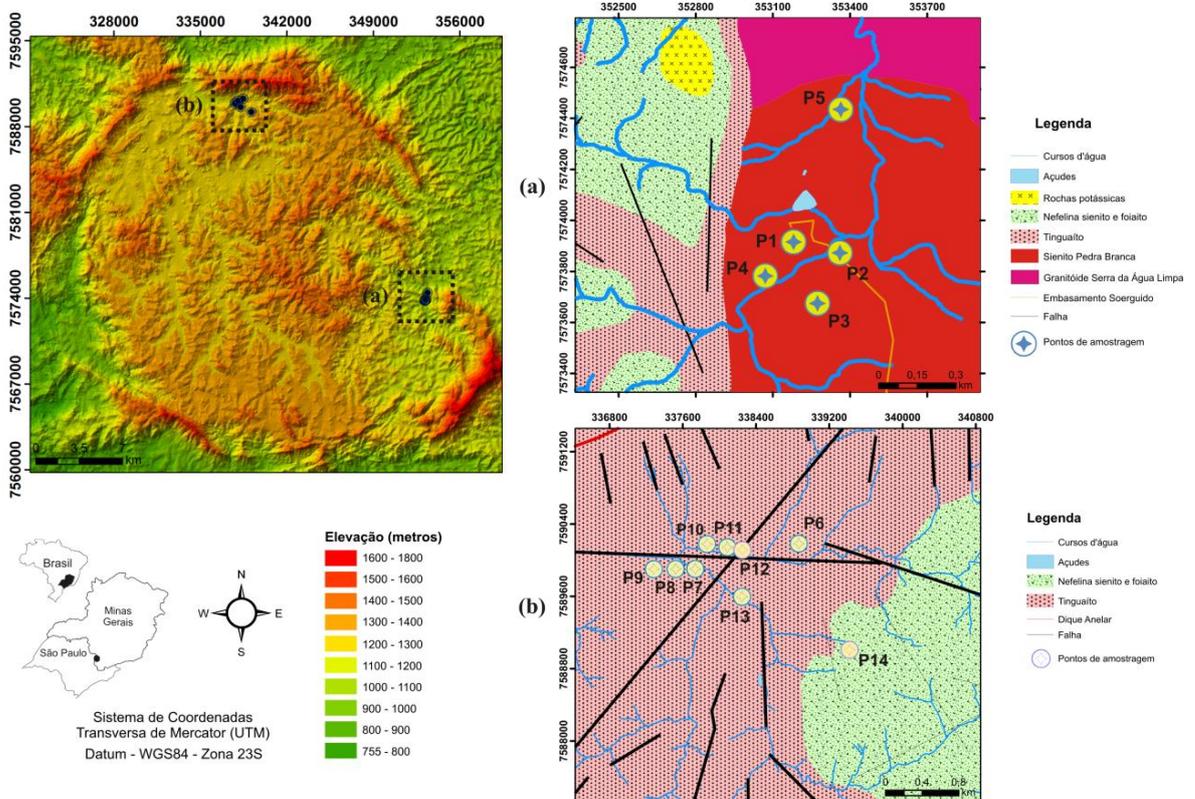
Figura 4- Fontes termais



Fonte: Autora (2024).

Legenda: (a) Pedro Botelho; (b) Chiquinha; (c) Mariquinha; (d) Fontanário Pedro Botelho; (e) Fontanário dos macacos.

Figura 5- Distribuição espacial dos pontos amostrados



Fonte: Autor (2024).

Legenda: (a) Pontos localizados em Pocinhos do Rio Verde; (b) Pontos localizados em Poços de Caldas.

## 5.2 PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS

Os resultados dos parâmetros físicos e químicos das águas termais e não termais estão apresentados na Tabela 12. De acordo com Custodio e Llamas (1983), águas termais são águas que possuem temperatura entre 35°C e 45°C. Dessa forma para melhor interpretação dos resultados, os dados foram agrupados em águas termais (pontos com temperatura acima de 35°C) e não termais (abaixo de 35°C), conforme Tabela 12.

Tabela 12- Resultados dos parâmetros físicos e químicos

Tipo	Fontes		T	pH	ORP	Cond.	Turb.	OD	STD
			(°C)	-	(mV)	(µS/cm)	(NTU)	(mg/L)	
<b>Não termais</b>	Poço s/ nome	P1	24,23	9,38	-208,00	553,00	0,00	0,60	355,00
	São José	P2	24,20	9,86	-280,00	537,00	0,00	0,86	344,00
	Samaritana	P3	25,60	9,85	-281,00	551,00	0,00	1,27	353,00
	Rio Verde	P4	25,95	9,92	-282,00	555,00	0,00	1,17	355,00
	Amorosa	P5	21,91	4,71	198,00	8,00	0,00	4,49	5,00
	Caldense	P6	26,78	7,43	140,00	148,00	0,00	2,80	96,00
	Amélia	P10	28,76	7,40	34,00	174,00	0,00	1,59	113,00
	José de Jacó	P11	25,63	4,92	228,00	7,00	0,00	4,42	5,00
	Sinhazinha	P12	26,80	9,78	-274,00	542,00	0,00	1,36	347,00
	Monjolinho	P14	26,80	5,70	126,00	70,00	0,00	4,78	46,00
<b>Termais</b>	Pedro Botelho	P7	40,48	9,99	-329,00	573,00	13,90	1,81	367,00
	Chiquinha	P8	42,51	9,98	-337,00	579,00	7,80	1,82	370,00
	Mariquinha	P9	43,40	9,99	-340,00	579,00	0,00	1,87	370,00
	Macacos	P13	37,13	9,94	-343,00	586,00	7,00	2,21	375,00

Fonte: Autora (2024).

O maior valor de pH para águas não termais foi de 9,92 em Rio Verde (P4) e o menor 4,71 em Amorosa (P5), para as fontes termais os valores de pH são altos em todos os pontos, sendo o menor 9,94 em P13 (Macacos). Tanto o grupo de águas não termais como o grupo de águas termais apresentaram valores de pH alto (acima de 7,40) o que pode indicar que a água da precipitação pluvial não influencia diretamente a fonte de recarga das águas subterrâneas estudadas, diferente das fontes mais superficiais como a Amorosa (P5) com pH = 4,71, José de Jacó (P11) com pH = 4,92 e Monjolinho (P14) com pH = 5,70.

A maioria das águas subterrâneas tem valores de pH entre 5,5 e 8,5 em casos excepcionais pode variar de 3 a 11 (Santos, 2008). De acordo com Bertolo, Hirata e Fernandes (2007), espera-se que a água subterrânea de sistemas de fluxos rasos e de menor tempo de residência no aquífero seja mais ácida e com menor quantidade de sólidos dissolvidos, como encontrado nas fontes Amorosa, José de Jacó e Monjolinho (P5, P11 e P14), ao passo que a água que possui pH mais elevado e maior quantidade de sólidos dissolvidos seja típica de sistemas de circulação mais profunda, de menor velocidade e de maior tempo de trânsito, assim

como nos demais poços amostrados neste estudo (P1, P2, P3, P4, P6, P7, P8, P9, P10, P12 e P13).

Segundo Von Sperling (1996), águas que se encontram na faixa de -200 mV estão em condições redutoras (condições anaeróbias) favorecendo o crescimento de microrganismos fermentativos, metanogênicos e redutores de sulfato (P1, P2, P3, P4, P7, P8, P9, P12 e P13). Enquanto que águas que se situam de -100 a 100 mV estão em região anóxica favorecendo a desnitrificação (P10), e maiores de 100 mV estão em condições aeróbias favorecendo a oxidação de carbono orgânico e nitrificação (P5, P6, P11 e P14). Águas não termais apresentam maiores valores de potencial de oxirredução na fonte José de Jacó (P11 = 228 mV) e menores na fonte Rio Verde (P4 = -282 mV), por outro lado, as águas das fontes termais possuem valores similares e bem mais próximos (-329 mV) na fonte Pedro Botelho (P7) e (-343 mV) na fonte dos Macacos (P13).

O maior valor da condutividade elétrica para as águas não termais foi de 555  $\mu\text{S}/\text{cm}$  em (P4) ou fonte Rio Verde e o menor valor 7,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  em (P11) ou fonte José de Jacó. Nas águas termais houve pequena diferença na variação entre os valores de condutividade (aproximadamente 13,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), como também encontrado para potencial de oxirredução. Quanto à turbidez, apenas os pontos P7 (Pedro Botelho), P8 (Chiquinha) e P13 (Macacos) foram observados pequenas variações 13,9 NTU, 7,8 NTU e 7,0 NTU, respectivamente (Tabela 11).

