

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Ciências Agrárias
Especialização em Recursos Hídricos e Ambientais

Eduardo Rodrigues Araújo

**CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA E QUALIDADE DAS ÁGUAS DE
NASCENTES NO MUNICÍPIO DE ITABIRA - MG**

Montes Claros - MG
2025

Eduardo Rodrigues Araújo

**CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA E QUALIDADE DAS ÁGUAS DE
NASCENTES NO MUNICÍPIO DE ITABIRA - MG**

Monografia apresentada ao Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial, para obtenção do título de Especialista em Recursos Hídricos e Ambientais.

Orientador: Charles Martins Aguilar

Montes Claros, MG
2025

Araújo, Eduardo Rodrigues.

A663c Caracterização hidroquímica e qualidade das águas de nascentes no município de
2025 Itabira - MG [manuscrito]/ Eduardo Rodrigues Araújo. Montes Claros, 2025.
56 f.: il.

Monografia (especialização) - Área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais. Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador: Charles Martins Aguilar

Banca examinadora: Flávio Pimenta de Figueiredo, Júlia Ferreira da Silva, Ivan Pires de Oliveira.

Inclui referências: f. 53-56.

1. Águas subterrâneas -- Teses. 2. Água -- Análises químicas -- Teses. 3. Água -- Composição química -- Teses. I. Aguilar, Charles Martins. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 628.1



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
ESPECIALIZAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA E QUALIDADE DAS ÁGUAS DE NASCENTES NO MUNICÍPIO DE ITABIRA-MG

EDUARDO RODRIGUES ARAÚJO

Trabalho Final de Curso de Especialização (TFCE) submetido à Comissão Examinadora designada pela Comissão de Coordenação do curso de Especialização em Recursos Hídricos e Ambientais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Recursos Hídricos e Ambientais.

TFCE aprovado no dia oito de dezembro de 2025 pela Comissão Examinadora constituída pelos membros:

Charles Martins Aguiar
Orientador - ICA/UFMG

Flávio Pimenta de Figueiredo
Avaliador - ICA/UFMG

Ivan Pires de Oliveira
Avaliador - ICA/UFMG

Júlia Ferreira da Silva
Avaliadora - ICA/UFMG

Montes Claros, data da assinatura eletrônica.

Dalton Rocha Pereira
Coordenador de Pós-graduação *Lato Sensu*



Documento assinado eletronicamente por **Dalton Rocha Pereira, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 23/01/2026, às 08:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4901622** e o código CRC **EB77B30D**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida, pela força e pela oportunidade de chegar até aqui. Minha gratidão à minha família e aos amigos, pelo apoio constante ao longo desta e de tantas outras jornadas. À minha mãe, Delsa, pelo incentivo incondicional e por nunca medir esforços para garantir que eu pudesse estudar e seguir em frente.

Agradeço à Vale pela disponibilização dos dados necessários para o desenvolvimento desta monografia, em especial ao Thiago Manzini. Também agradeço ao Thiago Bonis Silva e ao Carlos Cantarutti pela compreensão e apoio nos momentos em que precisei me ausentar para cumprir as atividades presenciais da especialização.

Expresso minha gratidão ao professor Dr. Charles Martins Aguilar, pela orientação, pela disponibilidade e pelas contribuições ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também ao professor Luciano Vieira Lima, por todo apoio durante a realização do curso.

Por fim, agradeço ao professor Dr. Alcinei Azevedo Místico pelo apoio fundamental na etapa de análise estatística, pela orientação técnica e pela contribuição direta na aplicação dos métodos de análise multivariada e na elaboração dos gráficos e tabelas.

RESUMO

A escassez hídrica tem se consolidado como um desafio recorrente para o sistema de abastecimento público no município de Itabira, MG. Nesse cenário, as nascentes assumem papel estratégico, uma vez que representam pontos naturais de descarga de água subterrânea e podem contribuir diretamente para oferta hídrica local. A qualidade dessas águas permite determinar os usos mais adequados para cada nascente. Neste contexto, deu-se a necessidade de caracterizar hidroquimicamente e a qualidade da água 21 nascentes na região do município homônimo. Para isso, foram utilizados dados físico-químicos obtidos em campo e químicos analíticos laboratoriais, posteriormente validados por meio de balanço iônico e avaliação de amostras em duplicata. As nascentes foram georreferenciadas sobre a carta geológica da região, permitindo sua correlação às principais unidades geológicas locais: Suíte Borrachudos, Grupo Piracicaba, Grupo Nova Lima e Complexo Guanhães. A caracterização hidroquímica foi realizada por meio dos diagramas de *Piper* e *Stiff*, os quais evidenciaram o predomínio do íon bicarbonato em todas as nascentes e revelaram padrões distintos do tipo químico entre as diferentes litologias. Em geral, as águas associadas à Suíte Borrachudos apresentaram características Bicarbonatadas-Sódicas, enquanto aquelas inseridas no Grupo Nova Lima tenderam ao tipo Bicarbonatado-Magnésiano. O Complexo Guanhães mostrou variação significativa entre suas nascentes, e o Grupo Piracicaba apresentou composição iônica Mista Bicarbonatada-Cálcica-Magnésiana. A análise estatística multivariada, utilizando distância euclidiana e método de *Ward*, permitiu identificar agrupamentos de amostras com maior semelhança química e indicou tendências de associação entre a composição da água subterrânea e a litologia, embora nem sempre de forma direta. A comparação com os valores máximos permitidos da Resolução CONAMA nº 396/2008 demonstrou que a maioria dos parâmetros estão dentro dos limites estabelecidos para diversos usos, exceto em alguns casos pontuais envolvendo ferro, manganês, alumínio e coliformes termotolerantes. Como o estudo considerou apenas uma campanha de amostragem, sugere-se a implementação de um programa de monitoramento sistemático das nascentes estudadas o que permitirá acompanhar a evolução ao longo do tempo no que tange a qualidade dessas águas.

Palavras-chaves: Água subterrânea; Diagrama de Stiff; Diagrama de Piper; Análise estatística multivariada.

ABSTRACT

Water scarcity has become a recurrent challenge for the public water supply system in the municipality of Itabira, Minas Gerais state. In this context, water sources play a strategic role, serving a natural groundwater base flow discharge and contribute directly to the local water supply. The groundwater quality allows to determine the most appropriate usage for each water source. Thus, it became necessary to evaluate water quality and hydrochemically characterise 21 groundwater point sources in the Itabira municipality. For this purpose, fieldwork physical-chemical data and analytical chemical data from the laboratory were used. They were subsequently validated by ion balance and evaluation of samples in duplicate. The water sources were georeferenced on the regional geologic map, allowing their correlation with the main local geologic units: *Suíte Borrachudos*, *Grupo Piracicaba*, *Grupo Nova Lima* and *Complexo Guanhães*. The hydrochemical characterisation was carried out using Piper and Stiff diagrams, which highlighted the prevalence of bicarbonate ion across the water sources and revealed distinct chemical patterns among different lithologies. In general, the groundwater related to the *Suíte Borrachudos* presented Sodium-Bicarbonate features, while those the *Grupo Nova Lima* tended to be the Magnesium-Bicarbonate type. The *Complexo Guanhães* showed significant variation in their water sources, and *Grupo Piracicaba* presented a mixed ion composition of Calcium, Magnesium and Bicarbonate. Using Euclidean distance and the *Ward* method, the multivariate statistical analysis identified groups of groundwater samples with greater chemical similarity. It also indicated association trends between water composition and lithology, although not always directly. Comparison with the maximum permitted values of the CONAMA nº 396/2008 resolution shows that most parameters are within the established limits for various uses, except in a few specific cases involving iron, manganese, aluminium and thermotolerant coliforms. As the study considered only one sampling campaign, it is recommended that a systematic monitoring programme to be implemented for the study water sources, which will allow to track the evolution of groundwater quality over time.

Keywords: Groundwater; Stiff diagram; Piper diagram; Multivariate statistical analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa de localização e acesso da área de estudo.....	17
Figura 2 - Carta geológica simplificada da região de Itabira.	19
Figura 3 - Mapa de localização das nascentes na área de estudo.	21
Figura 4- Correlação entre os cálculos das somas de cátions e ânions.	26
Figura 5- Pontos de nascentes sobre carta geológica simplificada da região de Itabira.....	28
Figura 6- Valores da Temperatura do ar e da amostra.	29
Figura 7- Valores de pH, agrupados entre as diferentes unidades geológicas.	30
Figura 8- Valores da Condutividade Elétrica, agrupados entre as diferentes unidades geológicas	31
Figura 9- Valores do Potencial Redox, agrupados entre as diferentes unidades geológicas	32
Figura 10- Valores do Oxigênio Dissolvido, agrupados entre as diferentes unidades geológicas.....	32
Figura 11- Valores de Turbidez, agrupados entre as diferentes unidades geológicas.....	33
Figura 12- Classificação hidroquímica das águas de acordo com diagrama de <i>Piper</i>	35
Figura 13- Diagramas de <i>Stiff</i> plotados sobre mapa geológico simplificado.	38
Figura 14- Matriz de calor das distâncias euclidianas entre as amostras das nascentes.....	42
Figura 15- Dendrograma dos dados hidroquímicos das amostras das nascentes.	43
Figura 16- Concentração de Alumínio.....	49
Figura 17- Concentração de Ferro.	50
Figura 18- Concentração de Manganês.	51
Figura 19- Coliformes Termotolerantes.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Critérios de aceitação para balanço iônico.	22
Tabela 2- Controle de qualidade dos resultados laboratoriais – balanço iônico.....	25
Tabela 3- Avaliação do resultado laboratorial da amostra em duplicata.	26
Tabela 4- Parâmetros utilizados na classificação hidroquímica das águas das nascentes.	34
Tabela 5- Resumo estatístico das distâncias euclidianas entre as amostras das nascentes.	39
Tabela 6- Resumo estatístico das distâncias euclidianas entre as amostras das nascentes pertencentes às rochas metagraníticas da Suíte Borrachudos.....	41
Tabela 7- Resumo estatístico das distâncias euclidianas entre as amostras das nascentes pertencentes às rochas xistosas do Grupo Nova Lima.	41
Tabela 8- Resumo estatístico das distâncias euclidianas entre as amostras das nascentes pertencentes às rochas gnáissicas bandadas e quartzíticas do Complexo Guanhães.....	42
Tabela 9- Resultados analíticos e VMP de referência (CONAMA nº 396/2008).	47
Tabela 10- Resultados analíticos e VMP de referência (CONAMA nº 396/2008).	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al - Alumínio

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

APHA - *American Public Health Association*

Ca²⁺ - Cálcio

Cl⁻ - Cloreto

C.E. - Condutividade Elétrica

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

C.T. - Coliformes termotolerantes

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

FUNASA - Fundação Nacional de Saúde

HCO₃⁻ - Bicarbonato

K⁺ - Potássio

LQ - Limite de Quantificação

Mg²⁺ -Magnésio

Na⁺ - Sódio

NAS - Nascente

OD - Oxigênio Dissolvido

ORP - Potencial oxirredução

pH - Potencial hidrogeniônico

SDT - Sólidos Dissolvidos Totais

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SO₄⁻ - Sulfato

TAC - Alcalinidade Total

VMP - Valor Máximo Permitido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 OBJETIVO GERAL	13
2.1 Objetivos específicos.....	13
3 REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1 Ciclo hidrológico.....	14
3.2 Qualidade da água subterrânea e critérios legais	14
3.3 Hidroquímica da água subterrânea	15
3.4 Análise estatística multivariada.....	15
4 METODOLOGIA	17
4.1 Localização e acesso.....	17
4.2 Contexto geológico da área de estudo.....	18
4.3 Amostragem hidroquímica de nascentes.....	20
4.4 Associação das nascentes ao contexto geológico.....	21
4.5 Tratamento e validação dos dados hidroquímicos	22
4.6 Análises gráficas e estatística multivariada dos dados hidroquímicos.....	23
4.7 Comparação com os valores máximos permitidos (VMP).....	24
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
5.1 Controle de qualidade - Balanço iônico e duplicatas	25
5.2 Relação das nascentes com as unidades litológicas.....	27
5.3 Classificação hidroquímica da água	29
5.4 Análise multivariada dos dados hidroquímicos.....	39
5.5 Comparação com os valores máximos permitidos	46
6 CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A escassez hídrica tem se consolidado como um desafio recorrente para o sistema de abastecimento público de Itabira, município situado na porção central de Minas Gerais, fato frequentemente relatado pela imprensa local. Esse cenário resulta de uma combinação de fatores, entre os quais destacam os longos períodos de estiagem, o crescimento urbano acelerado e a intensificação de atividades industriais.

Nesse contexto, as nascentes assumem papel estratégico, uma vez que representam pontos naturais de descarga dos aquíferos e podem contribuir diretamente para oferta hídrica local. A avaliação da qualidade dessas águas permite determinar os usos mais adequados para cada manancial, em consonância com as diretrizes da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) n° 396 de abril de 2008 (Brasil, 2008).

De acordo com Hamma *et al.* (2024) a qualidade da água subterrânea é determinada por uma combinação de fatores, entre os quais se destacam a composição química da água infiltrada, as características geológicas do aquífero, as áreas de recarga e circulação, além das interferências decorrentes de atividades antrópicas.

Os estudos de caracterização hidroquímica constituem ferramenta fundamental para a compreensão do comportamento das águas e sua qualidade. Sua aplicação é amplamente reconhecida em diferentes contextos, incluindo o monitoramento de poluição e potabilidade, análise das relações entre composição da água e rochas, o planejamento e a execução de obras de engenharia (como túneis e barragens), além da elaboração de mapas hidroquímicos em projetos governamentais, entre outras finalidades (Szikszay, 1993).

Ao longo dos anos, vários métodos foram desenvolvidos para caracterização hidroquímica, que permitem a classificação das águas tanto individualmente quanto a partir de um conjunto de dados (Santos, 2008). Dentre eles, as representações gráficas são ferramentas classicamente empregadas e amplamente difundidas na área (e.g., Piper, 1944; Stiff, 1951; Custódio e Llamas, 1996). Em paralelo às classificações tradicionais, a análise estatística multivariada tem sido comumente empregada em estudos hidroquímicos recentes (eg., Ribeiro, 2020; Barbosa *et al.*, 2023; Barbosa, 2024 e Hamma *et al.*, 2024).

O estudo busca caracterizar a hidroquímica e a qualidade das águas de 21 nascentes localizadas na região de Itabira (MG), predominantemente situadas a montante de estruturas de mineração, sem influência direta dessas atividades, e distribuídas em diferentes unidades aquíferas local. O estudo baseou-se em análises hidroquímicas, com apoio de estatística multivariada e correlação dos resultados com a legislação vigente.

2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo caracterizar a hidroquímica e a qualidade das águas subterrâneas provenientes de nascentes da região de Itabira, com ênfase na aplicação de análise estatística multivariada de agrupamento, a fim de verificar possíveis correlações entre os tipos hidroquímicos e as unidades geológicas locais.

2.1 Objetivos específicos

- Relacionar as nascentes às unidades litológicas da área por meio do georreferenciamento de carta geológica;
- Classificar as águas quanto ao tipo químico dominante com base em diagramas hidroquímicos;
- Aplicar a análise estatística multivariada de agrupamento, com intuito de identificar similaridades entre as amostras e atestar eventuais relações entre os grupos hidroquímicos formados e os contextos geológicos correspondentes;
- Comparar os resultados analíticos com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA n.º 396/2008, a fim de avaliar a adequação da água para diferentes usos, como consumo humano, dessedentação animal, irrigação e recreação.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Os conceitos fundamentais que serviram de alicerce para compreensão deste estudo são abordados a seguir. Estes conceitos teóricos abrangem a dinâmica do ciclo hidrológico, à qualidade da água, os fundamentos da hidroquímica e a aplicação da análise estatística multivariada.

3.1 Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico, também conhecido como ciclo da água, representa a dinâmica contínua da água no sistema terrestre, envolvendo os processos de circulação entre os compartimentos atmosférico, superficial e subterrâneo. Essa circulação é impulsionada principalmente pela energia solar e pela gravidade, que controlam os fenômenos de evaporação, precipitação, infiltração e escoamento (Silveira, 2001; Brasil, 2015).

A infiltração da água precipitada constitui o principal mecanismo de recarga dos aquíferos, alimentando o lençol freático e dando origem a fluxos subterrâneos (Collischonn; Dornelles, 2015). As nascentes, por sua vez, são pontos onde a água subterrânea aflora naturalmente à superfície, dando origem a cursos d'água e outros corpos hídricos (Hirata *et al.*, 2019).

3.2 Qualidade da água subterrânea e critérios legais

A Resolução CONAMA n.º 396, de 3 de abril de 2008, estabelece as diretrizes para o enquadramento das águas subterrâneas no Brasil, definindo padrões de qualidade com base em seus usos preponderantes, como abastecimento humano, irrigação, recreação e dessedentação animal. Essa norma determina os valores máximos permitidos (VMP) para diversos parâmetros físico-químicos e microbiológicos, sendo referência fundamental para a avaliação da potabilidade e da segurança ambiental das águas subterrâneas (Brasil, 2008). Tais limites foram utilizados como referência para avaliação e comparação da água das nascentes estudadas, conforme descrito na seção de metodologia.

Neste contexto, a qualidade da água subterrânea é avaliada por meio de parâmetros como pH, turbidez, condutividade elétrica, temperatura, alcalinidade, além da concentração de constituintes maiores, menores e traços, os quais são amplamente utilizados para determinar a adequação da água a diferentes finalidades, conforme discutido por Mendonça *et al.* 2019.

3.3 Hidroquímica da água subterrânea

A composição química da água subterrânea, conforme destaca Oliveira (2009), é fortemente influenciada pelas características geológicas dos aquíferos, especialmente pelos minerais presentes nas rochas com os quais a água interage ao longo do tempo. Fatores como dissolução mineral, a troca iônica, o tempo de permanência da água no aquífero antes de emergir na superfície e as condições físico-químicas do meio controlam a evolução hidrogeoquímica das águas subterrâneas (Leite *et al.*, 2021).

Segundo Hounslow (1995), a análise dos íons dissolvidos na água permite inferir a origem litológica, uma vez que determinadas associações químicas refletem padrões específicos de interação água-rocha. Ainda baseado em Hounslow (1995), razões entre certos constituintes podem indicar os tipos de rochas com os quais a água subterrânea esteve em contato. Já Custódio e Llamas (1983 *apud* Santos, 2008, p. 326), classificam os constituintes dissolvidos na água em maiores, menores e traços, com base em suas concentrações, o que auxilia para a interpretação da composição hidrogeoquímica da água.

A interpretação gráfica, por meio de diagramas, é ferramenta essencial nos estudos hidroquímicos. O diagrama de Piper (1944), por exemplo, é um recurso clássico para classificar as águas com base nos principais cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$) e ânions (HCO_3^{-} , SO_4^{2-} , Cl^{-} , NO_3^{-}), facilitando a identificação de tipos hidroquímicos dominantes. Seu uso permanece atual, como demonstrado por Paula *et al.* (2018) e Ribeiro (2020), que aplicaram o diagrama de Piper para caracterizar grupos hidroquímicos em diferentes contextos aquíferos.

Outro recurso gráfico é o diagrama de Stiff (1951), posteriormente modificado por Custódio e Llamas (1996), que permite uma visualização direta da concentração dos principais íons, por meio de polígonos formados com dados expressos em miliequivalentes por litro (meq L^{-1}). Esse tipo de representação é especialmente útil para comparar amostras e observar diferenças que podem estar relacionadas à geologia local ou processos hidroquímicos envolvidos em sua formação (Gastmans, 2007). O uso desse diagrama também é exemplificado por Gómez (2020) em estudo mais recente, que aplicou os diagramas de Stiff na representação de diferentes tipos de águas.

3.4 Análise estatística multivariada

De acordo com Hair *et al.* (2009), a análise estatística multivariada consiste em um conjunto de métodos aplicados a dados que apresentam múltiplas variáveis observadas

simultaneamente para cada unidade amostral. Essa abordagem possibilita explorar, de maneira integrada, padrões e relações existentes no conjunto de dados, a qual especialmente útil quando o objetivo é identificar grupos com características semelhantes.

Monteiro *et al.* (2010) destacam que a análise de agrupamento hierárquico é amplamente utilizada nas geociências, por permitir a classificação de amostras em grupos de acordo com seu grau de similaridade. Tal metodologia também tem sido aplicada em estudos recentes em hidroquímica e qualidade da água (Barbosa *et al.*, 2023; Barbosa, 2024 e Hamma *et al.*, 2024), reforçando sua relevância para interpretação de dados ambientais complexos.

