



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



Ana Carolina de Souza Lima

**MAPEAMENTO HIDROQUÍMICO DE METAIS E ANÁLISE DA
QUALIDADE DAS ÁGUAS DO MUNICÍPIO DE MARIANA-MG**

MONOGRAFIA nº 544

Ouro Preto
Setembro
2025

Ana Carolina de Souza Lima

**MAPEAMENTO HIDROQUÍMICO DE METAIS E ANÁLISE DA
QUALIDADE DAS ÁGUAS DO MUNICÍPIO DE MARIANA-MG**

Monografia do Projeto Final de Curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Projeto final de Curso II - GEO144, ano 2025/1.

Orientadora: Profa. Dra. Adivane Terezinha Costa

OURO PRETO

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

L732m Lima, Ana Carolina de Souza.

Mapeamento hidroquímico e análise da qualidade das águas do município de Mariana-MG. [manuscrito] / Ana Carolina de Souza Lima. - 2025.

125 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Adivane Terezinha Costa.

Coorientadora: Marcela Barcelos Barbosa.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Hidroquímica. 2. Análise quantitativa - Parâmetros inorgânicos. 3. Água - Qualidade - Medição. I. Costa, Adivane Terezinha. II. Barbosa, Marcela Barcelos. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 556.114

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Ana Carolina de Souza Lima

Mapeamento Geoquímico de Metais e Análise da Qualidade das Águas do Município de Mariana - MG

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Geóloga

Aprovada em 10 de abril de 2025

Membros da banca

[Doutorado] - Adivane Terezinha Costa - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Doutorado] - Lucas Pereira Leão - (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Mestrado] - Pedro Henrique Assunção - (Universidade Federal de Minas Gerais)

[Adivane Terezinha Costa), orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/09/2025



Documento assinado eletronicamente por **Adivane Terezinha Costa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/11/2025, às 11:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1014512** e o código CRC **A4E21D40**.

AGRADECIMENTOS

A construção deste trabalho só foi possível pelas pessoas que ajudaram e me incentivaram neste processo. À Adi, pela orientação, humanidade e paciência. À Marcela, por acreditar e me ensinar tanto. À MDGEO e colegas de trabalho, por serem parte do meu caminho profissional e por mostrarem o quanto se aprende geologia na prática. À minha mãe, por me propor condições de vivenciar este percurso na graduação.

Dedico este estudo à população de Mariana, mesmo aquela não atingida, lida diariamente com as intempéries naturais e antrópicas do seu território.

RESUMO

O mapeamento hidroquímico e o monitoramento da qualidade das águas superficiais são ferramentas fundamentais para a gestão dos recursos hídricos e a preservação ambiental, uma vez que a investigação das características químicas hídricas proporciona um diagnóstico mais preciso da qualidade da água. O município de Mariana, Minas Gerais, possui uma extensa área territorial com diversos distritos pertencentes à Bacia do Rio Doce, contendo drenagens importantes para a região. A cidade histórica é marcada por uma intensa atividade da mineração de ferro, devido ao seu contexto geológico do quadrilátero ferrífero. Desta forma, o presente trabalho busca através do tratamento de dados e mapeamento hidroquímico, diagnosticar e sinalizar as localidades com concentrações de elementos maiores e traços inorgânicos superior à Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021 e a Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, nas águas superficiais e Resolução CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008 para águas subterrâneas. Além de um mapeamento hidrológico e processamento de dados hidroquímicos, o estudo aborda, de maneira interdisciplinar, a área da Geologia Médica, com a descrição de doenças ocasionadas pela ingestão de alguns metais. Para isso, foram realizados o tratamento dos dados hidroquímicos, análises estatísticas quantitativas e a interpretação qualitativa dos resultados. Para isso foi feito o tratamento dos dados hidroquímicos e estatística na análise quantitativa, e interpretação dos dados na análise qualitativa. Dos 58 pontos analisados para os parâmetros inorgânicos, 14 destes apresentaram anomalias para os metais Alumínio (Al), Antimônio (Sb), Ferro (Fe), Manganês (Mn). A análise desses dados foi associada à geologia local e aos aspectos fisiográficos observados em campo. Com isso, este trabalho possui grande importância para a população de todo o território de Mariana, pois com os resultados procura-se elucidar a qualidade da água da sede e da área rural do município.