A concentração de saturação de oxigênio na água em contato com o ar é da ordem de 10 mg/L (Von Sperling, 1996). Em águas subterrâneas o OD está presente em concentrações muito baixas por não estar em contato direto com a atmosfera, ele é consumido no solo e sua renovação é difícil, a maior parte das águas subterrâneas tem concentrações entre 0,0 e 5,0 mg/L e geralmente abaixo de 2,0 mg/L (Custodio; Llamas, 1983). As menores e maiores concentrações de oxigênio dissolvido foram encontradas nas águas não termais em P1 (Poço sem Nome = 0,60 mg/L), P2 (São José = 0,86 mg/L), P14 (Monjolinho = 4,78 mg/L) e P5 (Amorosa = 4,49 mg/L). Estes resultados podem, muito provavelmente, estarem relacionados a profundidade e contato das fontes de água com a atmosfera.

Segundo Freeze e Cherry (1979) o teor de sólidos totais dissolvidos (STD) é o peso integral dos constituintes minerais, voláteis e não voláteis dissolvidos na água por unidade de volume, como função do pH, natureza do soluto, temperatura e pressão do ambiente. A concentração de STD na água permite classificá-las como doce (0 a 500 mg/L), salobra (500 a 1500 mg/L) e salgada (acima de 1500 mg/L). O ponto que apresentou maior concentração de STD foi o P13 (Macacos = 375 mg/L) e o menor P5 (Amorosa = 5,0 mg/L), sendo as águas estudadas consideradas como doces.

A Portaria do Gabinete do Ministro/Ministério da Saúde nº888 de 04 de maio de 2021 dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (Brasil, 2021). A portaria estabelece como padrão de qualidade da água o valor máximo permitido (VMP) de turbidez de 5 NTU e de sólidos totais dissolvidos (STD) de 500 mg/L. Quanto a turbidez, apenas os pontos P7 (Pedro Botelho), P8 (Chiquinha) e P13 (Macacos) apresentam valores pouco acima ou próximos a legislação federal. Quanto a STD todos os pontos analisados encontram-se abaixo do valor máximo.

### 5.3 PARÂMETROS QUÍMICOS

Os resultados dos parâmetros químicos das águas termais e não termais estão apresentados na Tabela 13. De acordo com Matthess (1982) e Santos (2008), a abundância do sódio em águas subterrâneas pode estar associada à baixa estabilidade dos minerais fontes (plagioclásio, anfibólio, piroxênio, nefelina, etc.), a sua solubilidade elevada e a difícil precipitação dos compostos em solução. É um componente presente nas águas subterrâneas em concentrações que variam de 1,0 a 150,0 mg/L (Feitosa *et al.*, 2008).

As análises mostraram altas concentrações de sódio nas amostras dos pontos P1, P2, P3, P4, P7, P8, P9, P12, P13 com valores acima de 150,0 mg/L. Por outro lado, amostras abaixo de 150,0 mg/L foram observados nos pontos P5, P6, P10, P11 e P14. A maior concentração de sódio encontrada foi na fonte dos Macacos (P13) (grupo das águas termais) com 323,0 mg/L já a fonte Amorosa (P5) apresentou menor concentração 0,6 mg/L (grupo de águas não termais). Em análises realizadas por Szikszay e Teissedre (1977) com águas das fontes de Águas da Prata, emergentes de rochas alcalinas e diabásio, que fazem parte da borda da caldeira vulcânica, o sódio também foi encontrado com concentrações elevadas (máximo 586 mg/L).

Segundo Celligoi (1999), potássio é comumente encontrado em rochas ígneas na forma de minerais como o ortoclásio, a muscovita ou biotita, sendo liberados através do intemperismo, possuem pouca mobilidade geoquímica em águas doces e é raramente encontrado em concentrações maiores que o sódio. De acordo com Feitosa *et al.* (2008) os teores de potássio presentes nas águas subterrâneas são mais frequentes nas concentrações de 1,0 a 5,0 mg/L, geralmente inferiores a 10 mg/L. O ponto com menor concentração de potássio foi na fonte José de Jacó (P11 = 1,2 mg/L) com maiores concentrações (12,0 mg/L) no Poço sem nome, São José e Samaritana (P1, P2 e P3).

Tabela 13- Resultados dos parâmetros químicos

Tipo	Fontes		Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>
			(mg/L)									
<b>Não termiais</b>	Poço s/ nome	P1	276,00	12,00	0,76	0,06	1,20	0,20	65,00	416,00	92,05	25,00
	São José	P2	288,00	12,00	0,53	0,03	5,30	0,32	75,00	424,00	283,35	15,00
	Samaritana	P3	306,00	12,00	0,55	0,01	4,50	0,43	76,00	412,00	269,06	25,00
	Rio Verde	P4	285,00	9,00	0,55	0,00	4,80	0,36	74,00	378,00	290,03	25,00
	Amorosa	P5	0,60	2,70	0,29	0,04	1,20	0,25	0,00	2,00	0,00	15,00
	Caldense	P6	66,00	2,00	1,59	0,19	4,70	0,19	2,00	141,68	0,35	15,00
	Amélia	P10	98,00	4,00	1,43	0,14	5,20	0,35	10,00	194,00	0,45	15,00
	José de Jacó	P11	1,90	1,20	0,36	0,03	1,10	0,25	0,00	12,00	0,00	10,00
	Sinhazinha	P12	228,00	8,00	0,64	0,02	5,90	0,40	52,00	328,00	182,32	15,00
	Monjolinho	P14	13,60	9,80	1,24	0,18	16,10	0,48	2,00	19,00	0,00	20,00
<b>Termais</b>	Pedro Botelho	P7	222,00	8,00	0,45	0,01	6,50	0,32	52,00	318,00	286,67	20,00
	Chiquinha	P8	224,00	8,00	0,50	0,03	7,90	0,41	52,00	357,00	314,50	20,00
	Mariquinha	P9	236,00	10,00	0,52	0,00	8,40	0,50	50,00	350,00	315,52	15,00
	Macacos	P13	323,00	8,00	0,46	0,02	6,80	0,84	51,00	396,00	318,16	20,00

Fonte: Autora (2024).

De acordo com Santos (2008), em rochas ígneas o cálcio geralmente é encontrado em plagioclásios, anfibólios ou piroxênios, e o magnésio está presente em locais formados por rochas carbonatadas, que tem como minerais principais a magnesita, biotita, granada, hornblenda e olivina. As amostras estudadas possuem baixa concentração de cálcio, maior concentração em (P6 = Caldense) com 1,59 mg/L e menor (P5 = Amorosa) com 0,29 mg/L, ambos do grupo de águas não termais. As águas também apresentaram baixas concentrações de magnésio sendo maior em P6 (Caldense, grupo das águas não termais) com 0,19 mg/L.

O nitrato ocorre em geral em pequenas concentrações, representando estágio final de oxidação, teores acima de 5,0 mg/L podem ser indicativo de poluição devido a ação antrópica (Santos, 2008). A amostra que apresentou maior concentração foi Monjolinho (P14 = 16,10 mg/L) e a menor José de Jacó (P11 = 1,10 mg/L), ambos do grupo das águas não termais (Tabelas 12 e 13). O fosfato é encontrado nas concentrações de 0,01 e 1,0 mg/L podendo chegar a 10,0 mg/l e excepcionalmente a 50,0. (Custodio; Llamas, 1983). A maior concentração foi observada na fonte dos Macacos (P13 = 0,84 mg/L - grupo das águas termais) e o ponto com menor concentração Caldense (P6 = 0,19 mg/L - grupo de águas não termais), conforme Tabelas 12 e 13.

A presença do sulfato em águas subterrâneas ocorre naturalmente quando a rocha possui minerais que contém enxofre, em gases magmáticos, ou por contaminações devido às ações humanas, geralmente apresentam teores inferior a 100,0 mg/L (Santos, 2008). Os pontos que apresentaram menores concentrações de sulfato são P5, P6, P10, P11 e P14, todos abaixo de 15,0 mg/L. As fontes que apresentaram altas concentrações foram os pontos P1, P2, P3, P4, P7,

P8, P9, P12 e P13, todos acima de 50,0 mg/L, sendo o ponto P3 (Samaritana) que possui maior concentração, de 76,0 mg/L.

A concentração dos íons de carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) varia em função dos valores de pH e conteúdo de gás carbônico. Na Tabela 12 é possível observar o predomínio maior na ocorrência do carbono na forma de  $\text{HCO}_3^-$  e os valores de carbonato e bicarbonato se aproximam quando o pH é alto, como observado nos pontos P7, P8 e P9. Os pontos que apresentaram menores concentrações de  $\text{HCO}_3^-$  foram as de captação superficial: P5 (Amorosa), P11 (José de Jacó) e o P14 (Monjolinho). As fontes que apresentaram maior quantidade de  $\text{HCO}_3^-$  foram as fontes de Pocinhos do Rio Verde: Poço s/ nome, São José e Samaritana (P1, P2 e P3) acima de 400 mg/L. Já os pontos que apresentam menores concentrações de  $\text{CO}_3^{2-}$  foram o P5, o P6, P10, P11 e P14 (abaixo de 0,4 mg/L) e as maiores nas fontes termais P8, P9 e P13 (Chiquinha, Mariquinha e Macacos), acima de 300 mg/L.