Entre as medidas de dissimilaridade, a distância euclidiana é uma das mais empregadas em dados quantitativos, pois expressa a separação geométrica entre amostras em um espaço multidimensional (Hair *et al.*, 2009). A distância entre duas amostras A e B, considerando n variáveis, é calculada de acordo com a Equação (1):

$$d_{AB} = \sqrt{(x_{A1} - x_{B1})^2 + (x_{A2} - x_{B2})^2 + (x_{A3} - x_{B3})^2 + \dots + (x_{An} - x_{Bn})^2} \quad (1)$$

Onde: d_{AB} = distância entre as amostras A e B, x_{Ai} o valor da variável i na amostra A, x_{Bi} o valor da variável i na amostra B e n o número total de variáveis.

Quando as variáveis possuem diferentes escalas ou unidades de medida, Hair *et al.* (2009) destacam a necessidade da padronização para evitar que variáveis de maior magnitude exerçam influência desproporcional. O método mais empregado é o (modo z), que transforma cada variável em valores com média zero e desvio-padrão unitário (Equação 2), assegurando peso equivalente no cálculo das distâncias (Monteiro *et al.*, 2010).

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (2)$$

Onde: z_i é o valor que se deseja padronizar, $\bar{x}$ a média aritmética da distribuição e σ o desvio padrão.

Entre os métodos aglomerativos, destaca-se o método de *Ward*, que utiliza o critério da mínima variância para formar grupos mais homogêneos e equilibrados (Hair *et al.*, 2009). Monteiro *et al.* (2010) demonstram a eficiência do método no contexto das geociências, ao passo que estudos recentes em hidroquímica (Barbosa *et al.*, 2023; Barbosa, 2024; Hamma *et al.*, 2024) corroboram sua aplicabilidade, especialmente quando associado à distância euclidiana, permitindo a identificação clara de hierarquias entre as amostras por meio de dendrogramas.

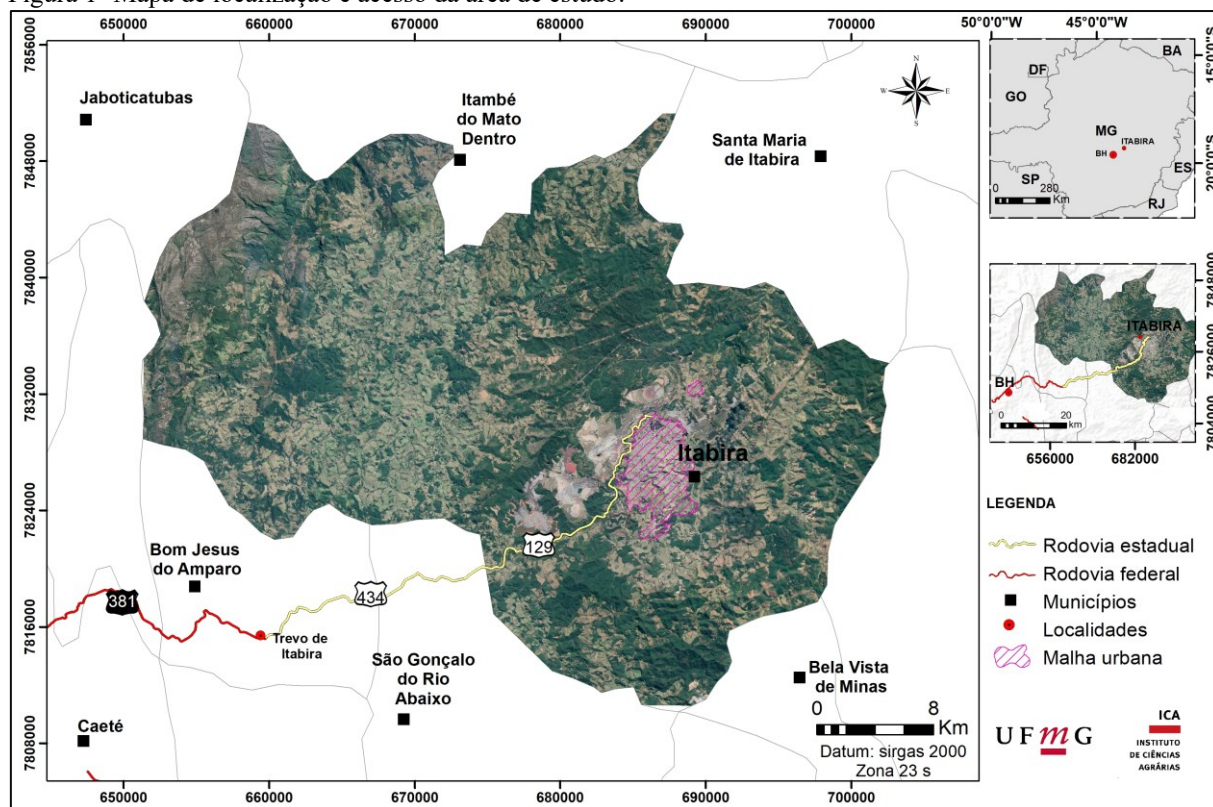
4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os procedimentos adotados para caracterização da água de nascentes, que constitui o foco deste estudo, fundamentado em uma abordagem de pesquisa descritiva. São descritas as etapas metodológicas, incluindo localização e acesso da área de estudo, contexto geológico, coleta de amostra d'água, os métodos analíticos laboratoriais, o georreferenciamento dos pontos de nascentes em carta geológica e o tratamento dos dados hidroquímicos.

4.1 Localização e acesso

A área de estudo está situada no município de Itabira, a nordeste da capital mineira, Belo Horizonte. A região de interesse abrange principalmente a zona periurbana do município. O acesso, partindo de Belo Horizonte, é feito pela rodovia BR-381, percorrendo cerca de 60 km até o trevo de Itabira. A partir desse ponto, segue-se aproximadamente 40 km pelas rodovias MG-434 e MG-129 até a sede do município (Figura 1).

Figura 1- Mapa de localização e acesso da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados do IBGE (2022), 2025.

4.2 Contexto geológico da área de estudo

A área de estudo está situada no extremo nordeste do Quadrilátero Ferrífero (QF), uma região marcada pela expressiva produção de minério de ferro, especialmente em depósitos associados às formações ferríferas da Formação Cauê (Dorr, 1969). Esses depósitos ocorrem ao longo do Sinclínório de Itabira, estrutura com orientação Nordeste-Sudoeste composta por dobramentos anticlinais e sinclinais (Rossi, 2019).

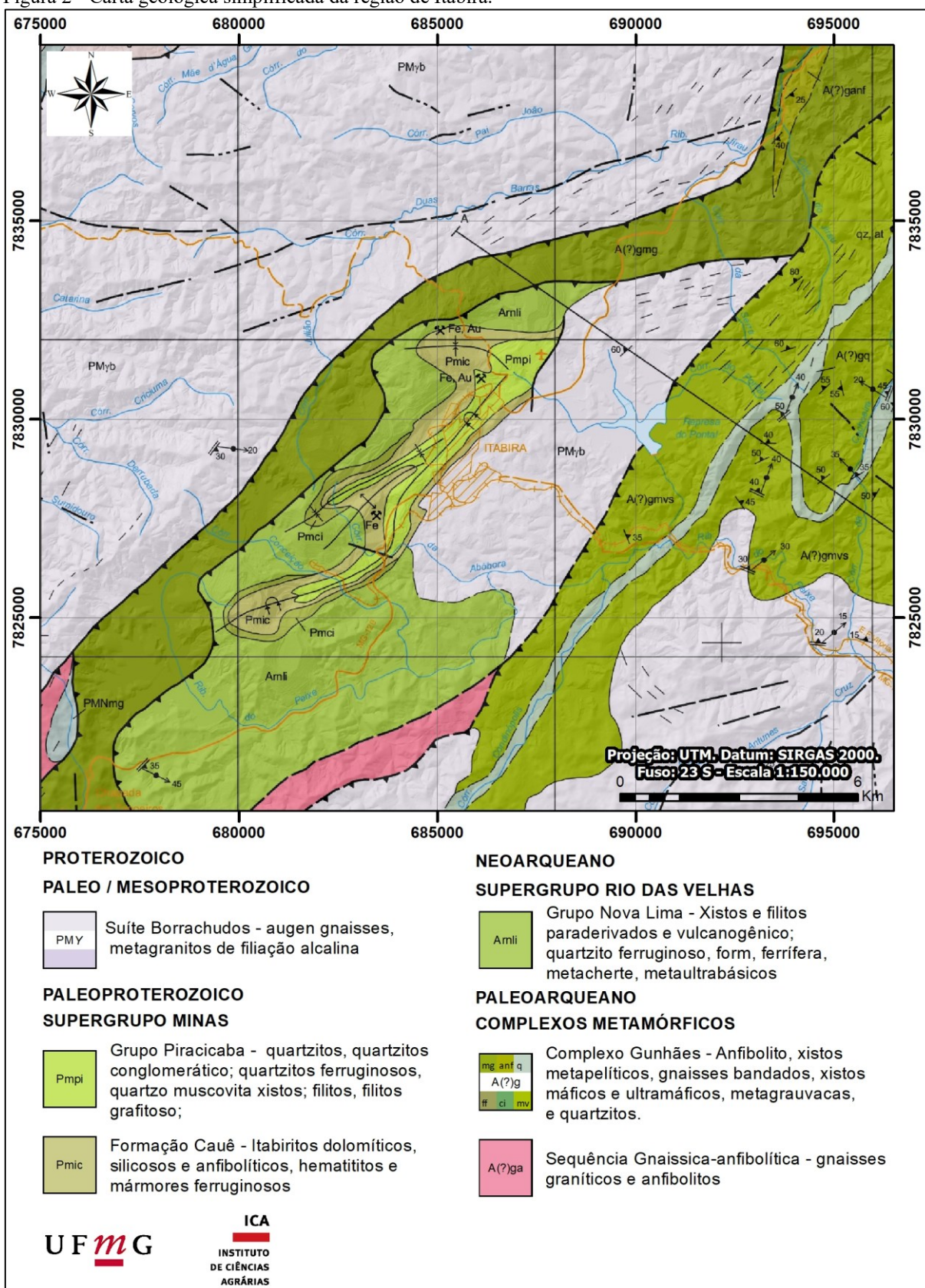
O mapa geológico utilizado neste estudo baseia-se na folha de Itabira, elaborada pela CPRM (Padilha; Vieira; Heineck, 2000), em escala de 1:100.000 (Figura 2), complementado pelo mapa de Endo *et al.* (2019), em escala 1:125:000. A área é composta por unidades geológicas que variam do Arqueano ao Cenozoico, descritas a seguir da base para o topo:

- Sequência Gnáissica-anfibolítica: alternância quase rítmica de faixas de gnaisses graníticos, anfibolitos e quartzitos, com espessuras entre decâmetros e hectômetros.
- Complexo Guanhães: sequência metavulcano-sedimentar com gnaisses bandados, anfibolitos, quartzitos, xistos e metagrauvacas.
- Supergrupo Rio das Velhas – Grupo Nova Lima: domínio vulcano-sedimentar com filitos, xistos, quartzitos, metacherte, metaultrabásicas e formações ferríferas.
- Supergrupo Minas - **Grupo Caraça**: quartzitos, metaconglomerados, filitos sericíticos e metacherte; **Grupo Itabira**: Formação Cauê, composta por itabiritos silicosos, dolomíticos, anfibolíticos e hematíticos, além de filitos ferruginosos e mármore e **Grupo Piracicaba**: quartzitos, metaconglomerados, filitos e xistos.
- Suíte Borrachudos: unidade litodêmica, constituída por metagranitos, metasienogranitos, augen gnaisses e biotita granitos.

Segundo Endo *et al.* (2019), ocorrem na região ainda duas suítes intrusivas Santa Rita e Catas Altas de Noruega, além de uma unidade de coberturas recentes:

- Suítes Santa Rita e Catas Altas da Noruega: unidades litodêmicas intrusivas compostas por rochas metaultramáficas e,
- Coberturas: cangas lateríticas, depósitos coluvionares, aluvionares e terraços.

Figura 2 - Carta geológica simplificada da região de Itabira.



Fonte: Modificado de CPRM (Padilha; Vieira; Heineck, 2000).

4.3 Amostragem hidroquímica de nascentes

Foram utilizados dados de amostragem hidroquímica obtidos em 21 nascentes da área de estudo (Figura 3). As campanhas de coleta de amostra foram realizadas nos meses de agosto e setembro de 2024 por equipe técnica especializada, seguindo os procedimentos descritos na norma ABNT NBR 9898:1987 e nas diretrizes estabelecidas pela Cetesb e a ANA (2023).

As nascentes analisadas já estavam previamente cadastradas, adotando a nomenclatura no padrão NAS_, seguida de numeração e prefixo IT. Ressalta-se que a numeração não é sequencial, pois reflete o cadastro original dos pontos, e não a ordem de amostragem.

Durante as campanhas de amostragem, foram registrados em campo os seguintes parâmetros físico-químicos: potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (C.E.), turbidez, temperatura da amostra e potencial de oxirredução (ORP). Os demais parâmetros foram determinados por meio de análises laboratoriais, conforme detalhado no Quadro 1, que apresenta os métodos analíticos de bancada utilizados para a determinação dos constituintes maiores, menores e metais traço.

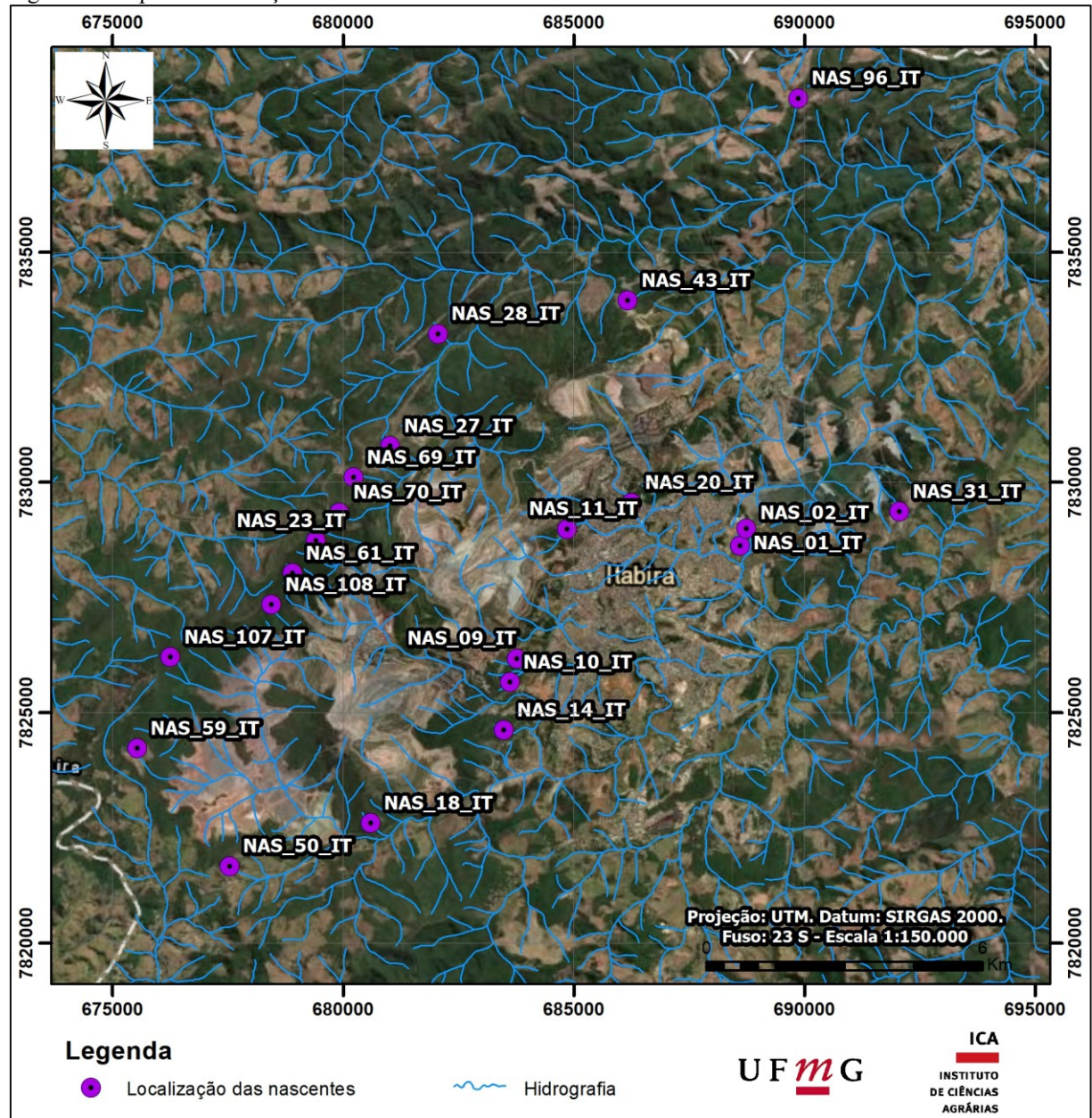
Quadro 1 - Métodos analíticos de laboratório.

Método de análise	Parâmetros analisados
SM2320	Alcalinidade bicarbonatos, Alcalinidade carbonatos, Alcalinidade hidróxidos e Alcalinidade total
SM 3125B	Antimônio dissolvido, Antimônio total, Arsênio dissolvido, Arsênio total, Mercúrio dissolvido, Mercúrio total, Selênio dissolvido, Selênio total
POP AMB 116	Brometo, Cloreto, Fluoreto, Nitrato, Nitrito (como N), Ortofosfato e Sulfato
SM 4500-NH3-B	Amônia e Nitrogênio Amoniacal
ISO 14403-2	Cianeto Livre
SM 2120-C	Cor verdadeira
SM 3500FE-B	Ferro II e Ferro III
SM 4500-P-E	Fósforo
SM 4500	Sílica dissolvido e Sílica total
13796	Nitrogênio Total
112/01	Sulfetos como H ₂ S não dissociado
SM 2540-C	Sólidos dissolvidos totais
SM 2540-F	Sólidos sedimentáveis
SM2540-D	Sólidos suspensos totais
SM 2540-B	Sólidos Totais
SM 3120	Alumínio, Bário, Berílio total, Boro, Cádmio, Cálcio, Chumbo, Cobalto, Cobre dissolvido, Cobre total, Cromo, Estrôncio, Ferro, Lítio, Magnésio, Manganês, Molibdênio, Níquel, Potássio, Prata, Sódio, Vanádio e Zinco

Fonte: (Autor, 2025) com base nos dados do certificado laboratorial da SGS GEOSOL.

Ressalta-se que, embora o autor não tenha participado diretamente da etapa de coleta, a análise dos dados brutos foi realizada com base nos certificados laboratoriais disponibilizados, os quais foram avaliados e considerados adequados aos objetivos do estudo.

Figura 3 - Mapa de localização das nascentes na área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados do IBGE (2022), 2025.

4.4 Associação das nascentes ao contexto geológico

Para identificação das unidades litológicas associadas às nascentes, foi realizado o georreferenciamento dos pontos amostrados sobre a carta geológica da CPRM (Padilha; Vieira e Heineck, 2000), que apresenta maior nível de detalhamento para a área estudada. Esta etapa

foi realizada utilizando o *software* ArcMap na versão 10.8 (Esri, 2020), por meio da importação da carta geológica em formato *raster*¹, a qual foi georreferenciada com base em coordenadas de controle. Em seguida, os pontos de nascente, disponíveis em formato *shapefile* (.shp), foram inseridos em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), que permitiu a definição da unidade geológica correspondente a cada nascente sobre o mapa geológico de superfície.

4.5 Tratamento e validação dos dados hidroquímicos

Antes do cálculo do balanço iônico, os parâmetros com concentrações inferiores ao Limite de Quantificação (LQ) foram ajustados, adotando-se metade do respectivo valor, conforme prática comum em estudos hidroquímicos (Vieira; Velásquez; Borba, 2020; Barbosa, 2024). Como forma de padronizar os dados, os valores das concentrações em miligramas por litros (mg L⁻¹) foram convertidos para miliequivalentes por litro (meq L⁻¹).

Em seguida, procedeu-se ao cálculo do balanço iônico, conforme os critérios da *American Public Health Association* (APHA, 2023), utilizando a Equação (3), com todas as concentrações expressas em miliequivalentes por litro (meq L⁻¹):

$$\% \text{ diferença} = 100 \times \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} \quad (3)$$

Os critérios de aceitação encontram-se descritos na Tabela 1.

Tabela 1- Critérios de aceitação para balanço iônico.

$\sum \text{ânion meq L}^{-1}$	Diferença aceitável
0 - 3,0	$\pm 0,2 \text{ (meq L}^{-1}\text{)}$
3,0 - 10,0	$\pm 2\%$
10,0 – 800	5%

Fonte: APHA (2023).