Palavras-chave: hidroquímica, elementos inorgânicos, Mariana, qualidade das águas

ABSTRACT

Hydrochemical mapping and monitoring of surface water quality are fundamental tools for water resource management and environmental preservation, as the investigation of water's chemical characteristics provides a more accurate assessment of its quality. The municipality of Mariana, located in the state of Minas Gerais, Brazil, encompasses a large territorial area with several districts within the Doce River Basin, containing important drainage systems for the region. This historic city is characterized by intense iron mining activity due to its geological setting within the Iron Quadrangle. Therefore, this study aims, through data processing and hydrochemical mapping, to diagnose and identify areas with concentrations of major elements and inorganic trace elements that exceed the limits established by Ordinance GM/MS No. 888 of May 4, 2021, CONAMA Resolution No. 357 of March 17, 2005 (for surface waters), and CONAMA Resolution No. 396 of April 3, 2008 (for groundwater). In addition to hydrological mapping and hydrochemical data processing, the study adopts an interdisciplinary approach by incorporating Medical Geology, with a description of diseases caused by the ingestion of certain metals. To achieve this, hydrochemical data were processed and subjected to quantitative statistical analysis as well as qualitative interpretation. Among the 58 sampling points analyzed for inorganic parameters, 14 showed anomalies in the concentrations of Aluminum (Al), Antimony (Sb), Iron (Fe), and Manganese (Mn). The analysis of these anomalous values was correlated with the local geology and physiographic aspects observed in the field. This study is of great importance to the population of the entire municipality of Mariana, as the results aim to clarify the water quality conditions in both urban and rural areas of the region.

Keywords: hydrochemistry, inorganic elements, Mariana, water quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização e vias de acesso do município de Mariana. Fonte: Google Satélite, 2023.	14
Figura 2 - Fotos do processo de coleta e amostragem da água.	15
Figura 3 - Exemplo de boxplot. Fonte: Rodrigues & Nalini Júnior (2009).	17
Figura 4 - Ciclo Hidrológico. Fonte: Página da revista TAE especializada em tratamento de águas e efluentes. Disponível em: < https://www.revistatae.com.br/Artigo/166/Água-superficial-e-subterranea >. Acesso em 3 de julho de 2023.	18
Figura 5 - Bacia do Rio Doce Regional. Fonte: PIRH,2010.	32
Figura 6 - Mapa de localização das bacias e sub-bacias do município de Mariana, além dos distritos. Fonte: Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias e sub-bacias (Souza 2005).	34
Figura 7 - Mapa geológico simplificado para o Cráton São Francisco com destaque para o Quadrilátero Ferrífero (Modificado de Alkmim & Marshak 1998).	35
Figura 8 - Coluna estratigráfica do quadrilátero ferrífero. Fonte: Alkmim & Marshak (1998).	38
Figura 9 - Mapa geológico local do território de Mariana, MG. Base: Mapa geológico de Minas Gerais (1:1.000.000) GEOSBG (2023); Hidrografia (FABDEM 2023).	39
Figura 10 - Mapa hidroquímico do elemento Ferro em amostragens na Bacia do Rio Doce (Viglio, 2016).	42
Figura 11 - Pontos amostrados e as bacias e sub-bacias do município de Mariana-MG. Fonte: Bacias (Souza 2005).	45
Figura 12 - Mapa geológico local com os pontos amostrados. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais 1:1.000.000 e Folha Mariana.	46
Figura 13 - Mapa de caracterização da Bacia Rio Gualaxo do Sul. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais 1:1.000.000.	49
Figura 14 - Mapa de caracterização da Bacia Ribeirão do Carmo. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais 1:1.000.000.	57
Figura 15 - Mapa de caracterização da Bacia Rio Gualaxo do Norte. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais 1:1.000.000.	60
Figura 16 - Mapa de caracterização da Sub-bacia do Rio Piracicaba. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais 1:1.000.000.	62
Figura 17 - Mapa de caracterização da Sub-bacia do Córrego Águas Claras. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais 1:1.000.000.	64
Figura 18 - Mapa de caracterização da Sub-bacia do Ribeirão Cachoeira do Brumado. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais 1:1.000.000.	66

Figura 19 - Gráfico com boxplots por bacia e sub-bacia do parâmetro Condutividade Elétrica (COND).	70
Figura 20 - Mapa Hidroquímico da Condutividade elétrica e os pontos amostrados. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais (1:1.000.000); Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias (Souza 2005).	71
Figura 21 : Gráfico com boxplots por bacia e sub-bacia do parâmetro Resistividade elétrica. .	73
Figura 22 - Mapa hidroquímico do parâmetro Resistividade e os pontos amostrados. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais (1:1.000.000); Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias (Souza 2005).	74
Figura 23 - Gráfico com boxplots por bacia e sub-bacia do parâmetro (TDS).	77
Figura 24 - Mapa hidroquímico do parâmetro TDS e os pontos amostrados. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais (1:1.000.000) GEOSBG (2023); Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias (Souza 2005).	78
Figura 25 - Gráfico com boxplots por bacia e sub-bacia do parâmetro (pH).	81
Figura 26 - Mapa hidroquímico do parâmetro pH e os pontos amostrados. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais (1:1.000.000) GEOSBG (2023); Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias (Souza 2005).	82
Figura 27 - Gráfico com boxplots por bacia e sub-bacia do parâmetro Temperatura.	85
Figura 28 - Mapa hidroquímico do parâmetro Temperatura e os pontos amostrados. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais (1:1.000.000) GEOSBG (2023); Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias e sub-bacias (Souza 2005).	86
Figura 29 - Gráfico com boxplots por bacia e sub-bacia do elemento Alumínio.	93
Figura 30 - Mapa hidroquímico do elemento Alumínio (Al) e os pontos anômalos. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais (1:1.000.000) GEOSBG (2023); Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias e Sub-bacias (Souza 2005).	94
Figura 31 - Gráfico com boxplots por bacia e sub-bacia do elemento Antimônio (Sb) em mg/L.	97
Figura 32 - Mapa hidroquímico do elemento Antimônio (Sb) e o pontos anômalo. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais (1:1.000.000) GEOSBG (2023); Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias e Sub-bacias (Souza 2005).	98
Figura 33 - Gráfico com boxplots por bacia e sub-bacia do elemento Ferro.	103
Figura 34 - Mapa hidroquímico do elemento Ferro (Fe) e os pontos anômalos. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais (1:1.000.000) GEOSBG (2023); Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias e Sub-bacias (Souza 2005).	104
Figura 35 - Gráfico com boxplots por bacia e sub-bacia do elemento Manganês.	108
Figura 36 - Mapa hidroquímico do elemento Manganês (Mn) e o ponto anômalo. Fonte: Mapa	