Segundo Celligoi (1999), cloreto é um elemento encontrado em abundância nas águas dos oceanos, mas geralmente em baixas concentrações nas águas subterrâneas com valores menores que 10 mg/L, e em locais com altas concentrações pode indicar poluição antrópica. As concentrações de cloreto encontrados nas amostras estudadas, em todos os pontos, apresentaram valores entre 10,0 na fonte José de Jacó (P11) e 25,0 mg/L nas fontes Poço s/ nome (P1), Samaritana (P3) e Rio Verde (P4).

Os resultados dos principais metais nas águas termais e não termais estão apresentados na Tabela 14. Segundo Santos (2008), embora o silício seja um dos elementos mais encontrados nas rochas, ele não ocorre com quantidades significativas em águas subterrâneas, e é geralmente encontrado sob a forma de partículas coloidais, sendo o processo de intemperismo nos minerais de argila e nos feldspatos a principal fonte da sílica em águas subterrâneas. O grupo das águas termais são os pontos que apresentaram maiores concentrações de sílica 15,10 mg/L em Pedro Botelho (P7), já a fonte com menor concentração foi José de Jacó (P11) com 3,90 mg/L do grupo de águas não termais.

O ferro, quando presente em águas subterrâneas, pode ser devido à rocha armazenadora e ocorre principalmente nos minerais de piroxênio, anfibólios, biotita, magnetitas e piritas (Celligoi, 1999). Todas as amostras analisadas apresentaram baixas concentrações, sendo os pontos P6 (Caldense) e P14 (Monjolinho) com 0,10 mg/L os que apresentaram maiores concentrações. Assim como ferro, o elemento cobre também apresenta baixas concentrações, variando de 0,06 mg/L na fonte Rio Verde (P4) a 0,00 mg/L. O cobre é um elemento que acompanha os minerais horblenda, biotita e ortoclásio identificados nas rochas alcalinas

(Szikszay; Teissedre, 1977). O alumínio apresenta concentrações entre 0,000 mg/L (fonte Macacos P13) e 0,050 mg/L (Poço s/ nome P1) (Tabela 14).

Tabela 14- Resultados de dióxido de silício, ferro, cobre e alumínio

Tipo	Fontes		SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>t</sub>	Cu <sub>t</sub>	Al <sub>t</sub>
			(mg/L)			
Não termais	Poço s/ nome	P1	10,20	0,02	0,02	0,050
	São José	P2	13,20	0,07	0,02	0,010
	Samaritana	P3	13,10	0,00	0,04	0,009
	Rio Verde	P4	14,10	0,03	0,06	0,021
	Amorosa	P5	5,40	0,00	0,01	0,021
	Caldense	P6	12,90	0,10	0,05	0,007
	Amélia	P10	14,10	0,00	0,00	0,031
	José de Jacó	P11	3,90	0,00	0,03	0,029
	Sinhazinha	P12	13,70	0,03	0,03	0,017
	Monjolinho	P14	6,70	0,10	0,00	0,009
	Pedro Botelho	P7	15,10	0,00	0,03	0,017
	Termais	Chiquinha	P8	15,00	0,00	0,00
Mariquinha		P9	14,80	0,04	0,00	0,016
Macacos		P13	14,00	0,06	0,00	0,000

Fonte: Autora (2024).

A Portaria do Gabinete do Ministro/Ministério da Saúde nº888 de 04 de maio de 2021 dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (Brasil, 2021). A portaria estabelece como padrão de qualidade da água o valor máximo permitido (VMP) para os parâmetros: alumínio, cloreto, cobre, ferro, nitrato, sódio e sulfato, estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15- Valores máximos permitidos (VMP) para padrão de potabilidade

Parâmetro	Vmp	Unidade
Alumínio	0,2	mg/L
Cloreto	250	mg/L
Cobre	2	mg/L
Ferro	0,3	mg/L
Nitrato	45	mg/L
Sódio	200	mg/L
Sulfato	250	mg/L

Fonte: Autora (2024).

As fontes estudadas encontram-se com valores abaixo do VMP estabelecido para todos os parâmetros, exceto para o sódio. Grande parte das fontes estudadas (P1, P2, P3, P4, P7, P8, P9, P12 e P13) apresentaram concentrações acima de 200,0 mg/L. Embora as águas consideradas águas minerais possam apresentar concentrações anômala de sais, a alta concentração de sódio

confere uma água não potável, não sendo indicada a sua ingestão. As águas dessas fontes são indicadas para o uso terapêutico e no tratamento de algumas doenças, como informado nas próprias fontes Figura 6.

Um estudo feito por Carvalho (2013), sobre a qualidade das águas termais sulfurosas distribuídas na cidade de Poços de Caldas, apresenta altas concentrações de bicarbonatos, sódio, sulfato, carbonato, sílica e fluoreto.

Figura 6- Indicação do uso das águas das fontes Rio Verde, Pedro Botelho e dos Macacos

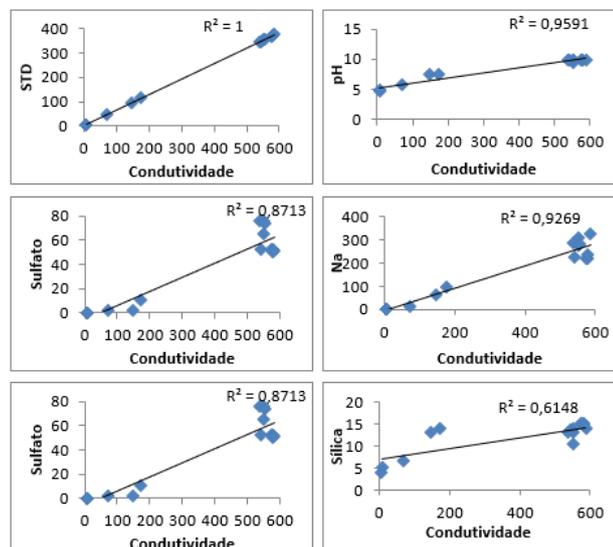


Fonte: Autora (2024).

#### 5.4 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO

O valor de  $R^2$  para correlações entre condutividade e sólidos totais dissolvidos ( $R^2 = 1,0$ ), pH ( $R^2 = 0,96$ ),  $\text{HCO}_3^-$  ( $R^2 = 0,93$ ),  $\text{Na}^+$  ( $R^2 = 0,92$ ) e  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $R^2 = 0,87$ ) apresentaram forte relação (Figura 6).

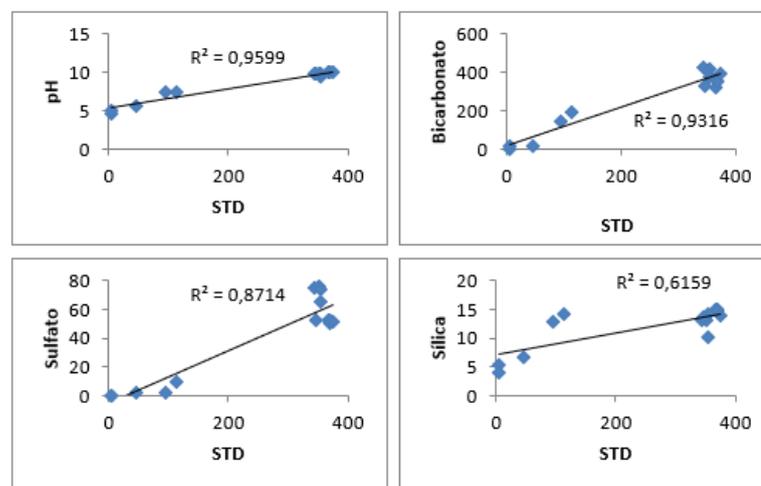
Figura 7- Correlações de condutividade nas águas termais e não termais



Fonte: Autora (2024).

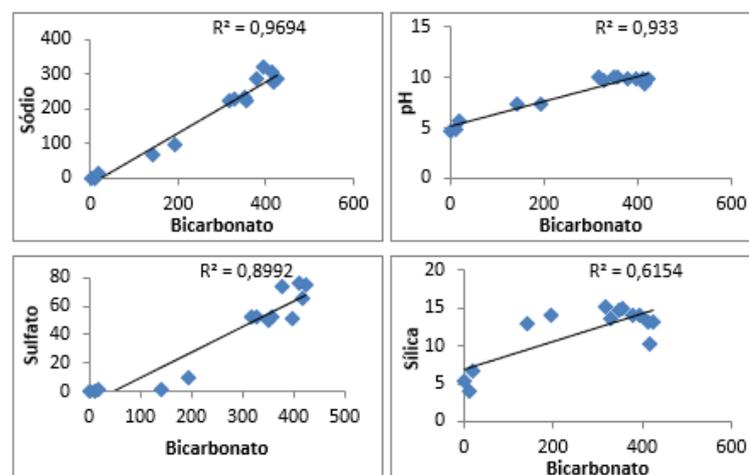
De acordo com Fetter (2001), mais de 90% dos STD em águas subterrâneas são designados aos íons de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_3^{2-}$ . Neste sentido, teor de STD nas amostras das fontes termais e não termais estudadas é dominado, em grande parte, pelos íons de  $\text{HCO}_3^-$  ( $R^2 = 0,93$ ),  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $R^2 = 0,87$ ) e  $\text{SiO}_2$  ( $R^2 = 0,61$ ). Conseqüentemente, estes elementos químicos também podem influenciar a condutividade das águas (Figura 6), os valores de pH ( $R^2 = 0,96$ ) e as concentrações de  $\text{HCO}_3^-$  nas águas subterrâneas conforme Figuras 7 e 8.