Ainda como critério de validação dos resultados, as amostras em duplicata foram avaliadas como forma de verificar a precisão e repetitividade das análises, por meio da comparação entre duas amostras (A1 e A2) obtidas no mesmo ponto. A variação entre os resultados foi expressa pela diferença percentual relativa (DPR), calculado conforme a Equação (4), descrita por Cetesb e a ANA (2023).

¹ Formato de imagem formada por pixels, onde cada pixel possui um valor digital.

$$DPR = \left(\frac{A1 - A2}{\frac{A1 + A2}{2}} \right) * 100 \quad (4)$$

Devido à sensibilidade do DPR à magnitude dos valores, concentrações baixas, menores que o limite de quantificação não foram avaliadas. Para as demais amostras, adotou-se um valor máximo de 20% como critério de aceitação, conforme diretrizes nacionais e internacionais, citadas por Cetesb e a ANA (2023).

4.6 Análises gráficas e estatística multivariada dos dados hidroquímicos

As análises gráficas foram realizadas com o objetivo de facilitar a interpretação visual dos resultados. Foram elaborados gráficos para os parâmetros físico-químicos medidos em campo (Temperatura do ar e da água, pH, Condutividade elétrica, Potencial redox, Oxigênio dissolvido e Turbidez). Esses gráficos, gerados no software Microsoft Excel, possibilitaram uma avaliação integrada entre as 21 nascentes analisadas.

Além disso, foram elaborados diagramas específicos para a caracterização hidroquímica. O diagrama de *Piper* (1944) foi construído a partir de um *template* automatizado em Excel, amplamente utilizado em estudos hidroquímicos para classificação da água com base na dominância iônica. Foram inseridos dados de pH, condutividade elétrica (C.E.), alcalinidade total (mg L^{-1}), sólidos dissolvidos totais, bem como as concentrações, em miliequivalentes por litro (meq L^{-1}), dos íons Bicarbonato (HCO_3^-), Sulfato (SO_4^{2-}), Cloreto (Cl^-), Nitrato (NO_3^-), Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}), Sódio (Na^+) e Potássio (K^+).

Complementarmente, foram elaborados diagramas de Stiff (1951), conforme a modificação de Custódio e Llamas (1996), utilizando valores em miliequivalentes por litro (meq L^{-1}) dos principais cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$) e ânions (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-). Os diagramas foram construídos no software *AutoCAD* (Autodesk, 2020) e, posteriormente, plotados sobre a base cartográfica da área de estudo em ambiente SIG, utilizando-se o *ArcMap* 10.5 (Esri, 2020). Essa etapa permitiu a visualização espacial dos padrões e das diferentes classes hidroquímicas associadas às nascentes.

Por fim, a análise estatística multivariada foi realizada no software *R*, utilizando-se concentrações hidroquímicas das 21 nascentes. Os constituintes maiores foram convertidos para fração iônica (meq L^{-1}), a fim de padronizar a comparação entre as amostras. Foram considerados os íons de HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ e NO_3^- , além dos valores de

Sólidos dissolvidos totais, Alcalinidade total, pH e Condutividade elétrica.

Para o cálculo das dissimilaridades, empregou-se a distância euclidiana e, em seguida, aplicou-se o método de *Ward* para agrupamento hierárquico. Como produto da análise, foram obtidas a matriz de distância e o dendrograma, que constitui as principais interpretações estáticas desenvolvidas no presente estudo.

As nascentes já se encontravam previamente associadas às respectivas unidades litológicas, a partir do georreferenciamento em carta geológica, o que possibilitou a avaliação integrada entre os agrupamentos hidroquímicos e o contexto geológico local.

4.7 Comparação com os valores máximos permitidos (VMP)

Adicionalmente, os dados analíticos foram organizados em planilha e comparados aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA n.º 396/2008, que dispõe sobre a classificação das águas subterrâneas e diretrizes ambientais para seu enquadramento no país (Brasil, 2008). Os resultados foram plotados em gráficos, a comparação visou avaliar a adequação da água para múltiplos usos, tais sejam, o consumo humano, dessedentação animal, irrigação e atividades recreativas, permitindo a identificação das inconformidades de forma integrada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Controle de qualidade - Balanço iônico e duplicatas

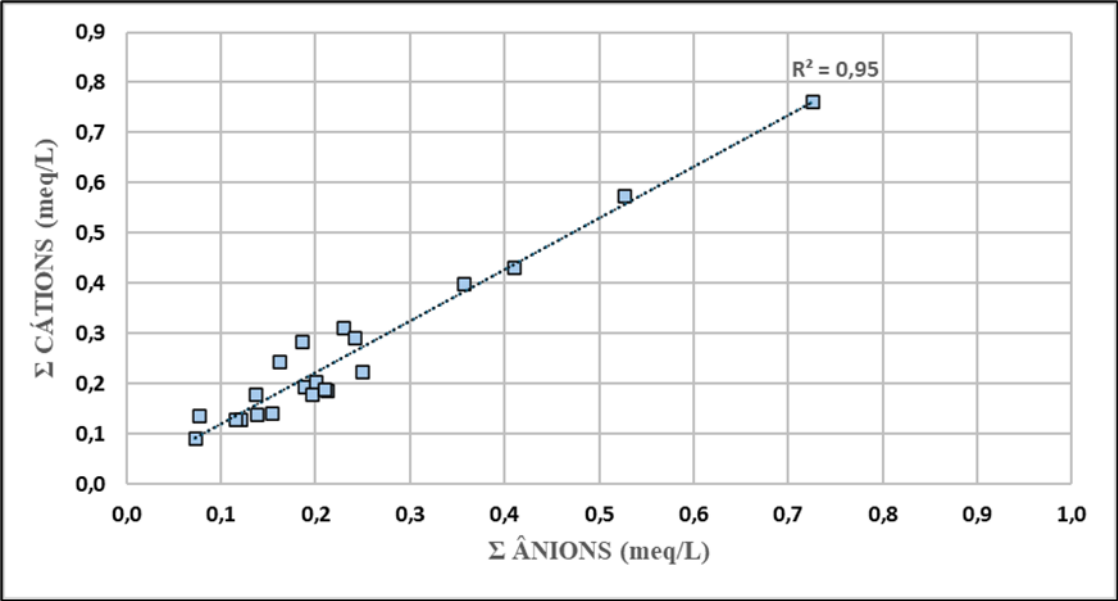
O balanço iônico realizado das 24 amostras, incluindo 21 pontos de coleta e 3 duplicatas, permitiu a validação dos resultados analíticos. Todas apresentaram erros dentro do limite estabelecido pela APHA (2023), de $\pm 0,2$ meq L⁻¹, o que evidencia a qualidade das análises (Tabela 2). A boa correlação entre cátions e ânions ($R^2 = 0,95$) reforça a consistência e confiabilidade dos resultados (Figura 4).

Tabela 2- Controle de qualidade dos resultados laboratoriais – balanço iônico.

Amostra	Σ Cátions principais (meq L ⁻¹)	Σ Ânions principais (meq L ⁻¹)	Diferença (meq L ⁻¹)	Limite aceitável (meq L ⁻¹)
NAS_01_IT	0,1924	0,1885	0,004	$\pm 0,2$
NAS_02_IT	0,1768	0,1965	0,020	$\pm 0,2$
NAS_09_IT	0,4301	0,4110	0,019	$\pm 0,2$
NAS_09_IT (DUP)	0,4299	0,4124	0,017	$\pm 0,2$
NAS_10_IT	0,5733	0,5275	0,046	$\pm 0,2$
NAS_11_IT	0,7617	0,7265	0,035	$\pm 0,2$
NAS_14_IT	0,1848	0,2132	0,028	$\pm 0,2$
NAS_18_IT	0,3097	0,2294	0,080	$\pm 0,2$
NAS_20_IT	0,2025	0,2013	0,001	$\pm 0,2$
NAS_23_IT	0,1267	0,1211	0,006	$\pm 0,2$
NAS_27_IT	0,2914	0,2421	0,049	$\pm 0,2$
NAS_28_IT	0,2429	0,1623	0,081	$\pm 0,2$
NAS_31_IT	0,0913	0,0730	0,018	$\pm 0,2$
NAS_31_IT (DUP)	0,0875	0,0727	0,015	$\pm 0,2$
NAS_43_IT	0,3982	0,3573	0,041	$\pm 0,2$
NAS_50_IT	0,1866	0,2096	0,023	$\pm 0,2$
NAS_59_IT	0,1282	0,1153	0,013	$\pm 0,2$
NAS_59_IT (DUP)	0,1352	0,1125	0,023	$\pm 0,2$
NAS_61_IT	0,1355	0,0769	0,059	$\pm 0,2$
NAS_69_IT	0,1409	0,1540	0,013	$\pm 0,2$
NAS_70_IT	0,1789	0,1370	0,042	$\pm 0,2$
NAS_96_IT	0,1385	0,1382	0,0003	$\pm 0,2$
NAS_107_IT	0,2222	0,2499	0,028	$\pm 0,2$
NAS_108_IT	0,2837	0,1856	0,098	$\pm 0,2$

Fonte: Autor, 2025.

Figura 4- Correlação entre os cálculos das somas de cátions e ânions.



Fonte: Autor, 2025.

Vale ressaltar que o critério de erro adotado, com base na *American Public Health Association* (APHA), é amplamente reconhecido na literatura recente para validação do balanço iônico, conforme aplicado por Hamma *et al.* (2024). Outros autores, como Logan (1965) e Custódio e Llamas (1983 *apud* Santos, 2008), empregaram métodos distintos para essa verificação, mas também convergem quanto ao objetivo de garantir a confiabilidade dos resultados.

Ainda como parte da validação dos resultados, como forma de verificar a precisão e repetitividade dos procedimentos de coleta, foram consideradas três amostras em duplicata das nascentes: NAS_09_IT, NAS_31_IT e NAS_59_IT. O cálculo da diferença percentual relativa (DPR) foi realizado conforme a formulação descrita na seção anterior (Equação 4) (Cetesb; ANA, 2023).

De modo geral, os valores obtidos ficaram abaixo de 20%, limite adotado como aceitável pela Cetesb e ANA (2023). A única exceção foi observada no parâmetro Nitrogênio total (Tabela 3), referente ao par de amostras da NAS_09_IT, que apresentou DPR superior a 20%. Em razão disso, esse par de resultados foi desconsiderado nas etapas subsequentes.

Tabela 3- Avaliação do resultado laboratorial da amostra em duplicata.

Parâmetro	Unidade	Limite de quantificação	NAS_09_IT		DPR
			Amostra	Duplicata	
Nitrogênio Total	mg L ⁻¹	0,05	0,41	0,26	45%

Fonte: Autor, 2025.

5.2 Relação das nascentes com as unidades litológicas

As nascentes avaliadas foram georreferenciadas sobre a carta geológica da CPRM (Padilha; Vieira; Heineck, 2000) (Figura 5 e Quadro 2), permitindo a identificação das unidades litológicas associadas a cada ponto de surgência. De maneira geral, a distribuição observada foi: Suíte Borrachudos – 13 nascentes, associadas a metagranitos de filiação alcalina; Grupo Nova Lima – 5 nascentes, em xistos de origem vulcanogênica; Complexo Guanhães – 2 nascentes, localizadas em gnaisses bandados e quartzitos; e Grupo Piracicaba – 1 nascente, sobre quartzitos.

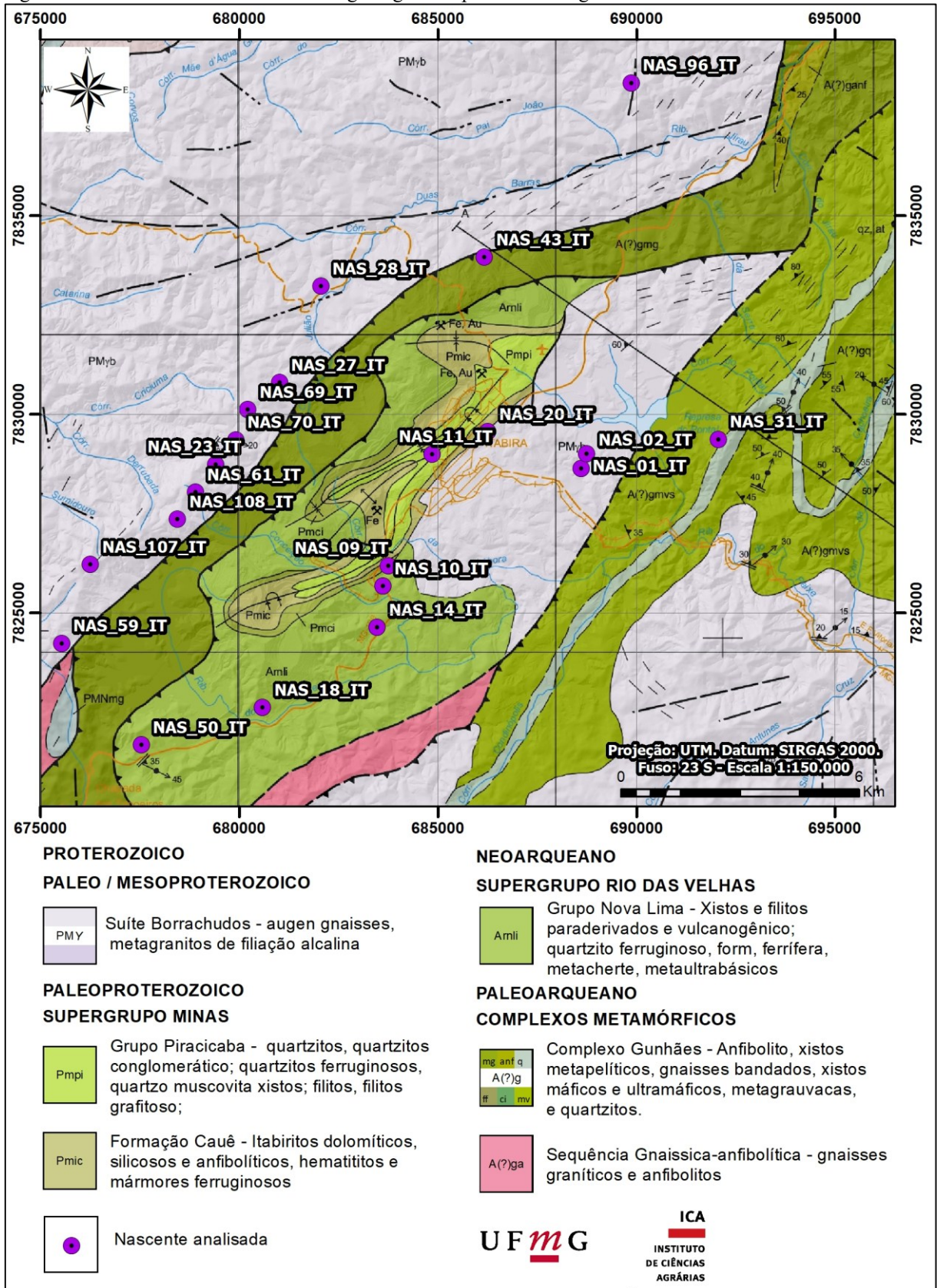
Quadro 2- Dados básicos das nascentes e associação geológica.

Nascente	Coordenadas sirgas 2000		Cota (m)	Geologia associada
	E (m)	N (m)		
NAS 01 IT	688613,649	7828621,967	718,0	Suíte Borrachudos
NAS 02 IT	688759,182	7828991,079	761,0	Suíte Borrachudos
NAS 09 IT	683770,055	7826173,836	786,0	Grupo Nova Lima
NAS 10 IT	683629,048	7825658,591	828,0	Grupo Nova Lima
NAS 11 IT	684865,373	7828985,490	784,0	Grupo Piracicaba
NAS 14 IT	683486,152	7824620,382	845,0	Grupo Nova Lima
NAS 18 IT	680600,723	7822600,181	830,0	Grupo Nova Lima
NAS 20 IT	686263,361	7829550,422	750,0	Suíte Borrachudos
NAS 23 IT	679412,861	7828728,272	1090,0	Suíte Borrachudos
NAS 27 IT	681029,722	7830784,532	1034,0	Suíte Borrachudos
NAS 28 IT	682066,234	7833217,291	844,0	Suíte Borrachudos
NAS 31 IT	692071,619	7829359,409	835,0	Cpx. Guanhães
NAS 43 IT	686183,912	7833943,608	829,0	Cpx. Guanhães
NAS 50 IT	677549,006	7821663,876	865,0	Grupo Nova Lima
NAS 59 IT	675539,587	7824220,128	995,0	Suíte Borrachudos
NAS 61 IT	678908,477	7828025,568	1031,0	Suíte Borrachudos
NAS 69 IT	680228,949	7830105,554	1070,0	Suíte Borrachudos
NAS 70 IT	679928,134	7829343,885	1067,0	Suíte Borrachudos
NAS 96 IT	689880,641	7838332,330	904,0	Suíte Borrachudos
NAS 107 IT	676259,555	7826205,253	1077,0	Suíte Borrachudos
NAS 108 IT	678448,357	7827345,349	1054,0	Suíte Borrachudos

Fonte: Autor, 2025, baseado na carta geológica da CPRM (2000).

A relação entre pontos de amostragem e contexto geológico é amplamente discutida em estudos hidrogeológicos e ambientais. Neste sentido, trabalhos como Ribeiro (2020), Barbosa *et al.* (2023) e Barbosa (2024) utilizam, em geral, dados litológicos primários, como perfis de poços e observações diretas de afloramentos para estabelecer essa correlação. Na ausência desse tipo de informação, a sobreposição espacial dos pontos de amostragem em cartas geológicas da área de interesse constitui um procedimento metodológico consolidado na literatura. Assim, a associação entre as nascentes e as unidades geológicas adotada neste estudo está embasada em práticas reconhecidas e adequadas à caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica de áreas.

Figura 5- Pontos de nascentes sobre carta geológica simplificada da região de Itabira.



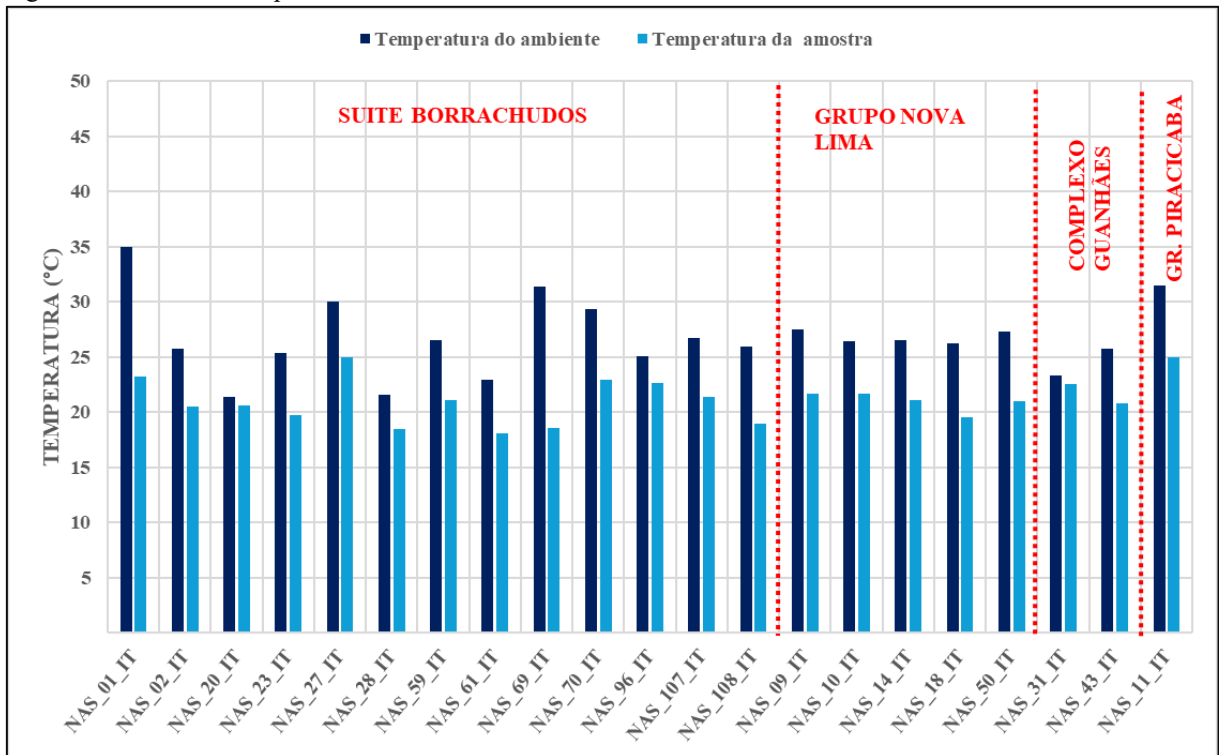
Fonte: Modificado de CPRM (Padilha; Vieira; Heineck, 2000).