Figura 8- Correlações de sólidos totais dissolvidos nas águas termais e não termais



Fonte: Autora (2024).

Figura 9- Correlações de bicarbonato nas águas termais e não termais

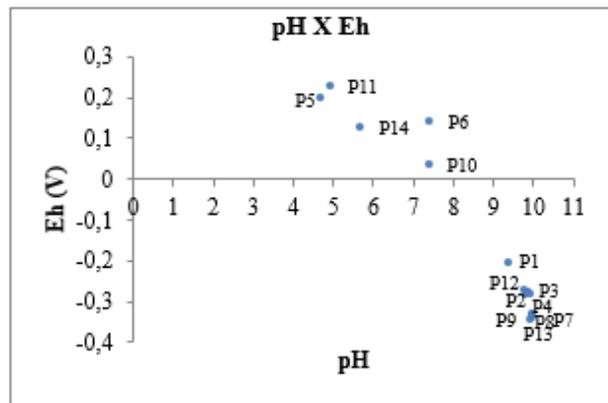


Fonte: Autora (2024).

Valores positivos de Eh indicam condições oxidantes, enquanto que valores negativos indicam disponibilidade de elétrons, ou condições redutoras (Jardim, 2014). O diagrama da Figura 9 mostra os pontos de potencial redox das fontes termais e não termais, provavelmente

relacionadas a mistura de águas superficiais que, quando relacionadas ao pH indicam a presença de um ambiente oxidante (Eh positivo) ácido (Amorosa = P5, José de Jacó = P11 e Monjolinho = P14) a neutro (Caldense = P6 e Amélia = P10). Já as demais fontes de águas subterrâneas, com maior concentração de sulfato, apresentam caráter básico (pH acima de 9,0) e ambiente redutor (Eh negativo).

Figura 10- Diagrama Eh x pH para as águas termais e não termais



Fonte: Autora (2024).

Como observado por Cruz e Peixoto (1991) as medidas de potencial redox (Eh) em algumas águas de fontes e poços, em Poços de Caldas, ao relacionar com o pH, indicam evolução de um ambiente oxidante fracamente ácido a neutro na zona superficial, para um ambiente redutor básico nas águas de circulação profunda. As mudanças de condições redutoras e oxidantes são os principais fatores que condicionam a composição de gases, e as resultantes soluções termais mineralizadas.

## 5.5 CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA

A somatória dos cátions e dos ânions (em meq/L) deverá equilibrar-se, pois as águas naturais são eletricamente neutras (ANA, 2018). Conforme balanço iônico da Tabela 16, o valor do erro admissível mais próximo de zero foi encontrado no ponto P6 (Caldense = 0,12). As fontes P5 (Amorosa), P11 (José de Jacó) e P14 (Monjolinho) são águas que possuem maior quantidade de ânions, as demais fontes apontam para maior presença de cátions.

O cálculo do balanço iônico mostrou que, para cinco das fontes estudadas (P6, P7, P8, P9 e P10), os erros da reação estiveram dentro do intervalo de 10%. As 7 amostras cujos erros estão entre 11 e 17% representam valores atípicos e não interferem no resultado final das

análises, conforme verificado na correlação significativa entre o somatório de ânions e cátions com ( $R^2 = 0,96$  - Figura 10a) entre todas as fontes estudadas (Tabela 17).

Schoeller (1962) e Freeze e Cherry (1979), consideraram aceitáveis, erros de até 5%, outros autores admitem erros de até 20% (Mizuno, 2012; Silva; Silva, 2018).

Tabela 16- Somatória dos cátions e ânions e diferença em mEq/L

Ponto	$\Sigma$ cátions	$\Sigma$ ânions	Diferença
P1	12,3	8,6	3,7
P2	12,8	7,8	5,0
P3	13,6	7,9	5,7
P4	12,6	7,4	5,3
P5	0,1	0,5	-0,4
P6	2,9	2,8	0,1
P7	9,9	6,2	3,7
P8	10	6,8	3,2
P9	10,5	6,6	4,0
P10	4,4	3,7	0,7
P11	0,1	0,5	-0,4
P12	10,1	6,2	4,0
P13	14,3	7,4	6,8
P14	0,9	1,1	-0,3

Fonte: Autora (2024).

Tabela 17- Tabela de porcentagem de erro com pH e condutividade

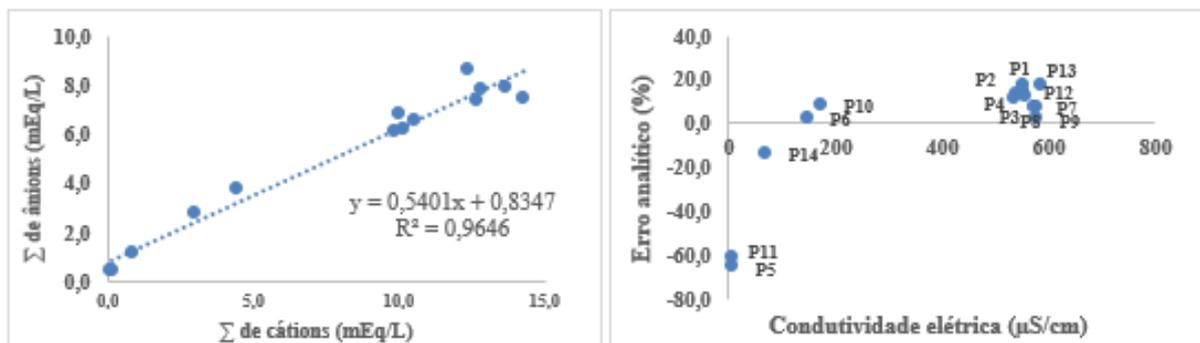
Ponto	pH	Cond. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Erro	%
P1	9,38	553	0,175	17,54
P2	9,86	537	0,114	11,43
P3	9,85	551	0,145	14,54
P4	9,92	555	0,127	12,75
P5	4,71	8	0,654	65,40
P6	7,43	148	0,019	1,93
P7	9,99	573	0,072	7,22
P8	9,98	579	0,027	2,70
P9	9,99	579	0,068	6,82
P10	7,40	174	0,079	7,92
P11	4,92	7	0,615	61,52
P12	9,78	542	0,137	13,74
P13	9,94	586	0,172	17,18
P14	5,70	70	0,142	14,22

Fonte: Autora (2024).

Além disso, observa-se que os maiores erros são encontrados nas duas amostras (P5 = Amorosa e P11 = José de Jacó) que apresentam pH mais ácido (4,71 e 4,92) e condutividade mais baixa (8,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e 7,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Tratam-se muito provavelmente de fontes relacionadas a mistura de águas superficiais, conforme verificado na Figura 9 e na relação entre a distribuição de erros analíticos com a condutividade elétrica da Figura 10b.

Segundo Sena (2011) altos valores de coeficiente de erro podem indicar erro analítico ou de cálculo, a presença de íons não analisados que estão em concentrações apreciáveis na água, ou águas pouco mineralizadas como a água de chuva. Por esse motivo optou-se por não excluir as fontes Amorosa e José de Jacó da análise dos dados.

Figura 11- Correlação entre o somatório de cátions e ânions e a distribuição dos erros e condutividade elétrica



Fonte: Autora (2024).

Legenda: (a) Correlação entre o somatório de ânions e cátions dos 14 poços (meq/L); (b) Distribuição de erros analíticos de balanço iônico (%) com a condutividade elétrica dos 14 poços (µS/cm).

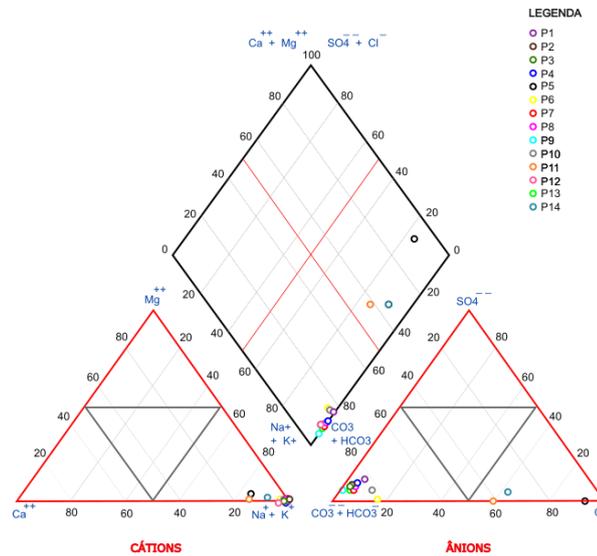
Szikszay e Teissedre (1977) estudaram as águas da estância de Águas da Prata, cidade localizada na borda ocidental do Planalto de Poços de Caldas, e classificou as fontes como bicarbonatadas sódicas, exceto uma cloro-bicarbonatada sódica. Já nos estudos da CPRM (1979), os autores classificaram as águas das fontes Pedro Botelho e Macacos como hipertermais, alcalinas, bicarbonatadas sódicas e sulfurosas e discretamente radioativas.

A amostras das fontes termais e não termais deste estudo foram classificadas, de acordo com o diagrama de Piper como bicarbonatadas sódicas (Figura 11). A proximidade dos pontos da Figura 11 pode indicar comunicação entre as águas das fontes estudadas, fazendo com que possuam conteúdos químicos muito semelhantes. Além disso, a relação ( $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ ) também pode indicar evolução hidroquímica, devido ao maior tempo de residência e processo de troca iônica ou interação água-rocha. Somente as amostras das fontes Amorosa (P5), José de Jacó (P11) e Monjolinho (P14) foram classificadas como cloretadas sódicas. As fontes P5 e P11 apresentaram os maiores erros no balanço iônico, e, junto com a amostra P14 podem representar fontes com a mistura de águas superficiais (Figuras 9, 10 e 11).

As relações iônicas calculadas a partir de Hem (1985), indicam que na relação entre magnésio e cálcio ( $r\text{Mg}^{2+} \div r\text{Ca}^{2+}$ ) foram observadas variações entre 0,00 a 0,24 (água de circulação em rocha de composição granítica), sendo as fontes Amorosa (P5), Caldense (P6) e Monjolinho (P14) com razões  $> 0,20$ . Por outro lado, a relação cálcio e magnésio ( $r\text{Ca}^{2+} \div$

$rMg^{2+}$ ) em todas fontes foram  $> 1$ , com exceção das fontes Rio Verde (P4) e Mariquinha (P9) onde não foram detectadas concentrações de  $Mg^{2+}$ .

Figura 12- Diagrama de Piper (meq/L) gerado para a classificação das amostras das águas termais e não termais



Fonte: Autora (2024).

Os pontos (P1, P2, P3, P7, P8, P9, P10 e P12) apresentaram valores entre 0,02 – 0,025 para a razão sendo a fonte Amorosa (P5 = 2,65) com maior valor para esta razão, devido a predominância do íon potássio em relação ao sódio. Esta é uma das fontes que apresenta maior discrepância em termos de erro analítico e classificação das águas (Tabela 16 e Figuras 9, 10 e 11). As fontes José de Jacó (P11) e Monjolinho (P14) encontram-se no intervalo 0,09 – 0,60 indicando, provavelmente, água de circulação em rochas com composição granítica, já as fontes Rio Verde (P4), Caldense (P6) e Macacos (P13) situam-se no intervalo de 0,004 – 0,280, indicando águas doces.

A razão ( $rNa^+ \div rCl^-$ ) foi menor que 0,7 nas fontes Amorosa (P5) e José de Jacó (P11) indicando a precipitação de sais de  $Na^+$ . Nas demais fontes os valores da razão foram maiores que 0,7 (fluxo de rochas cristalinas ou vulcânicas). Para a razão ( $rCl^- \div rHCO_3^-$ ) as fontes P1 (Sem nome), P3 (Samaritana), P4 (Rio Verde), P6 (Caldense), P7 (Pedro Botelho), P8 (Chiquinha) e P10 (Amélia) apresentam valores no intervalo de 0,1 – 0,5 (águas continentais), sendo as demais fontes classificadas entre fluxo normal por rochas cristalinas P5 (Amorosa = 12,91), P11 (José de Jacó = 1,43) e P14 (Monjolinho = 1,81) devido à baixa quantidade de  $HCO_3^-$  e as demais P2 (São José = 0,06), P9 (Mariquinha = 0,07), P12 (Sinhazinha = 0,08) e P13 Macacos = 0,09) devido à baixa quantidade de  $Cl^-$ .

As razões geoquímicas de Hounslow (1995), indicam que as razões  $[\text{Na}^+ \div (\text{Na}^+ + \text{Cl}^-)]$  variaram entre 0,97 em P2 (São José) e 0,06 em P5 (Amorosa) indicando águas com fonte de sódio outra que não halita, como a albita e água da chuva ( $< 0,5$  e  $\text{STD} < 50$ ). Somente a fonte P11 (José de Jacó = 0,23 e  $\text{STD} = 7,0$ ) foi classificada como erro de análise. As razões  $[\text{Mg}^{2+} \div (\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+})]$  para todas as fontes estudadas foram  $< 0,5$  variando entre 0,0 e 0,20. No entanto, relações entre  $(\text{HCO}_3^- \div \text{SiO}_2 < 5)$  ocorrem em três fontes, Amorosa (P5 = 0,37), José de Jacó (P11 = 3,08) e Monjolinho (P14 = 2,84) indicando intemperismo de granito.

Para as razões  $[\text{SiO}_2 \div (\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)]$  os resultados apontam troca catiônica ( $>1$ ) muito provavelmente pelas baixas concentrações de  $\text{SiO}_2$  e quando comparadas com as altas concentrações de  $\text{Na}^+$ . Já a relação  $[(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-) \div (\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^- + \text{Ca}^{2+})]$  das fontes foram todas próximas a 1,0 indicando intemperismo de plagioclásio não provável. E o índice  $(\text{Cl}^- \div \sum \text{ânions})$  encontra-se em todas as fontes estudadas abaixo de 0,8 indicando intemperismo da rocha, exceto para a fonte Amorosa (P5), com índice 0,89 e  $\text{STD} < 100$ , indicando a maior contribuição da água da chuva.

Os valores do índice de troca de bases (itb) calculados variam entre -1,99 (Macacos = P13) a 6,29 (Amorosa = P5). A maioria das fontes apresentam valores de itb entre -1,6 e -1,7, ou seja, itb negativo. Isso pode estar relacionado com a diferença na maior concentração de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  em relação ao  $\text{Cl}^-$ . Os pontos que apresentaram valores positivos para itb foram o Amorosa (P5) e o José de Jacó (P11). Segundo Kumar (2014), a razão de alguns valores de itb serem negativos é quando os íons  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Ca}^{2+}$  da água são trocados por  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  das rochas, ocorrendo uma reação de troca indireta ou desequilíbrio cloro-alcálico, representados por valores negativos.

## 5.6 CLASSIFICAÇÃO DAS FONTES TERMAIS E NÃO TERMAIS

Quatro fontes são classificadas como termais, seis mesotermiais e quatro hipotermiais (Tabela 18). As águas subterrâneas sofrem pouca variação de temperatura, em profundidade e o aumento da temperatura pode ocorrer: em função do grau geotérmico (que pode variar cerca de 1,8 °C a cada 100 metros em áreas espessas de camadas sedimentares, e até 3,6 °C a cada 100 metros de profundidade em áreas de atividades vulcânicas); da radioatividade através da decomposição de substâncias radioativas (K-40, radioelementos das séries de U e Th); fenômenos de vulcanismo e gêiser (Custódio; Llamas, 1983).

Tabela 18- Resultado da classificação dos pontos de acordo com a temperatura

Tipo	Fontes		T (°C)	Classificação
Não termais	Poço s/ nome	P1	24,23	Hipotermal
	São José	P2	24,20	Hipotermal
	Samaritana	P3	25,60	Mesotermal
	Rio Verde	P4	25,95	Mesotermal
	Amorosa	P5	21,91	Hipotermal
	Caldense	P6	26,78	Mesotermal
	Amélia	P10	28,76	Mesotermal
	José de Jacó	P11	25,63	Mesotermal
	Sinhazinha	P12	26,80	Mesotermal
	Monjolinho	P14	26,80	Hipotermal
	Pedro Botelho	P7	40,48	Termal
	Termais	Chiquinha	P8	42,51
Mariquinha		P9	43,40	Termal
Macacos		P13	37,13	Termal

Fonte: Autora (2024).

Segundo Araújo (1980, *apud* Cruz; Peixoto, 1991), o gradiente geotérmico na região de Poços de Caldas varia de 27 a 38 °C/km, contrastando com os valores do escudo circunvizinho de rochas no embasamento cristalino de 9,2 a 10,4 °C/km e, as variações de temperatura das águas na chaminé deve-se ao “movimento das águas subterrâneas nas áreas mais fraturadas e mineralizadas, às razões químicas exotérmicas e em menor razão ao calor radiogênico” (Cruz; Peixoto, 1991, p. 28).

A profundidade aparente de circulação das águas termais foi determinada por Cruz e Peixoto (1991), através dos valores de condutividade térmica das rochas, da geotemperatura da sílica, densidade de fluxo térmico e da temperatura média anual da superfície, chegando a ordem de 1800 a 2700 m.