5.3 Classificação hidroquímica da água

A apresentação dos parâmetros físico-químicos medidos em campo constitui etapa fundamental da análise, pois, além de refletirem as condições ambientais locais, esses indicadores subsidiam a interpretação hidroquímica das águas (Barbosa, 2024). Cada parâmetro é exposto graficamente e discutido individualmente, de modo a evidenciar suas variações entre as diferentes unidades geológicas, previamente definidas na seção anterior.

Conforme ilustrado na Figura 6, a Temperatura do ar durante as campanhas de amostragem variou entre 21,4 °C e 35,0 °C, com média de 26,7 °C. A Temperatura da água das nascentes apresentou valores entre 18,1 °C e 25,0 °C, resultando em média de 21,6 °C. Destaca-se que as nascentes NAS_11_IT e a NAS_27_IT registraram as maiores temperaturas da água observada, de 25,0 °C.

Figura 6- Valores da Temperatura do ar e da amostra.

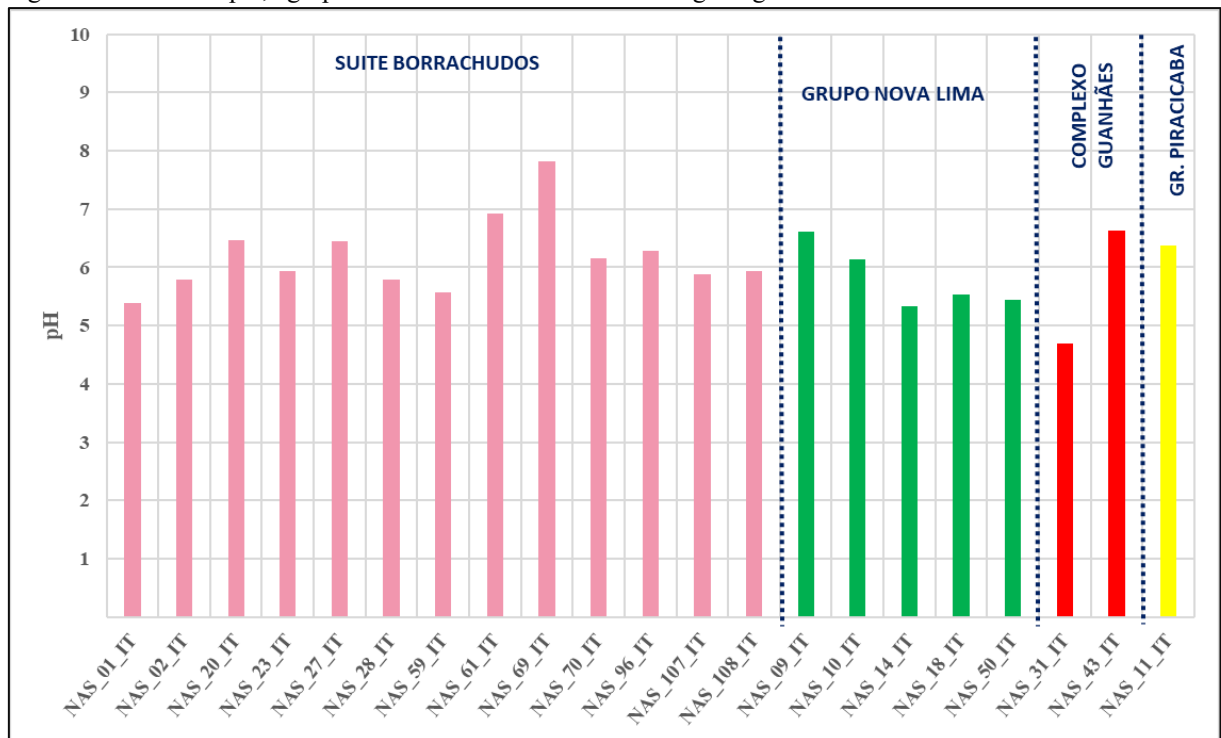


Fonte: Autor, 2025.

A Figura 7 apresenta o potencial hidrogeniônico (pH) das águas das nascentes, com valores variando entre 4,69 e 7,0, abrangendo condições levemente ácidas até próximas da neutralidade, de acordo com a escala de pH. A exceção foi registrada na nascente NAS_69_IT, inserida no contexto de rochas metagraníticas de filiação alcalina da Suíte Borrachudos, com pH de 7,81. Para essa unidade litológica, a média dos valores foi de 6,18, indicando águas

levemente ácidas. Em contraste, o menor valor foi observado na nascente NAS_31_IT, associada ao gnaiss bandado e fácies quartzítica do Complexo Guanhães, que apresentou pH de 4,69. Já as nascentes relacionadas às rochas xistosas do Grupo Nova Lima exibiram pH médio de 5,81.

Figura 7- Valores de pH, agrupados entre as diferentes unidades geológicas.

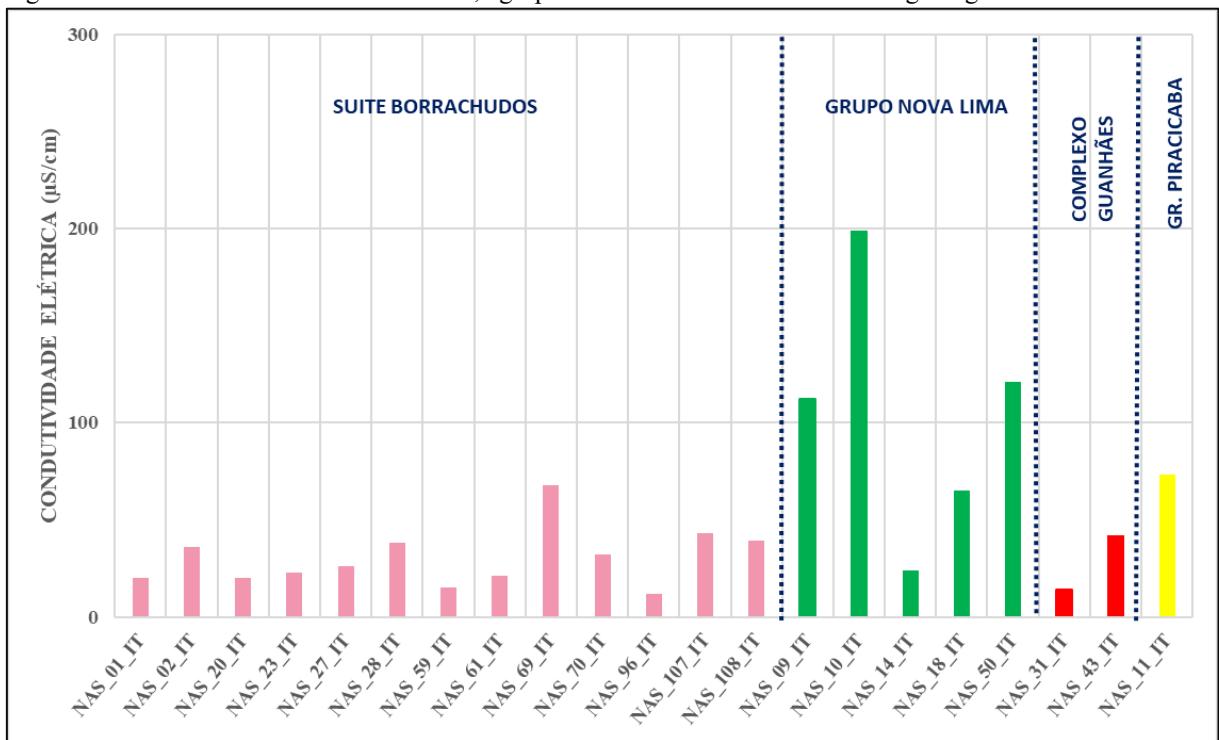


Fonte: Autor, 2025.

A Condutividade Elétrica (C.E.), apresentada na Figura 8, variou entre 12 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 199 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os maiores valores foram registrados nas nascentes associadas às rochas xistosas do Grupo Nova Lima, que apresentou mediana de 112 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Em contrapartida, as menores condutividades foram observadas nas nascentes inseridas em rochas metagraníticas da Suíte Borrachudos e em rochas gnáissicas do Complexo Guanhães, mediana de 26 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 28 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Já a nascente NAS_11_IT, apresentou valor intermediário, de 73 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Conforme discutido por Menegasse *et al.* (2003), as águas que circulam em meios xistosos tendem a apresentar (C.E.) mais elevada, resultado da maior interação água-rocha. Essa condição está associada à presença de planos de xistosidades frequentes, que favorecem a percolação e ampliam a superfície de contato entre a solução aquosa e os minerais susceptíveis ao intemperismo. Em contrapartida, em litologias como granitos, gnaisses ou quartzitos, a circulação subterrânea ocorre predominantemente por fraturas menos frequente e menor conectividade em profundidade, o que limita a dissolução mineral.

Figura 8- Valores da Condutividade Elétrica, agrupados entre as diferentes unidades geológicas.

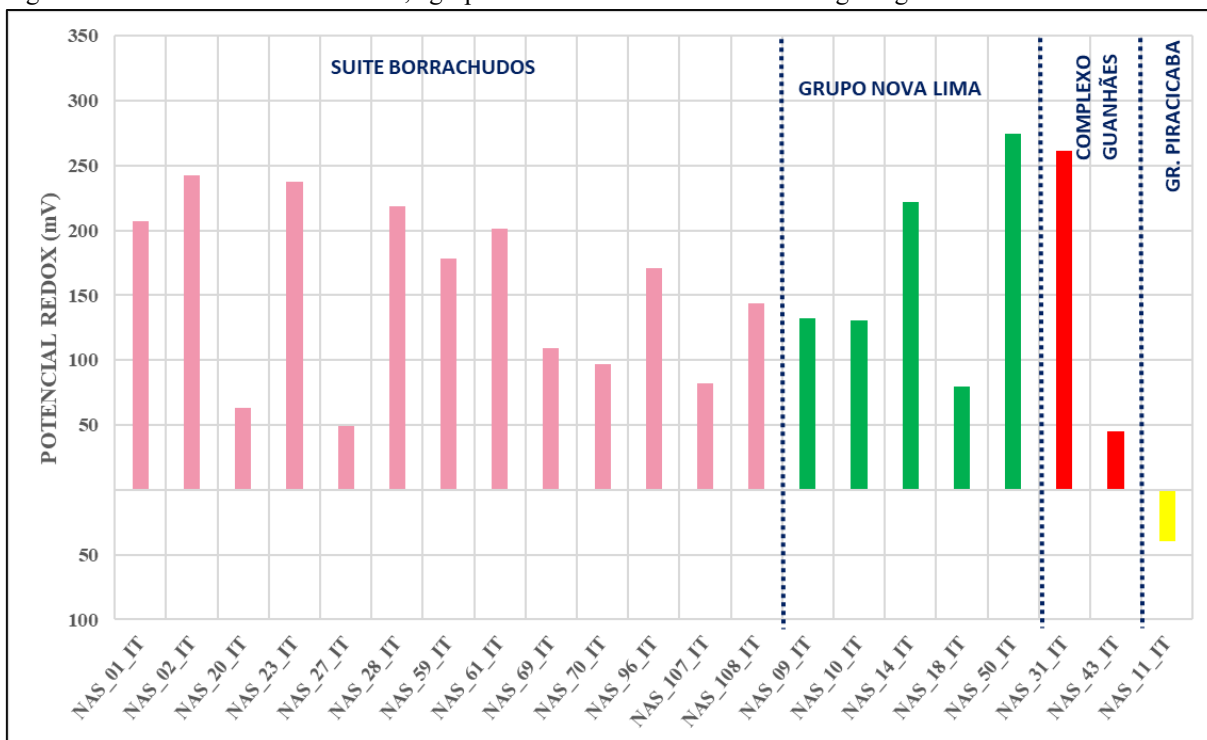


Fonte: Autor, 2025.

A Figura 9 apresenta os valores de Potencial Redox das águas das nascentes; observa-se uma variação entre -39,7 mV e 274,8 mV. De maneira geral, os resultados foram positivos, com exceção da nascente NAS_11_IT, inserida no quartzito do Grupo Piracicaba, que registrou -39,7 mV. Nas nascentes associadas à Suíte Borrachudos, os valores apresentaram mediana de 171,1 mV, enquanto aquelas relacionadas ao Grupo Nova Lima exibiram mediana de 132,4 mV. Já as duas nascentes situadas sobre rochas do Complexo Guanhães, a NAS_31_IT e NAS_43_IT, apresentaram 261,8 mV e 45,1 mV, respectivamente.

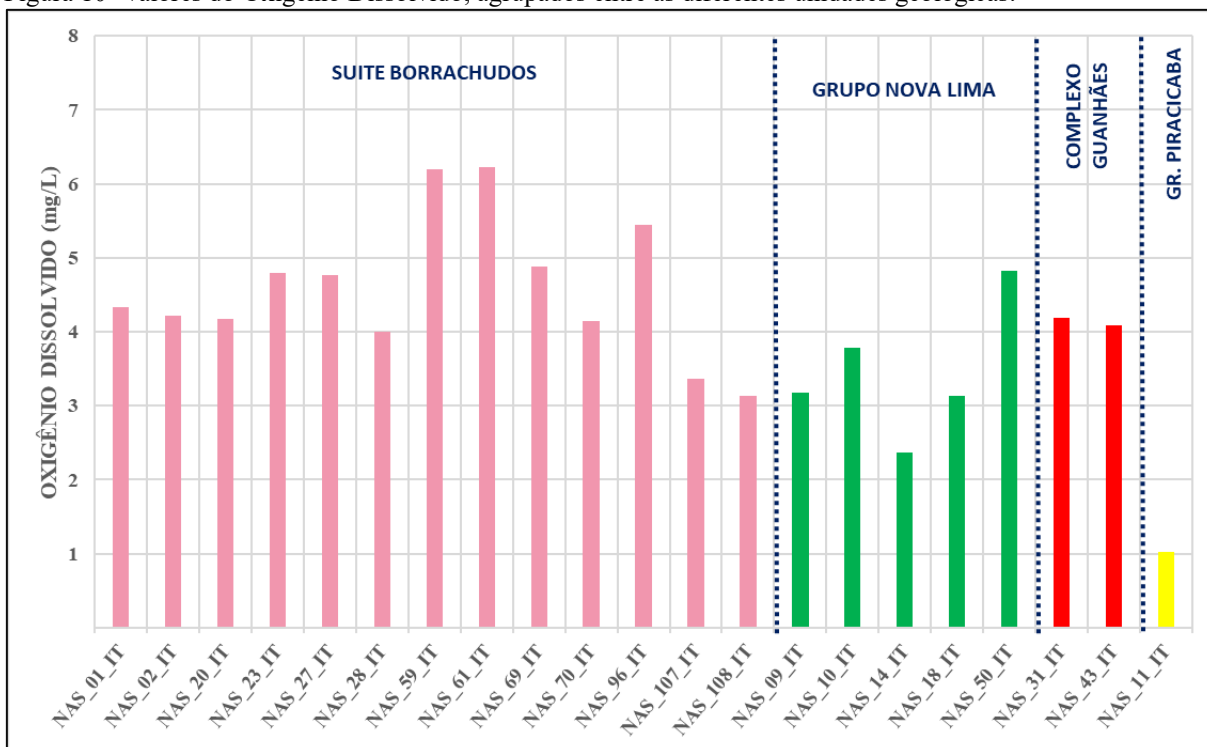
Conforme ilustrado na Figura 10, os valores de oxigênio dissolvido nas águas das nascentes variaram entre 1,02 mg L⁻¹ e 6,23 mg L⁻¹, com mediana de 4,17 mg L⁻¹. Nas nascentes inseridas no contexto litológico da Suíte Borrachudos, os valores oscilaram entre 3,14 mg L⁻¹ e 6,23 mg L⁻¹, resultando em média de 4,59 mg L⁻¹. Para as nascentes associadas às rochas xistosas do Grupo Nova Lima, os valores variaram entre 2,37 mg L⁻¹ e 4,83 mg L⁻¹, com média de 3,45 mg L⁻¹. As duas nascentes situadas sobre os gnaisses do Complexo Guanhães apresentaram valores próximos entre si, dos quais, NAS_31_IT com 4,19 mg L⁻¹ e NAS_43_IT com 4,09 mg L⁻¹. A menor concentração registrada correspondeu a nascente NAS_11_IT, inserida no quartzito do Grupo Piracicaba, com 1,02 mg L⁻¹.

Figura 9- Valores do Potencial Redox, agrupados entre as diferentes unidades geológicas.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 10- Valores do Oxigênio Dissolvido, agrupados entre as diferentes unidades geológicas.

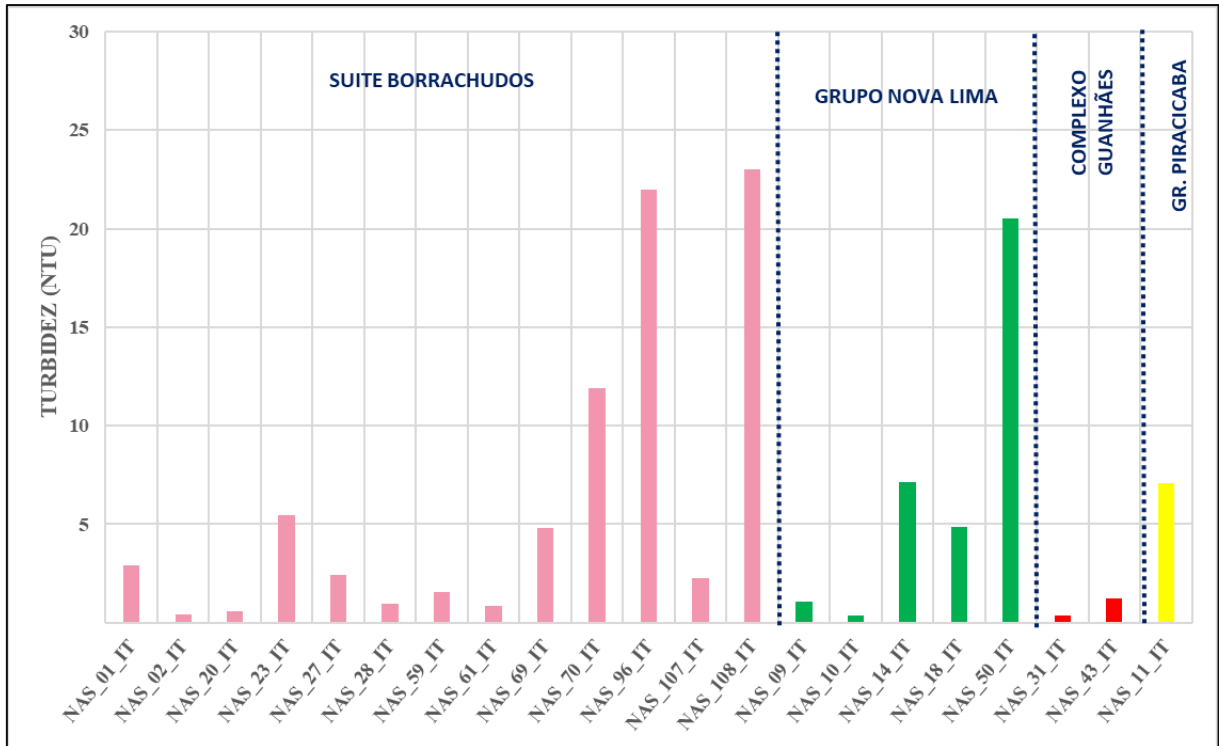


Fonte: Autor, 2025.

Os valores de Turbidez, expressos em Unidade Nefelométrica de Turbidez (NTU), estão representados na Figura 11. As águas apresentaram variação entre 0,37 NTU e 23 NTU, com

mediana de 2,43 NTU, considerando o conjunto das 21 nascentes. Do total, treze nascentes exibiram valores inferiores a 5 NTU, enquanto quatro apresentaram valores entre 5 e 10 NTU. Os quatro maiores valores de turbidez registrados corresponderam a três nascentes associadas ao contexto litológico da Suíte Borrachudos e uma relacionada ao Grupo Nova Lima.

Figura 11- Valores de Turbidez, agrupados entre as diferentes unidades geológicas.



Fonte: Autor, 2025.

No que se refere ao pH, Potencial redox, Oxigênio dissolvido e Turbidez, a bibliografia consultada, dentro do escopo do presente estudo, não apresentou contrapontos específicos que estabeleçam relações diretas entre esses indicadores e o contexto geológico da região de Itabira. É possível que existam trabalhos adicionais que abordem isso, contudo, com base nas referências acessadas, não foi identificada uma correlação geológica clara para esses parâmetros.