Szikszay e Teissedre (1977), analisaram as águas da cidade de Águas da Prata e verificou que as temperaturas mais elevadas foram encontradas nas fontes que surgiam das rochas alcalinas, sendo consideradas como hipotermiais, já as águas de fontes que surgiam sobre arenitos como fontes frias. Também identificou maiores temperaturas em algumas águas de fontes de Águas de Lindóia, Águas de São Pedro e em poços profundos, sugerindo que esse fenômeno comprova a origem profunda da água onde a temperatura mais elevada é provocada pelo efeito do gradiente geotérmico, a subida da água ocorre rapidamente nas fissuras evitando, portanto o resfriamento.

Quanto à classificação das fontes termais e não termais segundo Schoeller (1962) (Tabela 19), a ordem de ânions principais das águas estudadas, apresentam em sua maioria ordem (6)  $r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^-$ , com exceção das fontes Amorosa (P5), José de Jacó (P11) e

Mojolinho (P14) que apresentaram a ordem (2)  $rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{2-}$ . Na ordem dos cátions em todas as amostras resultaram em (b)  $rNa^+ > rCa^{2+} > rMg^{2+}$  (Tabela 19).

As fontes também apresentam em geral as classificações: (6) cloretada normal ( $rCl^- < 10$  meq/L); (4) sulfatada normal ( $rSO_4^{2-} < 6,0$  meq/L); e (2) bicarbonatada normal ( $rHCO_3^-$  entre 7,0 e 2,0 meq/L). Apenas as fontes Amorosa (P5), José de Jacó (P11) e Monjolinho (P14) se enquadraram no grupo (3) hipobicarbonatado ( $rHCO_3^- < 2,0$  meq/L), conforme a Tabela 19. Além disso, as fontes estudadas apresentaram classificação geral 642-3b  $\beta$ , com exceção dos pontos P5 (643-1b), P11(643-1b) e P14 (643-3b  $\beta$ ) indicando que as fontes que apresentam maiores erros no balanço iônico, podem representar fontes com a mistura de águas superficiais (Figuras 9, 10, 11 e Tabelas 17 e 19).

Tabela 19- Resultado da classificação das águas termais e não termais

Tipo	Fontes	Cloreto	Sulfato	Bicarbonato	Schoeller					
					Tipo	Subtipo	Parcial	Geral		
<b>Não termais</b>	Poço s/ nome	P1	Cloretado	Sulfatado	Bicarbonatado	3	b	$\beta$	642-3b $\beta$	
	São José	P2	Cloretado	Sulfatado	Bicarbonatado	3	b	$\beta$	642-3b $\beta$	
	Samaritana	P3	Cloretado	Sulfatado	Bicarbonatado	3	b	$\beta$	642-3b $\beta$	
	Rio Verde	P4	Cloretado	Sulfatado	Bicarbonatado	3	b	$\beta$	642-3b $\beta$	
	Amorosa	P5	Cloretado	Sulfatado	Hipobicarbonatado	1	b	-	643-1b	
	Caldense	P6	Cloretado	Sulfatado	Bicarbonatado	3	b	$\beta$	642-3b $\beta$	
	Amélia	P10	Cloretado	Sulfatado	Bicarbonatado	3	b	$\beta$	642-3b $\beta$	
	José de Jacó	P11	Cloretado	Sulfatado	Hipobicarbonatado	1	b	-	643-1b	
	Sinhazinha	P12	Cloretado	Sulfatado	Bicarbonatado	3	b	$\beta$	642-3b $\beta$	
	Monjolinho	P14	Cloretado	Sulfatado	Hipobicarbonatado	3	b	$\beta$	643-3b $\beta$	
	Pedro Botelho	P7	Cloretado	Sulfatado	Bicarbonatado	3	b	$\beta$	642-3b $\beta$	
	<b>Termais</b>	Chiquinha	P8	Cloretado	Sulfatado	Bicarbonatado	3	b	$\beta$	642-3b $\beta$
	Mariquinha	P9	Cloretado	Sulfatado	Bicarbonatado	3	b	$\beta$	642-3b $\beta$	
	Macacos	P13	Cloretado	Sulfatado	Bicarbonatado	3	b	$\beta$	642-3b $\beta$	

Fonte: Autora (2024).

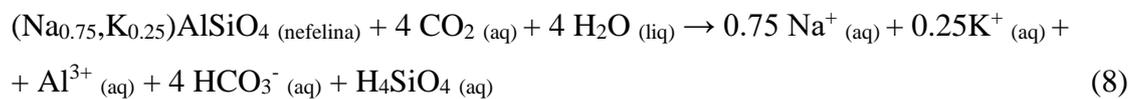
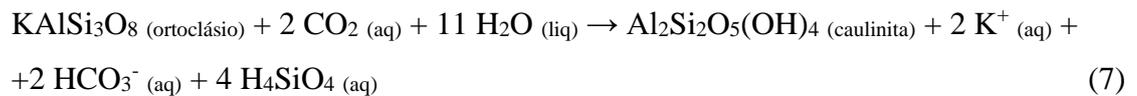
## 5.7 PROVENIÊNCIA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

De acordo com os pontos amostrados (Figura 5), as fontes de águas estudadas surgem sob os tinguaiços, nefelina sienitos e foiaitos em Poços de Caldas e sobre o sienito Pedra Branca em Pocinhos do Rio Verde. A composição mineralógica provável do maciço sienítico de Pedra Branca e dos tinguaiços, nefelina sienito e fonólitos de Poços de Caldas, segundo Winters (1981), são de ortoclásios, aegirina-augita, biotitas e feldspatos potássicos.

Ulbrich (1983) verificou que as nefelinas sienitos possuem feldspatos ricos em  $K^+$  seguidos também de feldspatos potássico-sódicos pertencentes à série microclinio ortoclásio. Os estudos de Garda (1990) em amostras de rochas afetadas pela alteração hidrotermal,

apontam a presença de microlínio, illita, esmectita, caulinita, analcima, dolomita, ortoclásio, gibsita, apatita, albita e fluorita. Cruz e Peixoto (1991) destacam que nestas rochas predominam os minerais ortoclásio, sanidina, nefelina e aegirina.

Segundo Conceição *et al.* (2024), os principais processos de intemperismo químico que ocorrem na região da Caldeira Vulcânica, devido ao processo de interação água/rocha, removem parcialmente SiO<sub>2</sub> e lixiviam Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Ca<sup>2+</sup> pela hidrólise de ortoclásios e sanidinas (feldspato sódico), conforme Equações 7 e 8 de Conceição *et al.* (2024).



As fontes do Balneário de Pocinhos do Rio Verde (P1 = Sem nome, P2 = São José, P3 = Samaritana e P4 = Rio Verde) juntamente com as fontes Pedro Botelho (P7), Chiquinha (P8), Mariquinha (P9), Amélia (P10), Sinhazinha (P12) e Macacos (P13) possuem potencial hidrogeniônico (pH > 7,4), condutividade elétrica elevada (Cond > 170,0 µS/cm) e alta concentração de sólidos totais dissolvidos (STD > 110,0 mg/L). As fontes podem ser consideradas bastante mineralizadas, pelas altas concentrações de sódio (Na<sup>+</sup> > 98,0 mg/L), potássio (K<sup>+</sup> > 4,0 mg/L), sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > 10,0 mg/L) e bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > 190,0 mg/L) sendo classificadas como bicarbonatadas sódicas conforme diagrama de Piper.

A elevada razão (rNa<sup>+</sup> ÷ rCl<sup>-</sup>), relações [Na<sup>+</sup> ÷ (Na<sup>+</sup> + Cl<sup>-</sup>)] e [SiO<sub>2</sub> ÷ (Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup> - Cl<sup>-</sup>)] indicam, provavelmente intemperismo químico das rochas hospedeiras, fato observado pela razão (Cl<sup>-</sup> ÷ ∑ânions), pelos processos de hidrólise de ortoclásios e sanidinas (feldspato potássico) e de dissolução incongruente dos minerais nefelinas e aegirinas. Além disso, os resultados também sugerem um processo de troca catiônica entre as fontes estudadas, fato verificado nos estudos de Szikszay e Teissedre (1977) e Bertolo, Hirata e Fernandes (2007). Segundo Freitas (2016), se a concentração do sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > 10,0 mg/L) for maior que de cálcio (Ca<sup>2+</sup> < 1,60 mg/L) há indicações de que o cálcio foi removido da solução por precipitação de calcita ou por reações de troca catiônica. Como não há ocorrência de calcita na região de estudo, o sulfato muito provavelmente, pode ser decorrente de troca catiônica ou oxidação da pirita, conforme estudo de Bertolo, Hirata e Fernandes (2007).

As fontes P5 (Amorosa), P11 (José de Jacó) e P14 (Monjolinho) apresentaram baixa quantidade de sólidos totais dissolvidos (STD < 46 mg/L), condutividade elétrica (Cond < 70 mg/L), potencial hidrogeniônico mais ácido (pH < 5,7) e pouca ou nenhuma concentração de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$  < 2,0 mg/L). A quantidade do íon cloreto ( $\text{Cl}^-$  = 10,0 mg/L a 20,0 mg/L) supera a concentração do bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$  = 2,0 mg/L a 19,0 mg/L), sendo classificadas como águas cloretadas sódicas conforme o diagrama de Piper. O teor de cloreto acima da concentração de bicarbonato pode ser devido a contaminação humana.

As fontes (P5, P11 e P14), possuem as menores razões ( $r\text{Na}^+ \div r\text{Cl}^-$ ), maiores razões ( $r\text{K}^+ \div r\text{Na}^+$ ) e ( $r\text{Mg}^{2+} \div r\text{Ca}^{2+}$ ). As relações [ $\text{Na}^+ \div (\text{Na}^+ + \text{Cl}^-)$ ] e ( $\text{Cl}^- \div \sum \text{ânions}$ ) apontam provável influência da água de chuva na composição química para essas fontes, ou seja, que se encontram em pequenas profundidades são influenciadas quimicamente pela precipitação acrescidas da lixiviação dos solos da região e com um curto tempo de circulação. A alta concentração de potássio em P14 (9,80 mg/L) pode estar relacionada ao intemperismo químico de biotita ou feldspato potássico.

A fonte (P6 = Caldense) se trata de água subterrânea extraída de poço tubular a 276 m de profundidade, apresenta potencial hidrogeniônico (pH = 7,4), condutividade elétrica (Cond = 148,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) e sólidos totais dissolvidos (STD = 96,0 mg/L). Quanto aos parâmetros químicos e metais, dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$  = 12,9 mg/L), ferro total ( $\text{Fe}_t$  = 0,1 mg/L) e cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$  = 1,59 mg/L) com baixa concentração de potássio ( $\text{K}^+$  = 2,0 mg/L) e alta de sódio ( $\text{Na}^+$  = 66,0 mg/L) e bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$  = 141,68 mg/L) conferem uma característica de água bicarbonatada sódica. A composição química desta fonte provavelmente pode sofrer influência da dissolução incongruente de silicatos nefelina.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo, a caracterização e a classificação das águas termais e não termais possibilitam o apontamento dos prováveis processos de precipitação, percolação da água na rocha de origem, tempo de contato, pH, troca iônica e temperatura como os maiores contribuintes na qualidade das águas.

As análises apresentaram altas concentrações de sódio, bicarbonato e sulfato em todos os pontos, com exceção dos pontos P5, P11 e P14 que podem, muito provavelmente, serem considerados como de mistura de águas superficiais com menor influência da litologia pelo tempo de contato (interação água/rocha).

A composição química das demais fontes (P1, P2, P3, P4, P6, P7, P8, P9, P10, P12 e P13) apresentaram alta condutividade elétrica, potencial hidrogeniônico, sólidos totais dissolvidos e conteúdo iônico que podem, muito provavelmente, serem atribuídos ao litotipo hospedeiro, processos de troca catiônica, intemperismo químico e maior tempo de contato para os processos de interação água/rocha, o que sugere a hidrólise de ortoclásios e sanidinas (feldspato sódico) e dissolução incongruente de silicatos nefelinas.

Quanto ao balanço iônico, as fontes estudadas apresentaram-se dentro do erro de 20%, com exceção do P5 e do P11. Apesar do resultado do cálculo do erro ter sido muito elevado nos pontos P5 e P11, optou-se por não excluí-los da análise de dados, pois o alto valor de erro gerado deve-se a baixa mineralização dessas águas corroborando com o fato de serem fontes que recebem grande contribuição das águas de chuva.

Os pontos P5, P11 e P14 foram classificados como águas cloretadas sódicas enquanto os demais pontos foram classificados como bicarbonatadas sódicas no digrama de Piper. Seis fontes foram classificadas como mesotermiais, quatro fontes hipotermiais e quatro fontes termais. O gradiente geotérmico é um dos grandes responsáveis por essa variação de temperatura, as fontes termais possuem águas que circulam a grandes profundidades. A classificação das águas segundo Schoeller na ordem de cátions para todas as amostras foi  $rNa^+ > rCa^{2+} > rMg^{2+}$ , já na ordem de ânions foi  $rHCO_3^- > rSO_4^{2-} > rCl^-$ , com exceção, também, dos pontos P5, P11 e P14 que apresentaram a ordem  $rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{2-}$ .

Por fim, sugere-se que mais estudos, em mais fontes da região, com mais elementos químicos e com maior periodicidade, possam ser realizados a fim de melhorar os conhecimentos sobre os processos atuantes que formam e contribuem para as características químicas das fontes termais e não termais desta importante fisiografia da paisagem, a Caldeira Vulcânica de Poços de Caldas.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9898**: preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. Rio de Janeiro, ABNT, 1987.
- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. ANA. **Relatório Técnico Temático de Hidroquímica**. Hidrogeologia dos ambientes cársticos da bacia do Rio São Francisco para a gestão de recursos hídricos. Brasília, ANA, 2018.
- ANALYSER COMÉRCIO E INDÚSTRIA LTDA. **Manual de instruções 910MS**: fotômetro de chama digital microprocessado. São Paulo: Analyser Comércio e Indústria Ltda., 2010.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23. ed. Washington DC: APHA, 2017.
- BACHA, André Luis Reis; SARDINHA, Diego de Souza; GODOY, Letícia Hirata; ANCEMI, Matheus Fernando. Geoquímica de piroclastos intemperizados da caldeira vulcânica de Poços de Caldas, Minas Gerais. **Geologia Usp: Série Científica**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 63-80, out. 2020.
- BERTOLO, Reginaldo; HIRATA, Ricardo; FERNANDES, Amélia. Hidrogeoquímica das águas minerais envasadas do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, [s. l.], v. 37, n. 3, p. 515-529, set. 2007.
- BIBLIOTECA DAS THERMAS ANTÔNIO CARLOS. **Biblioteca Orozimbo Corrêa Netto**, documentos do acervo histórico. Poços de Caldas, 2024.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 5 mai. 2021.
- BRASIL. Decreto-Lei nº 7.841, de 08 de agosto de 1945. Código de Águas Minerais. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 20 ago. 1945.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008. **Diário Oficial da União**, nº 66, de 7 de abril de 2008. 64-68.
- CALDAS. Prefeitura Municipal de Caldas. **O uso terapêutico das águas termais de Pocinhos do Rio Verde**. Caldas, 2024.
- CARVALHO, A. M. **Avaliação da qualidade das águas termais sulfurosas distribuídas nas fontes da cidade de Poços de Caldas-MG**. 2013. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2013.
- CELLIGOI, A. Considerações sobre análises químicas de águas subterrâneas. **Geografia**, Londrina, v. 8, n. 1, p. 91-97, jan./jun. 1999.

CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. CETEC. **Avaliação hidrogeológica e hidroquímica dos arredores de Poços de Caldas**. Belo Horizonte, 1987.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. CETESB. **Conheça os diferentes tipos de água**. 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/blog/2017/03/20/conheca-os-diferentes-tipos-de-agua>. Acesso em: 10 abr. 2022.

CONCEIÇÃO, Fabiano Tomazini da; MELLO, Rafael Carvalho Alves de; FERNANDES, Alexandre Martins; SARDINHA, Diego de Souza. Chemical and physical denudation rates in the Poços de Caldas alkaline massif, Minas Gerais State, Brazil. **Minerals**, [s. l.], v. 14, n. 7, p. 700, jul. 2024.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. CPRM. **Projeto Sapucaí: relatório final**. São Paulo: DNPM/CPRM, 1979.

CRUZ, Waldemir B.; PEIXOTO, Carlos A. M. A evolução química das águas subterrâneas de Poços de Caldas–MG. **Revista Brasileira de Geociências**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 23-33, mar. 1991.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrologia subterrânea**. Tomo I e II. Barcelona: Ediciones Omega, S.A., 1983.

ELLERT, Reinholt. Contribuição à Geologia do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. **Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Universidade de São Paulo. Geologia**, São Paulo, n. 18, p. 5-60, dez. 1959.

FEITOSA, F. A. C. *et al.* **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

FETTER, C.W. **Applied hydrogeology**. 4 ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2001.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979.

FREITAS, M. A. **Hidrogeoquímica e isotopia de águas com alta salinidade do sistema aquífero Serra Geral na região do Alto Rio Uruguai, Brasil**. 2016. 195 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2016.

GARDA, G. M. **A alteração hidrotermal no contexto da evolução geológica do maciço alcalino de Poços de Caldas**. 1990. 213 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1990.

GOOGLE. **Google Earth Pro**. Localização da imagem: Poços de Caldas, Brasil. Data da imagem: 14 abr. 2022. Disponível em: <https://earth.google.com/>. Acesso em: 14 abr. 2022.

HACH. **DR/890: colorimeter procedures manual**. Loveland: Hach Company, 2013.