A Tabela 4 apresenta os principais elementos utilizados na classificação hidroquímica convencional de *Piper* (Piper, 1944) em que foram considerados os íons HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} , além dos parâmetros físico-químicos auxiliares, como condutividade Elétrica (C.E.), pH, alcalinidade total (TAC) e sólidos dissolvidos totais (SDT). Quanto ao diagrama de *Stiff* (Stiff, 1951), posteriormente adaptado por Custódio e Llamas (1996), a representação foi realizada considerando apenas os íons maiores HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Mg^{2+} e Ca^{2+} também descritos na Tabela 4.

Com base nos parâmetros listados na Tabela 4, elaborou-se o diagrama de *Piper*, o qual possibilita a visualização da distribuição dos principais cátions e ânions presentes nas águas das nascentes analisadas. Essa representação mostra os tipos hidroquímicos dominantes no conjunto amostral. Para melhor análise, as nascentes foram diferenciadas segundo as unidades geológicas em que se encontram: em rosa, as localizadas sobre rochas metagraníticas da Suíte Borrachudos; em amarelo, a nascente inserida nos quartzitos do Grupo Piracicaba; em verde, aquelas associadas aos xistos do Grupo Nova Lima; e em vermelho, as situadas no contexto do Complexo Guanhães.

Tabela 4- Parâmetros utilizados na classificação hidroquímica das águas das nascentes.

AMOSTRA	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	C.E.	pH	TAC	SDT
	(meq L ⁻¹)								(µS/cm)	-	(mg L ⁻¹)	
NAS_01_IT	0,161	0,014	0,003	0,010	0,034	0,046	0,019	0,089	20,0	5,39	8,04	13,0
NAS_02_IT	0,119	0,054	0,001	0,022	0,015	0,007	0,003	0,144	36,0	5,79	5,93	16,0
NAS_20_IT	0,175	0,014	0,002	0,010	0,034	0,005	0,038	0,121	20,0	6,47	8,76	42,5
NAS_23_IT	0,095	0,014	0,001	0,010	0,002	0,002	0,037	0,076	23,0	5,94	4,76	14,0
NAS_27_IT	0,197	0,034	0,000	0,010	0,057	0,028	0,047	0,062	26,0	6,44	9,85	39,6
NAS_28_IT	0,084	0,014	0,054	0,010	0,085	0,019	0,067	0,057	38,0	5,78	4,18	61,5
NAS_59_IT	0,089	0,014	0,002	0,010	0,015	0,002	0,045	0,059	15,0	5,56	4,45	5,5
NAS_59_IT ^(DUP)	0,086	0,014	0,002	0,010	0,017	0,002	0,046	0,062	15,0	5,56	4,31	5,5
NAS_61_IT	0,040	0,014	0,012	0,010	0,018	0,010	0,037	0,066	21,0	6,92	2	26,8
NAS_69_IT	0,121	0,014	0,009	0,010	0,028	0,010	0,038	0,052	68,0	7,81	6,05	34,4
NAS_70_IT	0,112	0,014	0,0003	0,010	0,015	0,010	0,027	0,058	32,0	6,16	5,61	33,2
NAS_96_IT	0,113	0,014	0,001	0,010	0,010	0,005	0,038	0,052	12,0	6,28	5,63	5,5
NAS_107_IT	0,224	0,014	0,001	0,010	0,024	0,006	0,044	0,141	43,0	5,88	11,2	38,8
NAS_108_IT	0,159	0,014	0,002	0,010	0,021	0,002	0,148	0,100	39,0	5,94	7,97	39,5
NAS_09_IT	0,356	0,014	0,004	0,037	0,183	0,213	0,011	0,019	112,0	6,01	17,8	28
NAS_09_IT ^(DUP)	0,358	0,014	0,004	0,036	0,184	0,215	0,010	0,017	112,0	6,61	17,9	36,4
NAS_10_IT	0,462	0,034	0,022	0,010	0,227	0,254	0,016	0,072	199,0	6,14	23,1	50,0
NAS_14_IT	0,185	0,014	0,004	0,010	0,042	0,093	0,008	0,034	24,0	5,33	9,26	13,0
NAS_18_IT	0,204	0,014	0,001	0,010	0,051	0,069	0,028	0,039	65,0	5,54	10,2	18,8
NAS_50_IT	0,156	0,014	0,002	0,038	0,069	0,081	0,002	0,029	121,0	5,45	7,8	14
NAS_31_IT	0,040	0,014	0,009	0,010	0,022	0,008	0,027	0,027	14,0	4,69	2,0	5,5
NAS_31_IT ^(DUP)	0,040	0,014	0,008	0,010	0,018	0,008	0,028	0,027	14,0	4,69	2,0	5,5
NAS_43_IT	0,318	0,014	0,004	0,021	0,166	0,085	0,038	0,067	42,0	6,62	15,9	22,5
NAS_11_IT	0,702	0,014	0,0001	0,010	0,163	0,151	0,026	0,045	73,0	6,38	35,1	30,0

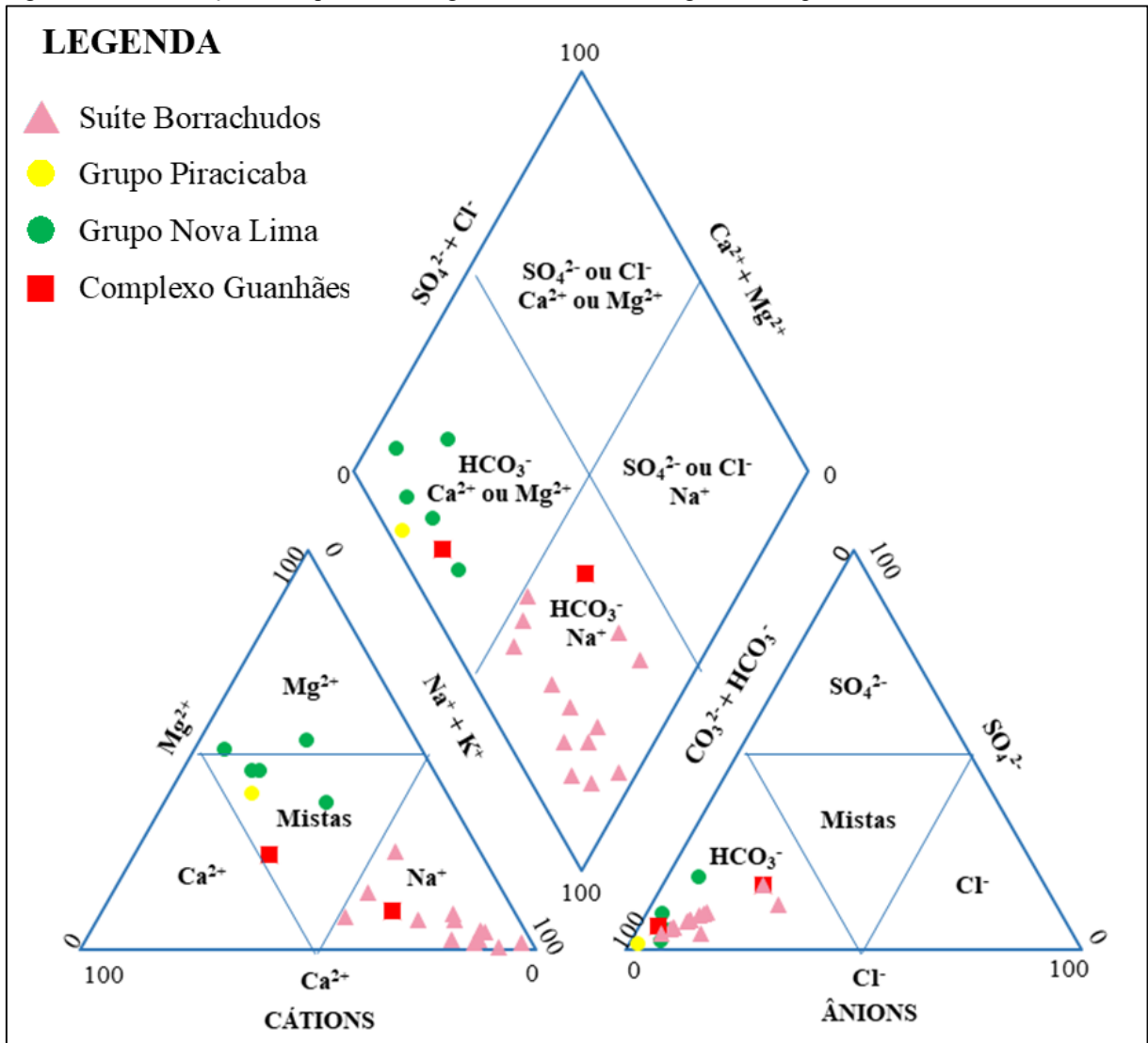
Fonte (Autor, 2025).

A Figura 12 apresenta o diagrama de *Piper*, o triângulo da direita corresponde à distribuição dos ânions, o da esquerda à dos cátions e o losango central sintetiza a classificação quanto ao tipo químico predominante.

De maneira geral, observa-se predominância do HCO₃⁻ em relação aos demais ânions, enquanto os cátions apresentam maior variabilidade entre as águas das nascentes. Ainda assim, o diagrama evidencia certa tendência de agrupamento das amostras pertencentes a um mesmo

contexto geológico, embora essa situação não seja regra absoluta em todos os casos.

Figura 12- Classificação hidroquímica das águas de acordo com diagrama de *Piper*.



Fonte: Diagrama de *Piper* (1944), modificado pelo autor (2025).

As nascentes associadas às rochas metagraníticas da Suíte Borrachudos apresentaram concentrações de íons inferiores a $0,2 \text{ meq L}^{-1}$, esse padrão é compatível com baixos valores de sólidos dissolvidos totais (SDT) observados, cujo valor máximo foi de $61,5 \text{ mg L}^{-1}$ na nascente NAS_28_IT, enquanto a mediana registrada para a unidade geológica foi $26,8 \text{ mg L}^{-1}$ (Tabela 4). No que se refere à classificação hidroquímica de *Piper*, observa-se a predominância de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ sobre os demais cátions, o que caracteriza essas águas como do tipo Bicarbonatada-Sódica.

As nascentes inseridas no contexto do Grupo Nova Lima apresentaram maior variabilidade na composição catiônica em comparação àquelas associadas à Suíte Borrachudos. Os valores de SDT variaram entre $13,0 \text{ mg L}^{-1}$ e $50,0 \text{ mg L}^{-1}$, refletindo baixa concentração de

íons dissolvidos nessas águas, conforme evidenciado na Tabela 4, onde concentrações para essa unidade não ultrapassaram 0,46 meq L⁻¹. Apesar da baixa concentração de íons dissolvidos, observa-se predominância do Mg²⁺ como cátion majoritário, ainda que em concentrações relativamente próximas às de Ca²⁺ e Na⁺ + K⁺. A nascente NAS_18_IT se destaca ao exibir as concentrações de Ca²⁺ e Na⁺ + K⁺ praticamente equivalentes. De modo geral, as águas dessas nascentes apresentaram caráter misto, sem domínio absoluto de um único cátion, ainda que com tendência ao grupo das águas Bicarbonatadas-Magnesianas.

As duas nascentes associadas ao Complexo Guanhães apresentaram diferenças significativas entre si quanto à concentração de íons dissolvidos. A nascente NAS_31_IT exibiu a menor mineralização de todo o conjunto amostrado, com SDT de apenas 5,5 mg L⁻¹ e concentração máxima de 0,040 meq L⁻¹, configurando-se como a nascente menos ionizada entre as 21 analisadas. Quanto ao tipo químico a água dessa nascente é classificada como Bicarbonatada-Sódica, em função da predominância relativa de Na⁺ + K⁺ sobre os demais cátions. Em contraste, a NAS_43_IT apresentou-se mais mineralizada, com SDT de 22,5 mg L⁻¹ e concentração máxima dos íons principais de 0,318 meq L⁻¹, aproximadamente 8 vezes superior à da NAS_31_IT. Nessa nascente, o HCO₃⁻ também constitui o ânion majoritário, mas com predomínio de Ca²⁺, associado a contribuições expressivas de Na⁺ + K⁺, que define o tipo hidroquímico como água Mista Bicarbonatada-Cálcica a Sódica.

A única nascente associada ao contexto dos quartzitos do Grupo Piraciba, NAS_11_IT, apresentou concentrações de íons maiores variando 0,0001 e 0,702 meq L⁻¹, com sólidos dissolvidos totais de 30 mg L⁻¹. Assim como nas demais águas analisadas, o ânion predominante é o HCO₃⁻. No que se refere aos cátions, observa-se equilíbrio entre Ca²⁺ e Mg²⁺, com concentrações próximas. De acordo com a classificação pelo diagrama de *Piper*, essa nascente caracteriza-se como água Mista Bicarbonatada-Cálcica-Magnesianas.

O estudo de Mourão (2007) constitui uma referência essencial para compreensão dos sistemas hidrogeológicos e hidrogeoquímicos no Quadrilátero Ferrífero, região que também abrange a área deste trabalho. Embora seu foco principal recaia sobre a Formação Cauê, formada predominantemente por rochas itabiríticas, a autora apresenta igualmente a caracterização das águas subterrâneas associadas a outras unidades litológicas relevantes da região, como: xistos, gnaisses, granitos e quartzitos. Essas unidades geológicas estão presentes na área estudada, o que possibilitou uma comparação entre os resultados obtidos e os padrões hidroquímicos descritos por Mourão (2007).

Nas nascentes em rochas metagraníticas, os resultados se diferenciam do padrão mais amplo apresentado por Mourão (2007). Enquanto a autora caracteriza, de forma geral, águas

Bicarbonatadas Cálcicas-Magnesianas, embora com eventuais elevações de Na^+ , as nascentes estudadas mostraram comportamento predominantemente de águas Bicarbonatadas-Sódicas. Essa diferença pode estar relacionada à mineralogia específica dos granitos e metagranitos em cada local.

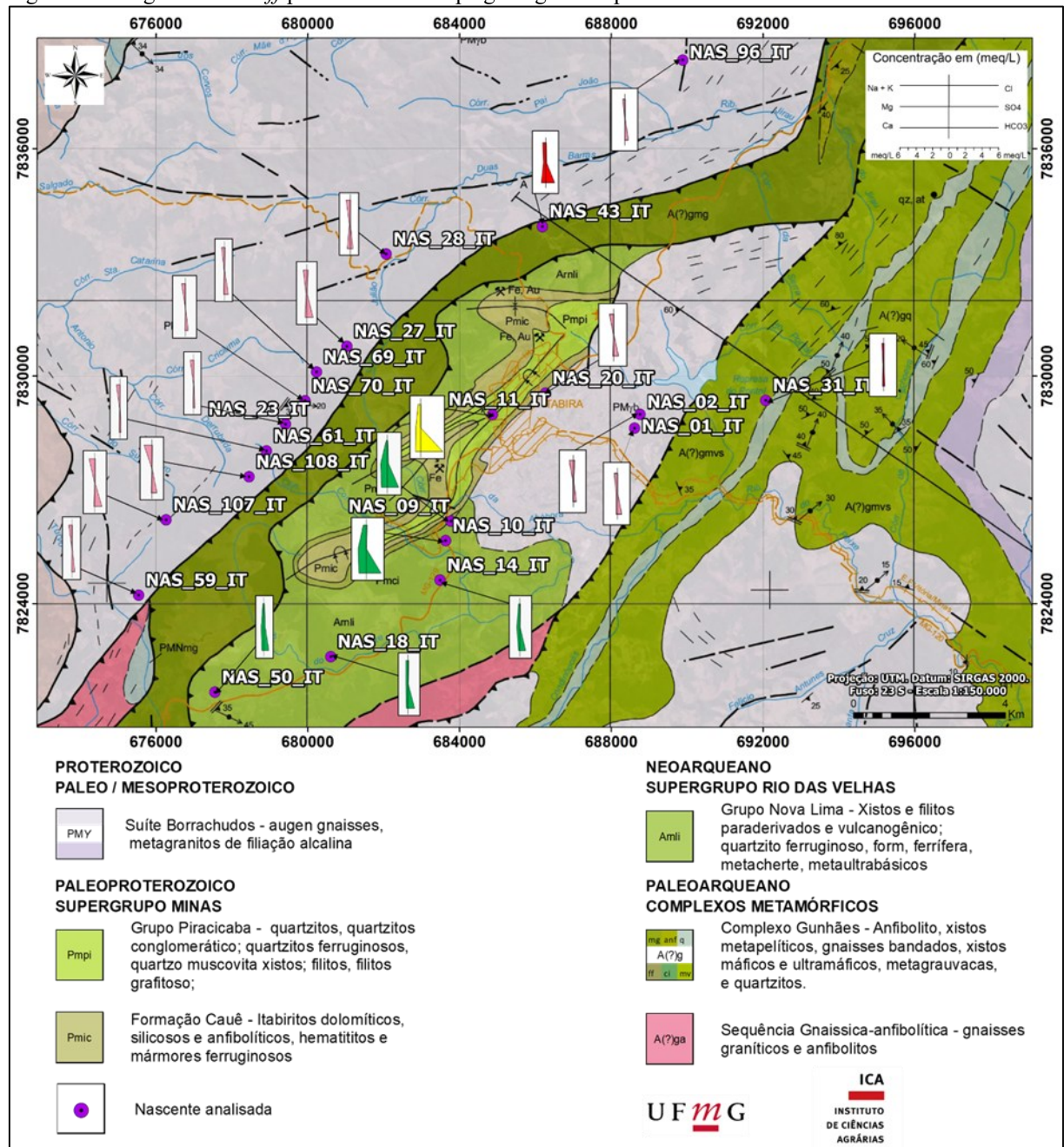
No caso das águas associadas a xistos, Mourão (2007) descreve uma predominância de águas Bicarbonatadas Cálcicas-Magnesianas, com contribuição expressiva de Ca^{2+} e Mg^{2+} . Entretanto, os resultados aqui obtidos indicam águas Bicarbonatadas-Magnesianas, nas quais o Magnésio é o cátion dominante.

Para as nascentes em gnaisses, foram observados dois padrões distintos: uma apresentou composição Bicarbonatada-Sódica, enquanto a outra mostrou águas Bicarbonatada_Cálcicas-Magnesianas, exatamente como descrito por Mourão para esse tipo litológico.

Por fim, no caso da única nascente associada ao quartzito, a comparação deve ser feita com certa cautela devido ao número limitado de amostras. Ainda assim, observou-se uma convergência total entre este resultado e o descrito por Mourão (2007). Em ambos os estudos, as águas foram classificadas como Bicarbonatadas-Cálcicas-Magnesianas.

A Figura 13 apresenta os diagramas de *Stiff*, dispostos em mapa de modo a ilustrar a distribuição espacial dos tipos hidroquímicos nas diferentes águas analisadas. Essa representação facilita a visualização imediata da predominância dos íons maiores em cada ponto, reforçando as classificações definidas no diagrama de *Piper* descritas anteriormente, além disso, é possível observar as correlações com as unidades litológicas.

Figura 13- Diagramas de *Stiff* plotados sobre mapa geológico simplificado.



Fonte: Modificado de CPRM (Padilha; Vieira; Heineck, 2000).

5.4 Análise multivariada dos dados hidroquímicos

Adicionalmente aos métodos convencionais de análises hidroquímicas apresentados anteriormente, esta seção aborda a aplicação da análise estatística multivariada. Essa abordagem permite avaliar simultaneamente múltiplos parâmetros (Hair *et al.* 2009). Para tanto, foram considerados os mesmos constituintes maiores e parâmetros físico-químicos utilizados nas interpretações hidroquímicas.

A Tabela 5 apresenta os valores estatísticos derivados do cálculo da distância euclidiana. Nela, é possível identificar as similaridades e dissimilaridades entre as águas das nascentes analisadas, expressas pelos valores médios, mínimos, máximos e pelos desvios padrão das distâncias. Esse conjunto de informações auxilia na identificação de nascentes mais semelhantes ou mais distintas em relação aos parâmetros considerados.

Tabela 5- Resumo estatístico das distâncias euclidianas entre as amostras das nascentes.

Amostra	Médio	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	Mais próximo	Mais distante
NAS_01_IT	3,54	1,44	7,22	1,72	NAS_23_IT	NAS_10_IT
NAS_02_IT	5,97	4,21	8,17	1,12	NAS_27_IT	NAS_11_IT
NAS_09_IT	5,53	1,03	7,47	1,46	NAS_09_IT_Dup	NAS_108_IT
NAS_09_IT_Dup	5,67	1,03	7,56	1,48	NAS_09_IT	NAS_02_IT
NAS_10_IT	7,06	4,83	8,42	1,11	NAS_09_IT_Dup	NAS_31_IT_Dup
NAS_11_IT	6,28	4,01	8,17	1,11	NAS_43_IT	NAS_28_IT
NAS_14_IT	3,72	1,32	6,91	1,57	NAS_18_IT	NAS_10_IT
NAS_18_IT	3,47	1,32	6,32	1,40	NAS_14_IT	NAS_10_IT
NAS_20_IT	4,02	1,28	7,15	1,52	NAS_107_IT	NAS_10_IT
NAS_23_IT	3,45	0,98	7,81	1,99	NAS_59_IT_Dup	NAS_10_IT
NAS_27_IT	4,07	2,52	6,37	1,12	NAS_70_IT	NAS_10_IT
NAS_28_IT	6,23	4,86	8,17	0,86	NAS_61_IT	NAS_11_IT
NAS_31_IT	4,26	0,08	8,39	2,06	NAS_31_IT_Dup	NAS_10_IT
NAS_31_IT_Dup	4,27	0,08	8,42	2,07	NAS_31_IT	NAS_10_IT
NAS_43_IT	4,12	3,00	6,04	0,86	NAS_18_IT	NAS_28_IT
NAS_50_IT	4,91	3,30	7,07	1,09	NAS_09_IT	NAS_28_IT
NAS_59_IT	3,59	0,10	8,09	2,11	NAS_59_IT_Dup	NAS_10_IT
NAS_59_IT_Dup	3,60	0,10	8,09	2,10	NAS_59_IT	NAS_10_IT
NAS_61_IT	3,90	1,79	7,65	1,67	NAS_70_IT	NAS_10_IT
NAS_69_IT	4,47	1,96	7,07	1,3	NAS_61_IT	NAS_10_IT
NAS_70_IT	3,46	1,44	7,26	1,68	NAS_23_IT	NAS_10_IT
NAS_96_IT	3,63	1,06	8,01	1,95	NAS_23_IT	NAS_10_IT
NAS_107_IT	4,20	1,28	6,97	1,41	NAS_20_IT	NAS_10_IT
NAS_108_IT	5,48	3,83	8,31	1,31	NAS_107_IT	NAS_10_IT

Fonte: Resultados gerados no *software R*, 2025.

Reportando-se à Tabela 5, a coluna “Mais próximo” evidencia principalmente a consistência das amostras em duplicata, que mantiveram proximidade entre seus pares correspondentes. Essa coerência também se reflete nos menores valores da coluna “Mínimo”, atribuídos em grande parte a essas duplicatas, como 0,08 para o par NAS_31_IT e NAS_31_IT_Dup; 0,10 para o par NAS_59_IT e NAS_59_IT_Dup e 1,03 para o par NAS_09_IT e sua duplicata. Esses resultados reforçam a validação dos dados, confirmando a precisão e a reprodutibilidade das análises. Já a coluna “Mais distante” reúne as amostras das nascentes que apresentaram menor similaridade em relação às demais. Nesse sentido, destaca-se a NAS_10_IT, que aparece 16 vezes como a mais distante.

Os resultados comparativos entre as amostras, organizados segundo seus contextos litológicos, indicam tendência de maior similaridade entre aquelas inseridas em um mesmo domínio geológico. Dessa forma, optou-se por apresentar recortes da Tabela 5, de modo a detalhar os padrões de similaridade e dissimilaridade em cada contexto litológico, facilitando a interpretação dos resultados.

A Tabela 6 apresenta o resumo estatístico das distâncias euclidianas para as amostras das nascentes inseridas no domínio da Suíte Borrachudos. As menores distâncias foram observadas entre pares desse mesmo contexto. Dentre os resultados mínimos, destacam-se os valores de 4,21 para a NAS_02_IT, 4,86 para a NAS_28_IT e 3,83 para NAS_108_IT. Embora essas águas apresentem similaridade com outras do mesmo contexto geológico, exibem comportamento diferenciado, pois mantêm distâncias intermediárias quando comparadas ao conjunto geral dos resultados. Em contrapartida, as maiores dissimilaridades ocorrem em relação à amostra da nascente NAS_10_IT, vinculada ao Grupo Nova Lima. Apenas em dois casos a nascente NAS_11_IT, do Grupo Piracicaba, foi apontada como mais distante, constituindo as únicas exceções.

Em relação às amostras das nascentes relacionadas às rochas xistosas do Grupo Nova Lima, a Tabela 7 evidencia forte similaridade entre a NAS_09_IT e sua duplicata, com valor mínimo de 1,03. Por outro lado, essa mesma nascente apresenta elevada dissimilaridade em relação às nascentes NAS_108_IT e NAS_02_IT, ambas inseridas no contexto da Suíte Borrachudos. A NAS_10_IT demonstra proximidade com a NAS_09_IT, embora essa relação seja considerada intermediária quando comparada ao conjunto de valores com distância mínima de 4,83. Em contraste, destaca-se pela maior dissimilaridade em relação à NAS_31_IT, vinculada ao Complexo Guanhães. As nascentes NAS_14_IT e NAS_18_IT exibem forte compatibilidade, sendo uma a mais próxima da outra, mas revelam maior dissimilaridade justamente em relação à NAS_10_IT, pertencente ao mesmo agrupamento geológico. Por fim,

a NAS_50_IT apresenta proximidade com a NAS_09_IT e distanciamento em relação à NAS_28_IT, associada à Suíte Borrachudos.

Tabela 6- Resumo estatístico das distâncias euclidianas entre as amostras das nascentes pertencentes às rochas metagraníticas da Suíte Borrachudos.

Amostra	Médio	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	Mais próximo	Mais distante
NAS_01_IT	3,54	1,44	7,22	1,72	NAS_23_IT	NAS_10_IT
NAS_02_IT	5,97	4,21	8,17	1,12	NAS_27_IT	NAS_11_IT
NAS_20_IT	4,02	1,28	7,15	1,52	NAS_107_IT	NAS_10_IT
NAS_23_IT	3,45	0,98	7,81	1,99	NAS_59_IT_Dup	NAS_10_IT
NAS_27_IT	4,07	2,52	6,37	1,12	NAS_70_IT	NAS_10_IT
NAS_28_IT	6,23	4,86	8,17	0,86	NAS_61_IT	NAS_11_IT
NAS_59_IT	3,59	0,10	8,09	2,11	NAS_59_IT_Dup	NAS_10_IT
NAS_59_IT_Dup	3,60	0,10	8,09	2,10	NAS_59_IT	NAS_10_IT
NAS_61_IT	3,90	1,79	7,65	1,67	NAS_70_IT	NAS_10_IT
NAS_69_IT	4,47	1,96	7,07	1,30	NAS_61_IT	NAS_10_IT
NAS_70_IT	3,46	1,44	7,26	1,68	NAS_23_IT	NAS_10_IT
NAS_96_IT	3,63	1,06	8,01	1,95	NAS_23_IT	NAS_10_IT
NAS_107_IT	4,20	1,28	6,97	1,41	NAS_20_IT	NAS_10_IT
NAS_108_IT	5,48	3,83	8,31	1,31	NAS_107_IT	NAS_10_IT

(Fonte: Resultados gerados no *software R*, 2025).

Tabela 7- Resumo estatístico das distâncias euclidianas entre as amostras das nascentes pertencentes às rochas xistosas do Grupo Nova Lima.

Amostra	Médio	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	Mais próximo	Mais distante
NAS_09_IT	5,53	1,03	7,47	1,46	NAS_09_IT_Dup	NAS_108_IT
NAS_09_IT_Dup	5,67	1,03	7,56	1,48	NAS_09_IT	NAS_02_IT
NAS_10_IT	7,06	4,83	8,42	1,11	NAS_09_IT_Dup	NAS_31_IT_Dup
NAS_14_IT	3,72	1,32	6,91	1,57	NAS_18_IT	NAS_10_IT
NAS_18_IT	3,47	1,32	6,32	1,40	NAS_14_IT	NAS_10_IT
NAS_50_IT	4,91	3,30	7,07	1,09	NAS_09_IT	NAS_28_IT

Fonte: Resultados gerados no *software R*, 2025.

A Tabela 8 apresenta o resumo estatístico das distâncias euclidianas referentes às amostras das nascentes associadas ao contexto geológico de rochas gnáissicas bandadas e quartzíticas do Complexo Guanhães.

Observa-se que a amostra da nascente NAS_31_IT apresenta forte similaridade com a sua duplicata, como esperado. No entanto, apresenta dissimilaridade em relação à NAS_10_IT, do Grupo Nova Lima. Por sua vez, a nascente NAS_43_IT exhibe aproximação com a NAS_18_IT, também do Grupo Nova Lima, enquanto o maior distanciamento foi identificado em relação à NAS_28_IT, situada no contexto geológico da Suíte Borrachudos.

Tabela 8- Resumo estatístico das distâncias euclidianas entre as amostras das nascentes pertencentes às rochas gnáissicas bandadas e quartzíticas do Complexo Guanhães.

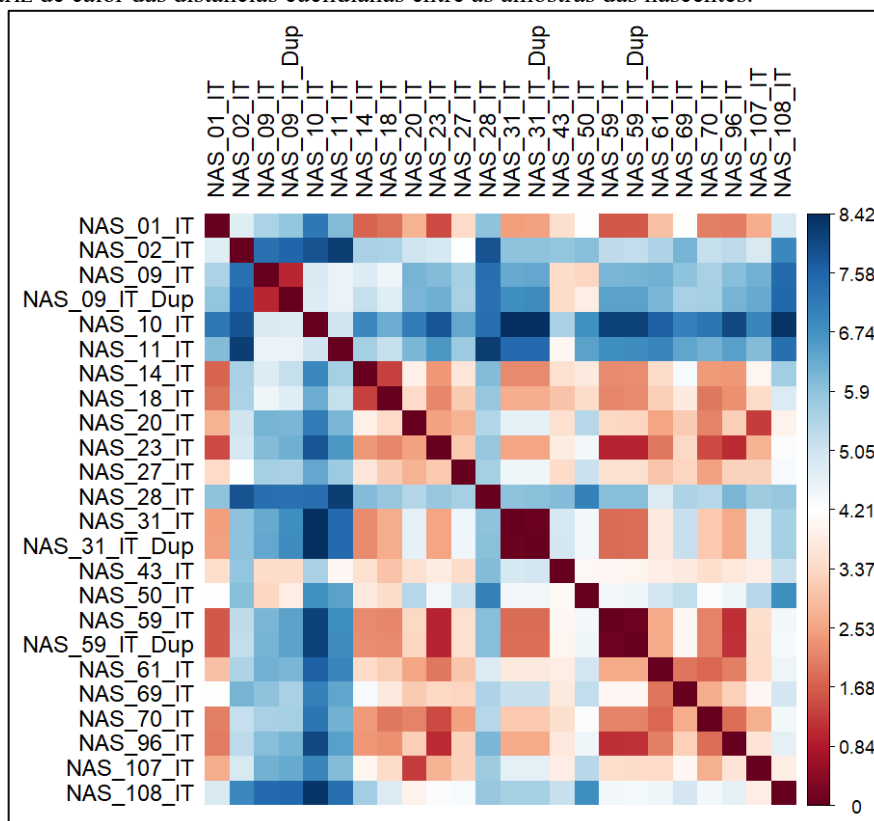
Amostra	Médio	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	Mais próximo	Mais distante
NAS_31_IT	4,26	0,08	8,39	2,06	NAS_31_IT_Dup	NAS_10_IT
NAS_31_IT_Dup	4,27	0,08	8,42	2,07	NAS_31_IT	NAS_10_IT
NAS_43_IT	4,12	3,00	6,04	0,86	NAS_18_IT	NAS_28_IT

Fonte: Resultados gerados no *software R*, 2025.

No caso do Grupo Piracicaba, representado apenas pela amostra da nascente NAS_11_IT, observa-se valor médio de distância euclidiana de 6,28, com mínimo de 4,01 e máximo de 8,17. Essa nascente apresenta maior similaridade em relação à NAS_43_IT, vinculada ao Complexo Guanhães, enquanto sua maior dissimilaridade ocorre com a NAS_28_IT, associada à Suíte Borrachudos.

Os padrões identificados nas tabelas podem ser visualizados de forma sintética na matriz de calor (Figura 14). Os tons avermelhados indicam maior similaridade menores distâncias, enquanto os tons azulados representam maior dissimilaridade. Observa-se a consistência das amostras em duplicata, bem como o distanciamento da NAS_10_IT em relação ao conjunto, aspectos já detalhados anteriormente.

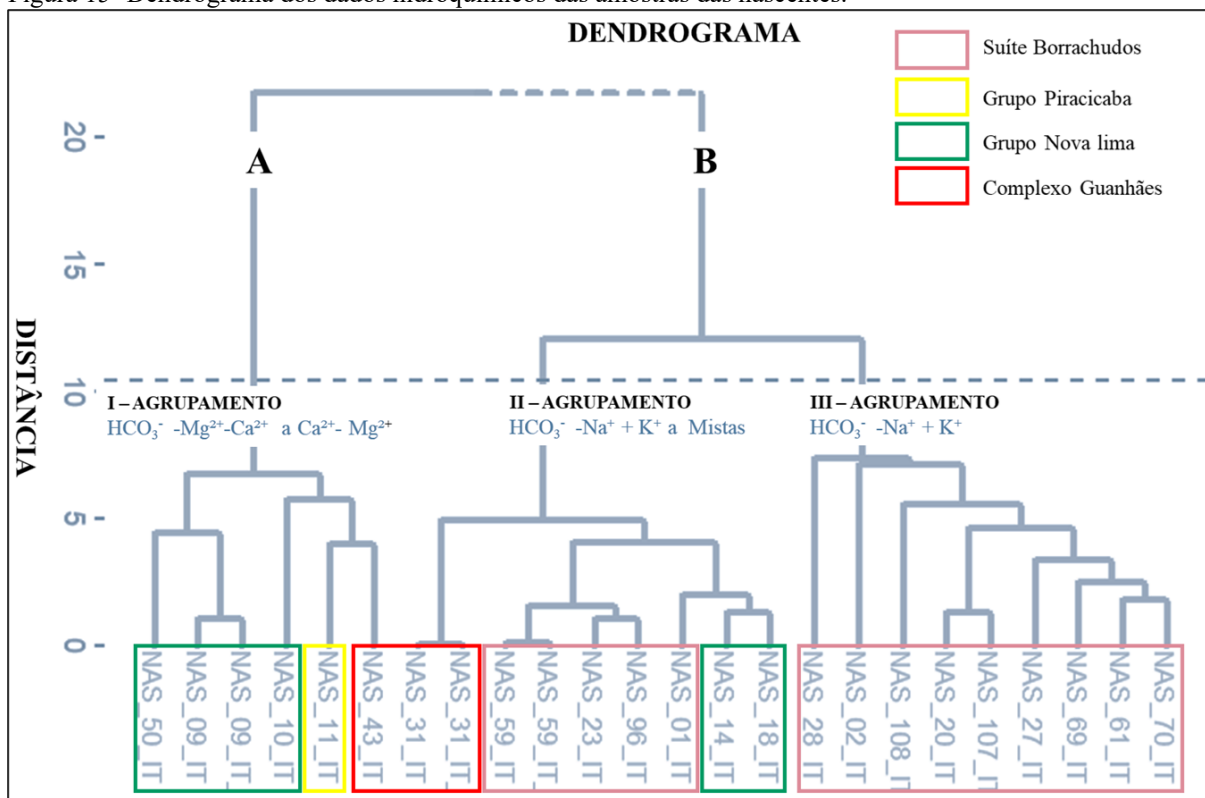
Figura 14- Matriz de calor das distâncias euclidianas entre as amostras das nascentes.



Fonte: Ilustração gerada no *software R*, 2025. Tons avermelhados apresentam maior similaridade, enquanto os tons azulados indicam maior dissimilaridade.

A análise de *cluster* dos dados hidroquímicos possibilitou gerar o dendrograma (Figura 15), que evidencia uma divisão inicial em dois grandes conjuntos, A e B, definidos a partir da distância euclidiana com aplicação do método de *Ward*.

Figura 15- Dendrograma dos dados hidroquímicos das amostras das nascentes.



Fonte: Ilustração gerada no *software* R, 2025 e modificada pelo autor. Dendrograma obtido a partir da análise de agrupamento hierárquico, distância euclidiana, método de *Ward*.

O conjunto A, situado no lado esquerdo da figura, agrupa as nascentes com águas mais salinizadas, associadas a maiores concentrações de íons dissolvidos, corroboradas pelos valores mais elevados dos constituintes maiores. Nesse agrupamento, a Condutividade Elétrica média foi de 109,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, enquanto o valor médio de Sólidos dissolvidos totais atingiu 30,15 mg L^{-1} .

O conjunto B, que engloba maior parte das amostras, corresponde às nascentes com águas menos salinizadas, cujos constituintes maiores apresentam valores mais baixos quando comparados ao agrupamento A. Nesse grupo, a Condutividade Elétrica média foi de 29,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e a média de Sólidos dissolvidos Totais de 23,2 mg L^{-1} , confirmando a menor mineralização dessas águas.

As diferenças observadas entre os dois conjuntos, relacionadas a maior ou menor grau de ionização, encontram respaldo nos diagramas hidroquímicos discutidos anteriormente, em especial no diagrama de *Stiff*.

Na sequência, a linha de corte define três agrupamentos principais. Essa representação

hierárquica permite visualizar o grau de similaridade entre as nascentes e auxilia na interpretação conjunta dos resultados em relação aos tipos hidroquímicos e aos contextos geológicos previamente identificados.

Da esquerda para direita, o primeiro agrupamento (I) reúne as amostras das nascentes NAS_09_IT e sua duplicata, NAS_10_IT e NAS_50_IT, todas relacionadas ao Grupo Nova Lima. Além delas, integram ainda esse conjunto as nascentes NAS_11_IT e NAS_43_IT, pertencentes, respectivamente, ao Grupo Piracicaba e ao Complexo Guanhães. Esse agrupamento faz correspondência ao conjunto A, já descrito anteriormente, caracterizado por águas mais ionizadas.

As águas das nascentes NAS_09_IT, NAS_10_IT e NAS_50_IT apresentam composição mista, com tendência ao tipo hidroquímico Bicarbonatada-Magnesiana-Cálcica. Já as amostras da NAS_11_IT e NAS_43_IT configuram-se como representantes isoladas de seus respectivos domínios, sendo caracterizadas por águas mistas do tipo Bicarbonatada-Cálcica-Magnesiana.

O segundo agrupamento (II) é formado pelas amostras das nascentes NAS_31_IT e sua duplicata, NAS_59_IT e sua duplicata, NAS_01_IT, NAS_14_IT, NAS_18_IT, NAS_23_IT e NAS_96_IT. Dentre elas, quatro estão relacionadas às rochas metagraníticas da Suíte Borrachudos, duas aos xistos do Grupo Nova Lima e uma a fácies quartizítica do complexo Guanhães. Destaca-se, nesse conjunto, a forte proximidade entre as amostras e suas respectivas duplicatas.

Quanto ao tipo hidroquímico, predominam águas Bicarbonatadas-Sódicas em seis nascentes, sendo quatro da Suíte Borrachudos e duas do Complexo Guanhães. As águas relacionadas à Suíte Borrachudos apresentam o Sódio como cátion dominante, com contribuição expressiva também de Potássio e Magnésio; essa característica diferencia essas nascentes daquelas de mesma tipologia hidroquímica que compõem o terceiro agrupamento, onde a composição se mostra mais restrita ao Sódio. Já as duas amostras do Grupo Nova Lima NAS_14_IT e NAS_18_IT assumem características de águas mistas, Bicarbonatadas-Magnesianas variando de Sódicas a Cálcicas.

O terceiro agrupamento (III) exhibe exclusivamente as amostras das nascentes associadas à Suíte Borrachudos: NAS_02_IT, NAS_20_IT, NAS_27_IT, NAS_28_IT, NAS_61_IT, NAS_69_IT, NAS_70_IT, NAS_107_IT e NAS_108_IT. Esse grupo mostra forte correlação litológica. As distâncias intragrupo são menores quando comparados aos demais grupos. Do ponto de vista hidroquímico as águas são predominantemente Bicarbonatadas-sódicas.

Embora os trabalhos de Barbosa *et al.* (2023) e Barbosa (2024) apontem para uma

correlação mais direta entre os agrupamentos hierárquicos e as litologias associadas a cada ponto amostrado, os resultados obtidos neste estudo revelam um comportamento parcialmente distinto. Algumas nascentes agruparam-se de maneira diferente do esperado, não acompanhando de forma estrita a litologia de superfície indicada na carta geológica da CPRM.