HACH. **Digital titrator manufactured under U.S. patent**. 25. ed. Loveland: Hach Company, 2013.

HELLMANN, F.; RODRIGUES, D. M. O. **Termalismo e crenoterapia: No Brasil e no mundo**. Santa Catarina: Unisul, 2017.

HEM, John D. **Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water**. 2. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 1985.

HORIBA. Multi water quality checker U-50 series instruction manual. Miyanohigashi, kisshoin minami-ku, kyoto 601-8510 Japan. 2009.

HOUNSLOW, A. W. **Water quality data: analysis and interpretation**. Stillwater: Lewis Publishers, 1995.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estudos geográficos e estatísticos sobre a região Sudeste do Brasil**. 2024. IBGE. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo?id=31582&view=detalhes>. Acesso em: 03 fev. 2024.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL. **Programa de recuperação de áreas degradadas (PRAD)**. INB. UTM – Caldas – Minas Gerais. Nº Projeto 099-515-3023. Mapa Geológico Regional (2). Escala 1:150.000. Rio de Janeiro: Indústrias Nucleares do Brasil, 2011.

JARDIM, Wilson F. Medição e interpretação de valores do potencial redox (EH) em matrizes ambientais. **Química nova**, [s. l.], v. 37, p. 1233-1235, jul. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20140207>. Acesso em: 20 fev. 2024.

KÖPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. [S. l.]: Fondo de Cultura Econômica, 1948.

KRAUSKOPF, K. B. **Introdução à geoquímica**. 2 ed. São Paulo: Polígono, 1972.

KUMAR, PJ Sajil. Evolution of groundwater chemistry in and around vaniyambadi industrial area: differentiating the natural and anthropogenic sources of contamination. **Geochemistry**, [s. l.], v. 74, n. 4, p. 641-651, fev. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2014.02.002>. Acesso em: 07 mar. 2023.

KUPPER, G. P.; BERGAMO, T. T. F. O uso terapêutico da água termal em pacientes com feridas expostas. **Revista Científica Eletrônica de Ciências Aplicadas da FAIT**, [s. l.], n. 2, nov. 2020. Disponível em: [https://www.fait.revista.inf.br/imagens\\_arquivos/arquivos\\_destaque/oYVc1SR2AyC1kxL\\_2021-3-10-13-52-36.pdf](https://www.fait.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/oYVc1SR2AyC1kxL_2021-3-10-13-52-36.pdf). Acesso em: 08 mar. 2023.

MANASSES, F. **Caracterização hidroquímica da água subterrânea da formação Serra Geral na região sudoeste do estado do Paraná**. 2009. 120 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2009.

MATTHESS, G. **The properties of groundwater**. New York: John Wiley & Sons, 1982.

MIZUNO, M. G. M. **Hidroquímica das águas subterrâneas do Distrito Federal**. 2012. 145 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, DF, 2012.

MOBUS, G. **Qualigraf**: software para interpretação de análises físico-químicas, versão 1.1. Fortaleza: fundação cearense de meteorologia e recursos hídricos – FUNCEME, 2014. Disponível em: <http://www.funceme.br>. Acesso em: 09 mai. 2023.

MOREIRA, Fábio Roque da Silva; ALMEIDA, R. F.; CÂMARA, G. Aplicação da abordagem da importação semântica (IS) para caracterização de contatos geológicos. *In*: Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto (SBSR), 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: INPE, 2001. p. 283-290.

MORTATTI, Jefferson *et al.* Fluxo de carbono inorgânico dissolvido no Rio Piracicaba (São Paulo): partição e reações de equilíbrio do sistema carbonato. **Geociências**, São Paulo, v. 25, n. 4, p. 429-436, jul. 2006.

MOURÃO, Maria Antonieta *et al.* Caracterização hidroquímica e avaliação de uso das águas subterrâneas na microrregião de Unaí, bacia do São Francisco, nw de Minas Gerais-Brasil. *In*: Joint World Congress on Groundwater, 1., 2000, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABAS, 2000. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24324>. Acesso em: 13 abr. 2023.

O CALDENSE: **Jornais Antigos da Cidade de Caldas: Vários títulos (MG) - 1875 a 1965**. Caldas, 12 ago. 1877. Disponível em: <http://memoria.bn.br/docreader/DocReader.aspx?bib=672238&pagfis=266>. Acesso em: 15 jan. 2024.

O GLOBO: **Orgão da agência americana telegraphica dedicado aos interesses do commercio, lavoura e indústria (RJ) - 1874**. Rio de Janeiro, 08 jun. 1874. Disponível em: <https://memoria.bn.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=369381&pagfis=1192>. Acesso em: 20 dez. 2023.

OLIVIER, J.; VENTER, J. S.; JONKER, C. Z. Thermal and chemical characteristics of hot water springs in the northern part of the Limpopo Province, South Africa. **Water SA**, [s. l.], v. 37, n. 4, p. 427-436, fev. 2011. Disponível em: <https://www.ajol.info/index.php/wsa/article/view/71415>. Acesso em: 03 abr. 2023.

POÇOS DE CALDAS, Prefeitura Municipal de Poços de Caldas. **Estudos hidrogeológicos - Poços de Caldas**. 2022. Relatório Técnico. Disponível em: <https://www.pocosdecaldas.mg.leg.br/legislacao/plano-diretor-1>. Acesso em: 30 jun. 2023.

PONTES, H. **A poesia das águas**: retratos escritos de Poços de Caldas. Poços de Caldas: Gráfica Sul Minas, 2004.

REBOUÇAS, A. C. **Águas subterrâneas e poços tubulares profundos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

REIS, A. L. S. N. Poços de Caldas: de estância hidromineral e polo turístico regional a patrimônio cultural estadual. *In*: encontro da associação nacional de pesquisa e pós-graduação

em arquitetura e urbanismo, 5, 2016, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANPARQ, 2016. Disponível em: <https://www.anparq.org.br/dvd-enanparq-4/SESSAO%2010/S10-04-NERY%20REIS,%20A.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2023.

SANTOS, A. C. **Noções de hidroquímica**. In: Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Coordenado por Fernando A. C. Feitosa e João Manoel Filho. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

SARDINHA, Diego de Souza *et al.* Base de dados de desastres naturais no município de Poços de Caldas/MG: ferramenta para o planejamento e a gestão territorial. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 318-331, set./dez. 2016.

SARDINHA, Diego de Souza *et al.* Discussão da evolução da caldeira vulcânica de Poços de Caldas (MG) a partir de uma análise pedogeoquímica em uma topossequência. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [s. l.], v. 16, n. 2, jun. 2015.

SARDINHA, Diego de Souza; GODOY, Letícia Hirata. Geodiversidade e geoconservação na região da caldeira vulcânica de Poços de Caldas (MG), Brasil. **Revista de Ciências Ambientais**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 31-45, dez. 2019.

SARDINHA, Diego de Souza *et al.* Geoquímica fluvial e balanço de denudação em Tinguaitos de Poços de Caldas, Minas Gerais. **Geologia USP. Série Científica**, São Paulo, v. 18, n. 1, p. 259-272, mar. 2018.

SCHOELLER, Marc. **Les eaux souterraines**. Paris: Masson & C., 1962.

SENA, S. F. M. **Estudo hidroquímico da água produzida de um determinado campo de petróleo da bacia Potiguar**. 2011. 150 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2011.

SILVA, Adriano Willian da; SILVA, Frederico Fonseca da. Análise química da água de entrada no sistema agroindustrial de curtume em Maringá. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v. 17, p. 1-15, mar. 2018.

SILVA, Leonardo Barbosa *et al.* Suscetibilidade aos processos da dinâmica superficial na rodovia entre Poços de Caldas (MG) e Águas da Prata (SP). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 21, n. 3, jul. 2020.

SZIKSZAY, M.; TEISSEDRE, J-M. Fontes da estância de Águas da Prata, estado de São Paulo. **Boletim IG, Instituto de Geociências**, São Paulo, v. 8, p. 83-96, 1977.

TODD, D. K. **Groundwater Hydrology**. 2. ed. New York: Wiley, 1980.

ULBRICH, M. N. C. **Aspectos mineralógicos e petrológicos de nefelina sienitos do maciço alcalino de Poços de Caldas, MG-SP**. 1983. 369 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1983.

ULBRICH, H. H. G. J. *et al.* Penecontemporaneous syenite phonolitic and basic-ultrabasic-carbonatite rocks at the Poços de Caldas alkaline massif, SE Brazil: geological and geochronological evidence. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 32, n.2, p.15-26, mar. 2002.

VICTAL, F. A. C. A. **Características físico-químicas da água e produção de sedimentos em uma sub-bacia hidrográfica no planalto de Poços de Caldas – MG.** 2018. 150 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, MG, 2018.

VON SPERLING, Marcos. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: lagoas de estabilização.** Belo Horizonte: ABES, 1996.

WINTERS, A. A. M. **A geologia do maciço sienítico da Pedra Branca Caldas – MG.** 1981. 94 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1981.