Tal divergência, contudo, não compromete a interpretação dos agrupamentos, ao contrário, amplia sua relevância. Ainda conforme sugerido por Barbosa (2024), a composição química das águas não é determinada apenas pela litologia imediatamente aflorante, mas também por processos hidroquímicos em níveis mais profundos. Dessa forma, os três agrupamentos identificados refletem, simultaneamente, características litológicas e diferenças no tipo químico predominante das águas, o que evidencia a complexidade do fluxo subterrâneo no meio.

Adicionalmente, Barbosa (2024) ressalta que a litologia representada em mapas geológicos de superfície nem sempre corresponde de maneira direta ao comportamento hidroquímico observado. Em muitos casos, ainda que a nascente aflore sobre determinada unidade, a água pode ter percolado por litologias mais profundas antes de emergir modificando seu perfil geoquímico. Nesse sentido, isso ajuda a explicar por que os agrupamentos gerados não reproduzem integralmente a compartimentação geológica de superfície, reforçando que a interação água-rocha é um processo dinâmico e espacialmente integrado ao longo do fluxo subterrâneo.

5.5 Comparação com os valores máximos permitidos

Com vistas à avaliação da adequação da qualidade da água subterrânea das nascentes estudadas para diferentes usos, os resultados foram comparados com os valores máximos permitidos (VMP's) definidos pela Resolução CONAMA n.º 396/2008 (Brasil, 2008). Para tanto, foram considerados os seguintes parâmetros: Alumínio Total, Antimônio Total, Arsênio Total, Bário Total, Berílio Total, Boro Total, Cádmio Total, Chumbo Total, Cloreto, Cobre Total, Coliformes Termotolerantes, Cromo Total, Ferro Total, Fluoreto, Manganês Total, Mercúrio Total, Molibdênio Total, Níquel Total, Nitrato (N), Nitrito (N), Prata Total, Selênio Total, Sódio Total, Sólidos Dissolvidos Totais, Sulfato, Urânio Total, Vanádio Total, Zinco Total.

De maneira geral, as concentrações observadas mantiveram-se em conformidade com os limites legais aplicáveis ou apresentaram valores inferiores ao limite de quantificação (LQ). Contudo, identificaram-se excedências restritas a quatro parâmetros, tais sejam, Alumínio, Ferro, Manganês e Coliformes Termotolerantes.

As Tabelas 9 e 10 apresentam de forma consolidada, os resultados obtidos para todos os parâmetros avaliados, bem como os respectivos VMP's, adotando como referência o valor correspondente ao uso mais restritivo.

A Figura 16 apresenta os resultados de Alumínio Total nas amostras das nascentes, em comparação com os valores máximos permitidos (VMP) para os diferentes usos estabelecidos pela Resolução CONAMA n.º 396/2008, bem como os valores de Alumínio Dissolvido, embora esta fração não seja contemplada pela resolução citada.

De maneira geral, a maioria das amostras apresentaram concentrações em conformidade com os limites legais. Entretanto, observaram-se excedências nas amostras das nascentes NAS_27_IT (0,30 mg L⁻¹), NAS_50_IT (0,78 mg L⁻¹) e NAS_96_IT (1,01 mg L⁻¹), ultrapassando o VMP de 0,2 mg L⁻¹ estabelecido para consumo humano e recreação.

Cabe ressaltar, contudo, que enquanto a fração total apresentou valores acima do limite em algumas nascentes, a fração dissolvida manteve-se em níveis relativamente baixos em todo o conjunto amostral, com destaque para a NAS_96_IT, que apresentou o valor mais elevado também nessa fração.

Apesar de os resultados estarem abaixo do limite para dessedentação animal e irrigação (5,0 mg L⁻¹), as excedências registradas em relação aos VMP's aplicáveis para consumo humano e à recreação são relevantes e indicam restrições para essas finalidades na ausência de avaliação sistemática e, quando necessário, tratamento prévio dessas águas.

Tabela 9- Resultados analíticos e VMP de referência (CONAMA nº 396/2008).

Adotado o VMP mais restritivo	Al	Sb	As	Ba	Be	Bo	Cd	Pb	Cl ⁻	Cu	C.T.	Cr	Fe	F ⁻
	mg L ⁻¹	mg L ⁻¹	mg L ⁻¹	mg L ⁻¹	mg L ⁻¹	mg L ⁻¹	mg L ⁻¹	mg L ⁻¹	mg L ⁻¹	mg L ⁻¹	U.F.C	mg L ⁻¹	mg L ⁻¹	mg L ⁻¹
VMP	0,2	0,005	0,01	0,7	0,004	0,5	0,005	0,01	250	0,2 *	1	0,05	0,3	1 *
NAS_01_IT	0,06	<0,001	<0,001	0,011	<0,002	<0,05	<0,001	<0,003	<1	<0,005	3	<0,01	0,17	<0,05
NAS_02_IT	0,04	<0,001	<0,001	<0,005	<0,002	<0,05	<0,001	<0,003	1,92	<0,005	<1	<0,01	<0,1	<0,05
NAS_20_IT	<0,02	<0,001	<0,001	0,007	<0,002	<0,05	<0,001	<0,003	<1	<0,005	67	<0,01	<0,1	<0,05
NAS_23_IT	<0,02	<0,001	<0,001	<0,005	<0,002	<0,05	<0,001	0,009	1,19	<0,005	3	<0,01	<0,1	<0,05
NAS_27_IT	0,02	<0,001	<0,001	0,144	<0,002	<0,05	<0,001	<0,003	<1	<0,005	<1	<0,01	6,2	<0,05
NAS_28_IT	0,05	<0,001	<0,001	0,016	<0,002	<0,05	<0,001	0,009	<1	<0,005	600	<0,01	<0,1	<0,05
NAS_59_IT	0,11	<0,001	<0,001	0,03	<0,002	<0,05	<0,001	0,008	<1	<0,005	<1	<0,01	3,52	<0,05
NAS_61_IT	<0,02	<0,001	<0,001	0,017	<0,002	<0,05	<0,001	<0,003	<1	<0,005	16	<0,01	<0,1	<0,05
NAS_69_IT	0,12	<0,001	<0,001	0,01	<0,002	<0,05	<0,001	<0,003	<1	<0,005	15	<0,01	<0,1	<0,05
NAS_70_IT	0,3	<0,001	<0,001	0,037	<0,002	<0,05	<0,001	<0,003	1,22	<0,005	71	<0,01	1,89	0,05
NAS_96_IT	0,14	<0,001	<0,001	0,056	<0,002	<0,05	<0,001	<0,003	<1	<0,005	1200	<0,01	<0,1	0,22
NAS_107_IT	0,04	<0,001	<0,001	0,018	<0,002	<0,05	<0,001	<0,003	<1	<0,005	<1	<0,01	<0,1	<0,05
NAS_108_IT	0,02	<0,001	<0,001	0,011	<0,002	<0,05	<0,001	<0,003	<1	<0,005	1	<0,01	0,42	<0,05
NAS_09_IT	0,78	<0,001	<0,001	<0,005	<0,002	<0,05	<0,001	<0,003	<1	<0,005	<1	<0,01	1,17	<0,05
NAS_10_IT	0,05	<0,001	<0,001	0,011	<0,002	<0,05	<0,001	<0,003	<1	<0,005	<1	<0,01	<0,1	<0,05
NAS_14_IT	0,05	<0,001	<0,001	0,019	<0,002	<0,05	<0,001	<0,003	<1	<0,005	4	<0,01	<0,1	<0,05
NAS_18_IT	0,09	<0,001	<0,001	0,009	<0,002	<0,05	<0,001	<0,003	<1	<0,005	2	<0,01	0,19	0,12
NAS_50_IT	0,03	<0,001	<0,001	0,008	<0,002	<0,05	<0,001	<0,003	<1	<0,005	77	<0,01	4,53	<0,05
NAS_31_IT	1,01	<0,001	<0,001	<0,005	<0,002	<0,05	<0,001	<0,003	<1	<0,005	<1	<0,01	0,23	<0,05
NAS_43_IT	0,1	<0,001	<0,001	0,017	<0,002	<0,05	<0,001	<0,003	<1	<0,005	<1	<0,01	<0,1	0,07
NAS_11_IT	0,14	<0,001	<0,001	0,014	<0,002	<0,05	<0,001	<0,003	<1	<0,005	<1	<0,01	<0,1	0,07
Valor mínimo	0,02	<0,001	<0,001	0,007	<0,002	<0,05	<0,001	0,008	1,19	<0,05	1	<0,01	0,17	0,05
Valor máximo	1,01	<0,001	<0,001	0,144	<0,002	<0,05	<0,002	0,009	1,92	<0,05	1200	<0,01	6,2	0,22

Legenda: C.T. – Coliformes termotolerantes; UFC – Unidade de coliformes fecais (UFC/1000mL). *Para maioria dos parâmetros, o VMP mais restritivo corresponde ao consumo humano, para Cu e F⁻, o limite mais restritivo é o de irrigação.

Fonte (Autor, 2025).

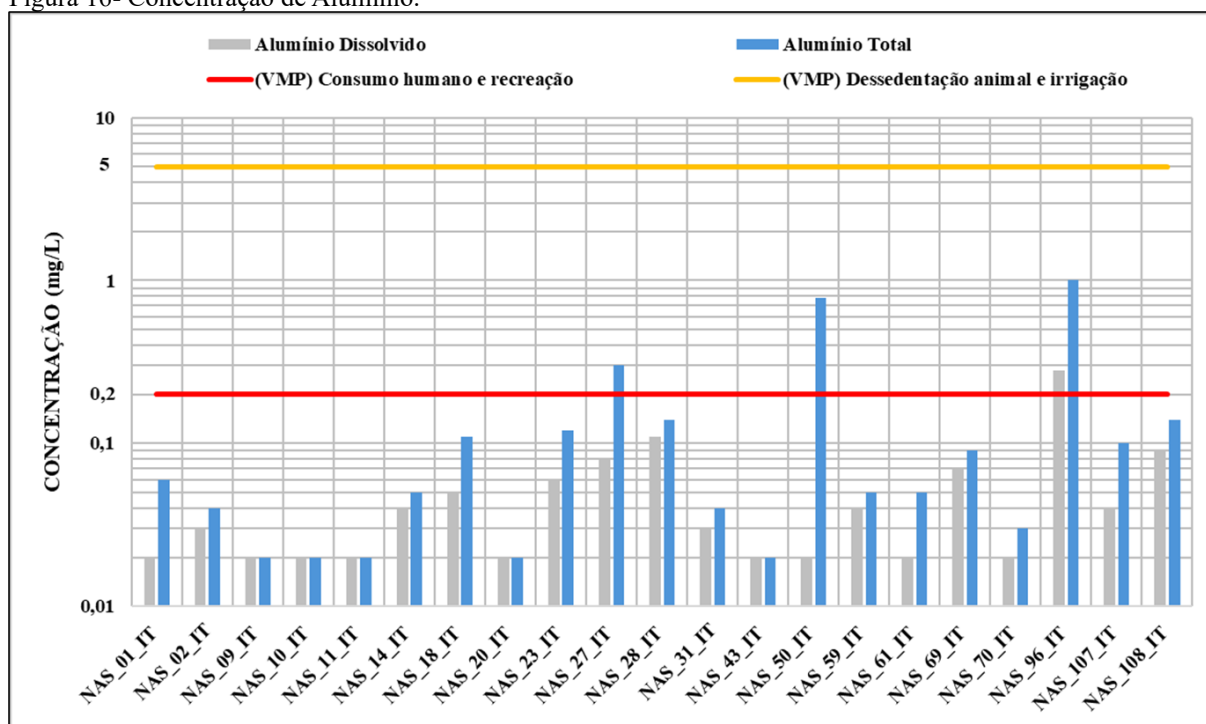
Tabela 10- Resultados analíticos e VMP de referência (CONAMA n° 396/2008).

Adotado o VMP mais restritivo	Mn	Hg	Mo	Ni	NO₃⁻	NO₂⁻	Ag	Se	Na	S.D.T	SO₄²⁻	U	V	Zn
	mg L⁻¹	mg L⁻¹	mg L⁻¹	mg L⁻¹	mg L⁻¹	mg L⁻¹	mg L⁻¹	mg L⁻¹	mg L⁻¹	mg L⁻¹	mg L⁻¹	mg L⁻¹	mg L⁻¹	mg L⁻¹
VMP	0,1*	0,001	70	0,02	10	1	0,1	0,01	200	1000	250	0,015	0,05	5*
NAS_01_IT	<0,02	<0,0002	<0,01	<0,01	0,2	0,03	<0,005	<0,001	2,13	13	<1	<0,0005	<0,01	<0,02
NAS_02_IT	0,05	<0,0002	<0,01	<0,01	0,08	0,02	<0,005	<0,001	3,36	16	1,08	<0,0005	0,01	<0,02
NAS_20_IT	<0,02	<0,0002	<0,01	<0,01	0,27	0,04	<0,005	<0,001	0,49	28	1,76	<0,0005	<0,01	<0,02
NAS_23_IT	<0,02	<0,0002	<0,01	<0,01	1,34	0,04	<0,005	<0,001	2,12	50	<1	<0,0005	<0,01	<0,02
NAS_27_IT	6,08	<0,0002	<0,01	<0,01	<0,02	0,03	<0,005	<0,001	1,56	30	<1	<0,0005	<0,01	<0,02
NAS_28_IT	0,02	<0,0002	<0,01	<0,01	0,22	0,03	<0,005	<0,001	1,29	13	<1	<0,0005	<0,01	<0,02
NAS_59_IT	0,11	<0,0002	<0,01	<0,01	0,06	0,03	<0,005	<0,001	1,23	18,8	<1	<0,0005	<0,01	<0,02
NAS_61_IT	<0,02	<0,0002	<0,01	<0,01	0,1	0,04	<0,005	<0,001	3,26	42,5	<1	<0,0005	<0,01	0,02
NAS_69_IT	<0,02	<0,0002	<0,01	<0,01	0,09	0,01	<0,005	<0,001	1,77	14	<1	<0,0005	<0,01	<0,02
NAS_70_IT	0,89	<0,0002	<0,01	<0,01	0,02	0,01	<0,005	<0,001	1,44	39,6	<1	<0,0005	<0,01	<0,02
NAS_96_IT	<0,02	<0,0002	<0,01	<0,01	3,36	0,04	<0,005	<0,001	3,1	61,5	<1	<0,0005	<0,01	0,02
NAS_107_IT	<0,02	<0,0002	<0,01	<0,01	0,53	0,03	<0,005	<0,001	0,65	<11	<1	<0,0005	<0,01	<0,02
NAS_108_IT	0,81	<0,0002	<0,01	<0,01	0,25	<0,01	<0,005	<0,001	1,73	22,5	1,02	<0,0005	<0,01	<0,02
NAS_09_IT	0,02	<0,0002	<0,01	<0,01	0,1	0,03	<0,005	<0,001	1,19	14	1,82	<0,0005	<0,01	<0,02
NAS_10_IT	<0,02	<0,0002	<0,01	<0,01	0,11	<0,01	<0,005	<0,001	1,56	<11	<1	<0,0005	<0,01	<0,02
NAS_14_IT	0,05	<0,0002	<0,01	<0,01	0,77	0,01	<0,005	<0,001	2,52	26,8	<1	<0,0005	<0,01	<0,02
NAS_18_IT	0,02	<0,0002	<0,01	<0,01	0,53	0,01	<0,005	<0,001	2,72	34,4	<1	<0,0005	<0,01	<0,02
NAS_50_IT	0,05	<0,0002	<0,01	<0,01	0,02	0,01	<0,005	<0,001	1,58	33,2	<1	<0,0005	<0,01	<0,02
NAS_31_IT	<0,02	<0,0002	<0,01	<0,01	0,07	0,03	<0,005	<0,001	1,78	<11	<1	<0,0005	<0,01	<0,02
NAS_43_IT	<0,02	<0,0002	<0,01	<0,01	0,09	0,03	<0,005	<0,001	3,29	38,8	<1	<0,0005	<0,01	<0,02
NAS_11_IT	<0,02	<0,0002	<0,01	<0,01	0,11	0,03	<0,005	<0,001	2,87	39,5	<1	<0,0005	<0,01	<0,02
Valor mínimo	0,02	<0,0002	<0,01	<0,01	0,02	0,01	<0,005	<0,001	0,49	13	1,02	<0,0005	0,01	0,02
Valor máximo	6,08	<0,0002	<0,01	<0,01	3,36	0,04	<0,005	<0,001	3,36	61,5	1,82	<0,0005	0,01	0,02

Legenda: SDT – Sólidos dissolvidos totais. *Para maioria dos parâmetros, o VMP mais restritivo corresponde ao consumo humano, para o Mn o mais restritivo é o de dessedentação animal e para o Zn é o de irrigação.

Fonte (Autor, 2025).

Figura 16- Concentração de Alumínio.



Fonte (Autor, 2025).

As concentrações de alumínio observadas (Figura 16) que extrapolam os limites estabelecidos para consumo humano e recreação, considerados os usos mais restritivos, demandam atenção do ponto de vista sanitário, sobretudo ao se considerar a possibilidade de uso futuro dessas águas.

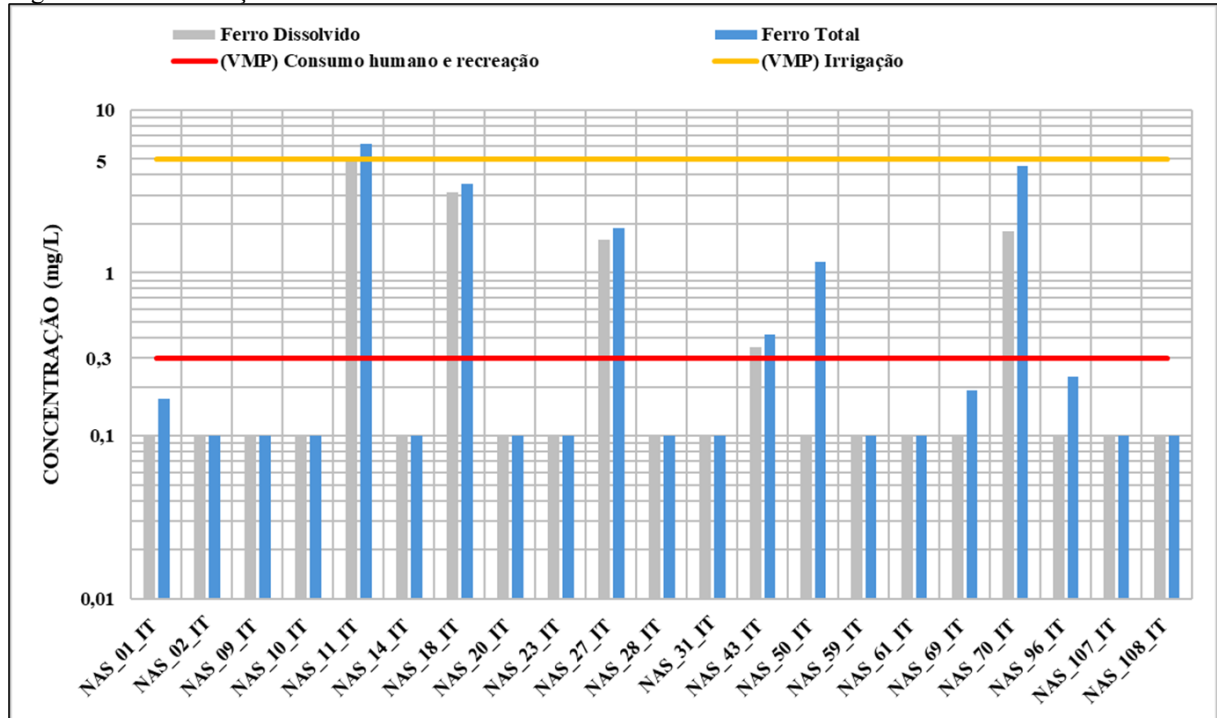
A Resolução CONAMA n° 396/2008 não estabelece VMP específico para Alumínio na irrigação. Contudo, segundo a Funasa (2014), concentrações elevadas desse metal podem causar fitotoxicidade, especialmente em solos com tendência à acidez, ao prejudicar o desenvolvimento radicular e a eficiência de nutrientes pelas plantas.

A Figura 17 apresenta os resultados de Ferro Total e Dissolvido em comparação com os (VMP's) definidos pela Resolução CONAMA. Observa-se que seis amostras apresentaram valores de Ferro Total acima do limite de $0,3 \text{ mg L}^{-1}$, estabelecido para consumo humano e recreação, com destaque para as NAS_11_IT ($6,2 \text{ mg L}^{-1}$), NAS_18_IT ($3,52 \text{ mg L}^{-1}$), NAS_27_IT ($1,89 \text{ mg L}^{-1}$), NAS_50_IT ($1,17 \text{ mg L}^{-1}$) e NAS_70_IT ($4,53 \text{ mg L}^{-1}$), cujas concentrações superaram significativamente o valor de referência.

De modo geral, a fração dissolvida apresentou, concentrações inferiores em relação à fração total. Cabe destacar que a Resolução CONAMA n° 396/2008 estabelece VMP apenas para o Ferro em sua fração total, ainda assim, observou-se que, em alguns casos, como das nascentes NAS_11_IT, NAS_18_IT e NAS-70_IT, os teores de Ferro Dissolvido também se mantiveram em patamares elevados.

No que tange ao uso para irrigação, cujo VMP é de $5,0 \text{ mg L}^{-1}$, apenas a nascente NAS_11_IT ultrapassou esse valor, enquanto as demais permaneceram em conformidade para esse uso. Cumpre destacar, por fim, que para a finalidade de dessedentação animal a Resolução CONAMA não estabelece valores de referência para o Ferro, restringindo, portanto, a análise comparativa aos usos de consumo humano, recreação e irrigação.

Figura 17- Concentração de Ferro.

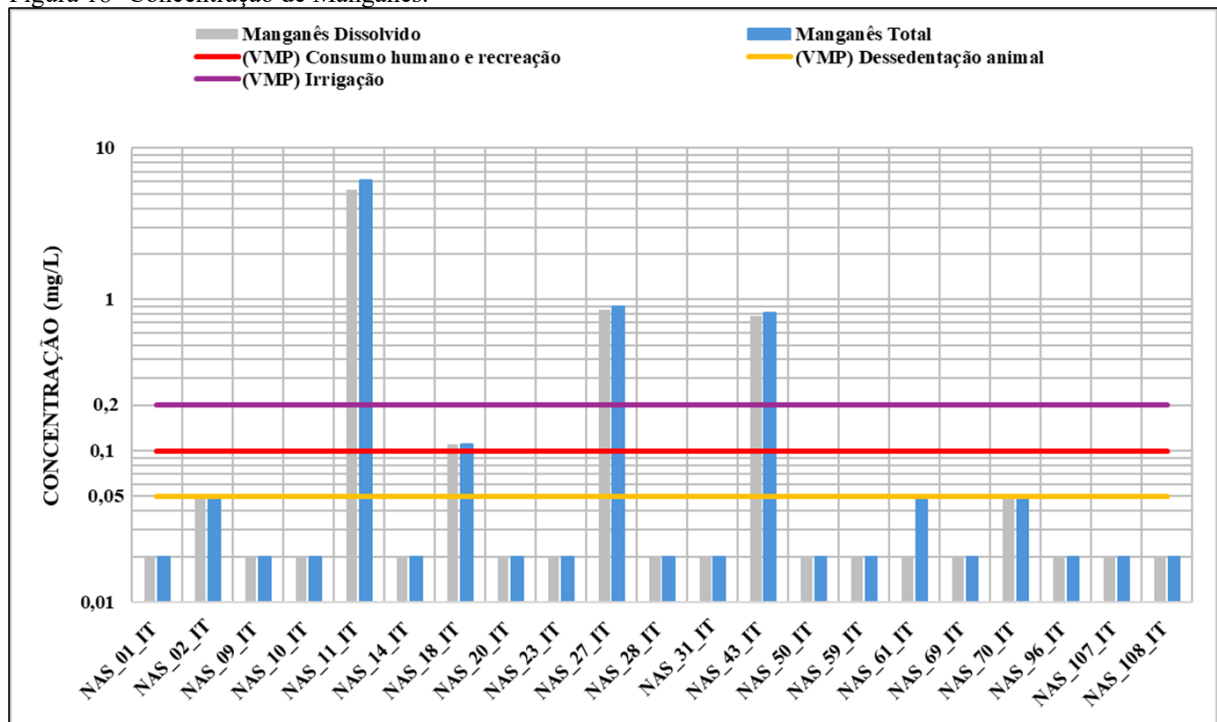


Fonte (Autor, 2025).

A Figura 18 apresenta os resultados das concentrações de Manganês Total e Dissolvido nas amostras, ressalta-se que a Resolução CONAMA n° 396/2008 não contempla a fração dissolvida.

Observa-se que, para este parâmetro, o VMP mais restritivo corresponde ao uso da água para dessedentação animal ($0,05 \text{ mg L}^{-1}$). No contexto do consumo humano e da recreação, cujo limite é de $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ verificou-se que quatro nascentes ultrapassaram os valores de referência: NAS_11_IT com o valor bem mais elevado ($6,08 \text{ mg L}^{-1}$), NAS_18_IT ($0,11 \text{ mg L}^{-1}$), NAS_27_IT ($0,89 \text{ mg L}^{-1}$) e NAS_43_IT ($0,81 \text{ mg L}^{-1}$). Quanto ao uso da água com a finalidade de irrigação, cujo VMP é de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$, três nascentes ultrapassaram o referido limite, destaque para a amostra da NAS_11_IT.

Figura 18- Concentração de Manganês.



Fonte (Autor, 2025).

Quanto ao Ferro e Manganês, de acordo com a Funasa (2014), águas de diversas regiões no Brasil, incluindo Minas Gerais, podem apresentar teores naturalmente elevados desses constituintes em função das características geoquímicas das bacias de drenagem. Embora, nas concentrações usualmente encontradas em águas naturais, não representem riscos diretos à saúde (Funasa, 2014), valores elevados desses constituintes podem ocasionar problemas de ordem organoléptica, como alterações de coloração, odor e sabor. Tais efeitos reduzem a aceitabilidade da água para usos de contato primário, como o abastecimento doméstico, podendo causar manchas em roupas e louças sanitárias. Além disso, em concentrações elevadas pode favorecer a formação de incrustações em tubulações e equipamentos hidráulicos utilizados na irrigação (Almeida *et al.*, 2019).

Conforme Soares Júnior (2023), a origem das concentrações de Alumínio, Ferro e Manganês nas águas da região de Itabira é complexa, uma vez que esses constituintes podem derivar tanto das características geológicas naturais quanto da intensificação de processos antrópicos. Nesse sentido, o autor ainda destaca que a definição da origem dessas concentrações, requer estudos detalhados e sistemáticos, incluindo a definição de valores de referência de *baseline* e *background* geoquímicos.

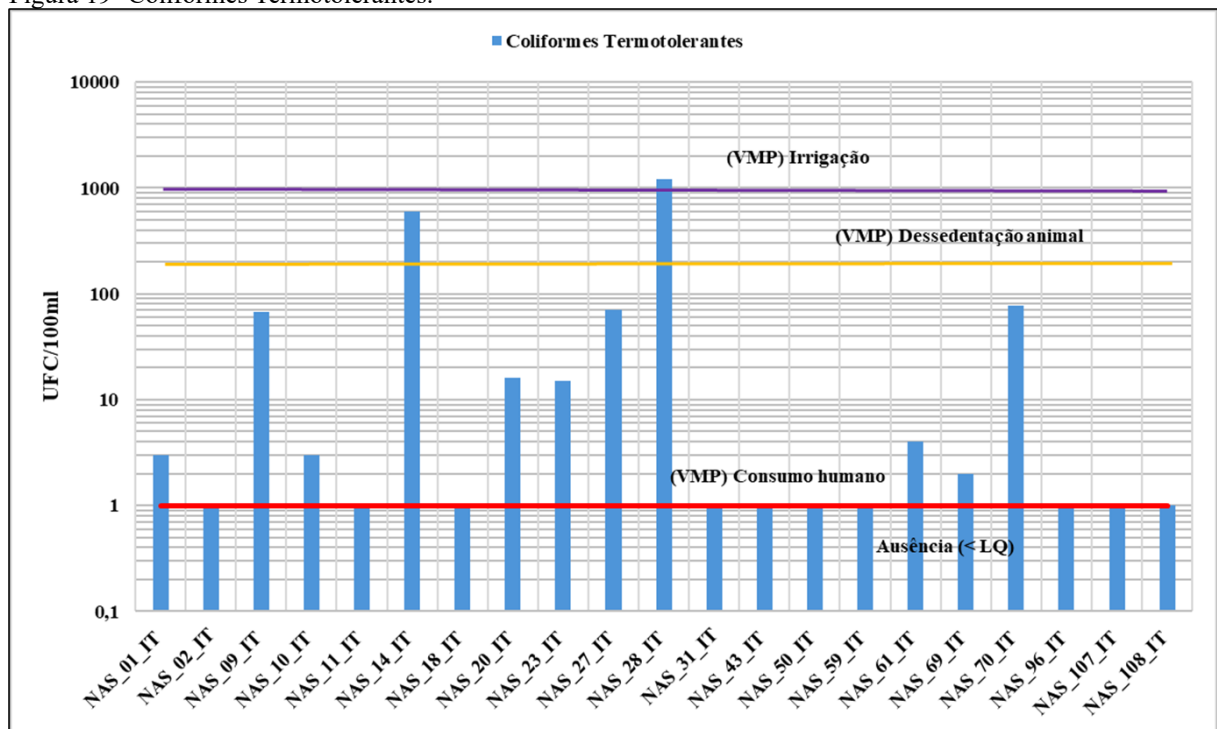
A Figura 19 apresenta os resultados de Coliformes Termotolerantes nas águas das nascentes avaliadas. Das 21 amostras analisadas, 11 apresentaram presença desses microrganismos, em desacordo com a Resolução CONAMA n° 396/2008, que estabelece a

ausência em 100 mL de amostra como requisito para consumo humano, 200/100 mL para dessedentação animal e 1000/100 mL em recreação.

A presença de coliformes termotolerantes indica comprometimento da qualidade sanitária da água, uma vez que águas destinadas ao consumo humano devem estar livres de microrganismos indicadores de contaminação fecal (Cetesb e ANA, 2023; Brasil, 2008). A Portaria n° 2.914/2011 do Ministério da Saúde também estabelece a ausência de coliformes em 100 mL de amostra para água potável (Brasil, 2011).

Considerando o contexto periurbano das áreas onde se inserem as nascentes, caracterizadas pela presença de pastagens e ocupação antrópica, a ocorrência desses microrganismos pode estar associada tanto a fontes antrópicas quanto à contribuição natural da fauna silvestre. A presença desses indicadores microbiológicos impõe restrições ao uso da água, uma vez que pode atuar como veículo de transmissão de agentes causadores de doenças infecciosas (Cetesb e ANA, 2023).

Figura 19- Coliformes Termotolerantes.



Fonte (Autor, 2025).

6 CONCLUSÃO

Diante do conjunto de análises realizadas, conclui-se que este estudo alcançou o objetivo de caracterizar a hidroquímica e a qualidade das águas de nascentes na região de Itabira.

O estudo reforça a importância de considerar não apenas o contexto geológico de superfície, mas também as interações água-rocha em profundidade, que influenciam diretamente na composição hidroquímica.

A classificação das águas por meio dos diagramas de *Piper* e *Stiff* evidenciou a predominância do íon de Bicarbonato como principal ânion em todas as nascentes, enquanto os cátions apresentaram maior variabilidade entre os pontos analisados.

A análise estatística multivariada permitiu identificar agrupamentos de amostras com maior similaridade química e indicou que, embora exista certo alinhamento entre os padrões hidroquímico e as litologias, essa relação não é absoluta. Esse comportamento é coerente com a literatura, que aponta que a composição da água subterrânea pode refletir não apenas a litologia aflorante, mas também a processos hidrogeoquímicos ao longo da circulação subterrânea.

A avaliação comparativa com os valores máximos permitidos pela legislação vigente evidenciou que a maioria dos parâmetros analisados se encontra em conformidade com os limites estabelecidos para distintos usos da água. Entretanto, foram identificadas algumas não conformidades pontuais, especialmente para Ferro, Manganês, Alumínio e Coliformes termotolerantes, as quais, embora não generalizadas, indicam a necessidade de atenção quanto a destinação dessas águas, sobre tudo para consumo humano e outros usos mais restritivos, bem como a importância de avaliações complementares e, quando aplicável, adoção de medidas de controle e tratamento.

Tendo em vista que este estudo considerou apenas uma campanha de amostragem, sugere-se a implementação de um programa de monitoramento sistemático das nascentes estudadas o que permitirá acompanhar a evolução ao longo do tempo, bem como possibilitará comparações mais precisas em relação a qualidade das águas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. B. B.; LIMA, M. R. P.; SANTOS, Y. T. C.; MOREIRA, Y. W. N.; SILVA, P. B. A. Concentração de ferro e manganês em águas de abastecimento no município de Crato, Ceará: caracterização e proposta de tratamento. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 145-152, abr./jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/ras.v33i2.29520>. Acesso em: 03 jan. 2026.

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 24. ed. Washington, DC: APHA, 2023.

AUTODESK. **AutoCAD**: versão 2020. San Rafael: Autodesk, 2020

BARBOSA, D. M. D. **Assinatura hidroquímica de unidades hidrogeológicas da porção norte da APA Carste de Lagoa Santa e entornos, Minas Gerais, Brasil**. 2024. 171 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1843/69913>. Acesso em: 18 dez. 2024.

BARBOSA, M. D.; GUIMARÃES, A. Z.; PAULA, R. S.; VELÁSQUEZ, L. N. M. Análise multivariada de dados hidrogeoquímicos para identificação de unidades aquíferas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 25., 2023, Aracaju. **Anais [...]**. Porto Alegre: ABRHidro, 2023. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=15325>. Acesso em: 20 dez. 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008**. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Brasília, DF: CONAMA, 2008. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?res_id=561. Acesso em: 05 dez. 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2011. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html. Acesso em: 03 jan. 2026.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Águas subterrâneas e o ciclo hidrológico**. Brasília, DF: MMA, 2015. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/component/k2/item/420>. Acesso em: 4 dez. 2024.

CETESB; ANA. **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos**. 2. ed. São Paulo: Cetesb; Brasília: ANA, 2023. 456 p. il. ISBN 9786588101506. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/acervo/detalhe/102373. Acesso em: 05 dez. 2024.

COLLISCHONN, W; DORNELLES, F. **Hidrologia**: para engenharia e ciências ambientais. Porto Alegre: ABRHidro, 2015. v. 1, 346 p.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrologia subterrânea**. 2. ed. Barcelona: Ediciones Omega, 1996. 2 v. 2350 p.

DORR, J. V. N. **Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero**. Washington: USGS; Rio de Janeiro: DNPM, 1969. (Professional Paper 641-A).

ENDO, I.; LUCIANO, A. G.; CASTRO, P. T. A. **Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos**. Ouro Preto: UFOP, 2019. 480 p. Inclui Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, escala 1:125.000.

ESRI. **ArcGIS Desktop**: release 10.8. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2020.

FUNASA. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAs**. Brasília, DF: Funasa, 2014. 112 p. Disponível em: <https://repositorio.funasa.gov.br/handle/123456789/491>. Acesso em: 03 jan. 2026.

GASTMANS, D. **Hidrogeologia e hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani na porção ocidental da Bacia Sedimentar do Paraná**. 2007. 250 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2007. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/102870>. Acesso em: 18 dez. 2024.

GÓMEZ, L. N. G. **Investigação hidrogeoquímica do processo de salinização aplicada ao sistema aquífero Dunas-Pecém, Ceará**. 2020. 113 f. Tese (Doutorado em Física) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/56084>. Acesso em: 21 jun. 2025.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688 p.

HAMMA, B.; ALODAH, A.; BOUAICHA, F.; HAMAIIDI-CHERGUI, A.; EL MEZOUAR, M.; HAMAIIDI, M. **Hydrochemical assessment of groundwater using multivariate statistical methods and water quality indices (WQIs)**. Applied Water Science, [S. l.], v. 14, n. 33, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13201-023-02084-0>. Acesso em: 05 jun. 2025.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V.; MARCELLINI, S. S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil**. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2019. 63 p. (Coleção Ciências da Terra). Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003000444>. Acesso em: 20 dez. 2024.

HOUNSLOW, A. W. **Water quality data: analysis and interpretation**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1995. 381 p.

LEITE, C. M. C.; WENDLAND, E.; GASTMANS, D. Caracterização hidrogeoquímica de águas subterrâneas utilizadas para abastecimento público na porção nordeste do Sistema

Aquífero Guarani. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 1, p. 29-43, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-415220190087>. Acesso em: 08 dez. 2024.

LOGAN, J. **Interpretação de análises químicas d'água**. Recife: U.S. Agency for International Development, 1965. 67 p.

MENDONÇA, F. C.; ALMEIDA, R. S.; OLIVEIRA, D. F.; SANTOS, A. G. Avaliação da qualidade de água para consumo humano em fonte subterrânea na região do Recôncavo da Bahia. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 345-353, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/ras.v33i4.29751>. Acesso em: 5 dez. 2024.

MENEGASSE, L. N.; OLIVEIRA, F. R.; MOURÃO, M. A. A.; DUARTE, U.; CASTRO, R. E.; DINIZ, A. M. A.; ELMIRO, M. A. T.; PEREIRA, P. B.; DINI, H. N. Hidroquímica das águas subterrâneas do Médio Jequitinhonha, Minas Gerais, Brasil. **Revista Latino-Americana de Hidrogeologia**, [S. l.], n. 3, p. 49-58, 2003. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/hidrogeologia/article/view/2636>. Acesso em: 20 set. 2025.

MONTEIRO, A. B.; CORREIA FILHO, F. L.; FREIRE, P. K. C.; SOUSA, N. G. de; SOARES FILHO, A. R. Análise estatística multivariada de dados hidroquímicos do Aquífero Cabeças - Sudeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba - PI. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16., 2010, São Luís. **Anais [...]**. São Paulo: ABAS, 2010. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22878>. Acesso em: 05 jun. 2025.

MOURÃO, M. A. A. **Caracterização hidrogeológica do aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG**. 2007. 297 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/ENG-D-7AJNZE>. Acesso em: 8 nov. 2025.

OLIVEIRA, L. A. **O sistema aquífero Guarani no Estado de Goiás: distribuição, caracterização hidrodinâmica, hidroquímica, composição isotópica e CFCs**. 2009. 189 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/8934>. Acesso em: 03 dez. 2024.

PADILHA, A. L.; VIEIRA, F. W. R.; HEINECK, C. A. M. **Itabira, Folha SE.23-Z-D-IV – Estado de Minas Gerais: mapa geológico, escala 1:100.000**. Brasília: CPRM, 2000. 1 mapa. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/5662>. Acesso em: 17 dez. 2024.

PAULA, R. S.; MESQUITA, D. C.; DANTAS, J. C. M.; GUERRA, K. J. Caracterização hidrogeoquímica e isotópica das águas na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero – MG e sua correlação com a localização em cota das unidades aquíferas deste sistema. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 140-153, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/ras.v32i1.28970>. Acesso em: 18 dez. 2024.

PIPER, A. M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. **Transactions, American Geophysical Union**, Washington, DC, v. 25, n. 6, p. 914-928, 1944. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>. Acesso em: 10 jun. 2025.

RIBEIRO, C. G. **Compartimentação dos fluxos do sistema hidrogeológico cárstico do Grupo Bambuí a partir dos isótopos ^2H , ^{18}O e ^3H na região de Lagoa Santa, Minas Gerais**. 2020. 269 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/33956>. Acesso em: 21 dez. 2024.

ROSSI, D. Q.; ENDO, I.; GABRIEL, E. G. Structural framework of the iron district of Itabira, Iron Quadrangle, Minas Gerais. **REM – International Engineering Journal**, Ouro Preto, v. 72, n. 1, p. 39-45, jan./mar. 2019.

SANTOS, A. C. Noções de hidroquímica. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Fortaleza: CPRM, 2008. p. 325-357.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (coord.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 35-40.

SOARES JÚNIOR, A. G. **Baseline geoquímico de alumínio, ferro e manganês em águas superficiais do município de Itabira – MG**. 2023. 81 f. Dissertação (Mestrado em Uso Sustentável dos Recursos Naturais em Regiões Tropicais) – Instituto Tecnológico Vale, Belém, 2023. Disponível em: <https://repositorio.itv.org/items/6a032420-e995-455a-a010-f199c700101c>. Acesso em: 22 set. 2025.

STIFF, H. A. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. **Journal of Petroleum Technology**, [S. l.], v. 3, n. 10, p. 15-17, out. 1951. Disponível em: <https://doi.org/10.2118/951376-G>. Acesso em: 25 jun. 2025.

SZIKSZAY, M. Geoquímica das águas. **Boletim do Instituto de Geociências**, São Paulo, n. 5, p. 1-166, 1993.

VIEIRA, L. C. M.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; BORBA, R. P. Hidrogeoquímica como ferramenta para o reconhecimento de aquíferos em lacunas de perfis litológicos de poços tubulares. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 34, n. 2, p. 105-120, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.29764>. Acesso em: 20 dez. 2024.