geológico de Minas Gerais (1:1.000.000) GEOSBG (2023); Hidrografia (FABDEM 2023);	
Bacias e Sub-bacias (Souza 2005).....	109
Figura 37 - Mapa hidroquímico geral dos elementos Alumínio (Al), Antimônio (Sb), Ferro	
(Fe) e Manganês (Mn) e o ponto anômalo. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais	
(1:1.000.000) GEOSBG (2023); Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias e Sub-bacias (Souza	
2005).....	111
Figura 38 - Gráfico com os boxplots dos elementos Alumínio, Antimônio, Ferro e Manganês.	
.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Legislação ambiental no Brasil ao longo do século XX. Fonte: Von Sperling (1998).	19
Tabela 2 -Tabela padrão de potabilidade da água para metais. Fonte: CONAMA 357/05.	22
Tabela 3 - Tabela padrão de potabilidade da água para metais. Fonte: Anexo 9, Portaria 888/21.	23
Tabela 4 - Tabela parâmetros inorgânicos com maior probabilidade de ocorrência em águas subterrâneas, seus respectivos Valores Máximos Permitidos (VMP). Fonte: Anexo I, CONAMA 396/08.	24
Tabela 5 - Descrição geral dos pontos da Bacia Rio Gualaxo do Sul.	48
Tabela 6 - Descrição geral dos pontos na Bacia do Ribeirão do Carmo.	51
Tabela 7 - Descrição geral dos pontos na Bacia Rio Gualaxo do Norte.....	59
Tabela 8 - Descrição geral dos pontos na Sub-bacia do Rio Piracicaba.....	61
Tabela 9 - Descrição geral dos pontos na Sub-bacia do Córrego Águas Claras.....	63
Tabela 10 - Descrição geral dos pontos na Sub-bacia do Ribeirão Cachoeira do Brumado.	65
Tabela 11 - Dados aferidos em campo de Condutividade Elétrica (COND) por bacia, sub-bacia e ponto.	67
Tabela 12 - Dados aferidos em campo do parâmetro Resistividade (Ωm) por bacia, sub-bacia e ponto.	71
Tabela 13 - Dados aferidos em campo do parâmetro TDS por bacia e sub-bacia e ponto.	75
Tabela 14 - Dados aferidos em campo do parâmetro pH por bacia e sub-bacia e ponto.....	78
Tabela 15 - Dados aferidos em campo do parâmetro Temperatura por bacia e sub-bacia e ponto.	83
Tabela 16 - Dados compilados do parâmetro alumínio.	90
Tabela 17 - Dados compilados do elemento Antimônio.	95
Tabela 18 - Dados compilados do parâmetro Ferro (Fe).	101
Tabela 19 - Dados compilados do elemento Manganês (Mn).	106

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Apresentação	12
1.2	Justificativa do Estudo.....	12
1.3	Objetivos.....	13
1.4	Localização e vias de acesso.	14
1.5	Materiais e Métodos	14
1.5.1	Revisão Bibliográfica	14
1.5.2	Etapa de amostragem	15
1.5.3	Análise laboratorial hidroquímica.....	15
1.5.4	Análise quantitativa e tratamento dos dados	16
1.5.5	Análise qualitativa.....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	BACIAS HIDROGRÁFICAS, INTERAÇÕES ENTRE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS	18
2.2	ASPECTOS LEGAIS DAS ÁGUAS NO BRASIL	18
2.3	ELEMENTOS QUÍMICOS MENORES E TRAÇO	25
2.4	GEOLOGIA MÉDICA	27
3	GEOLOGIA, HIDROGRAFIA E GEOQUÍMICA	32
3.1	HIDROGRAFIA.....	32
3.2	GEOLOGIA REGIONAL	35
3.3	GEOLOGIA LOCAL	38
3.4	GEOQUÍMICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.....	41
4	RESULTADOS E DICUSSÕES	45
4.1	Descrição e apresentação geral dos pontos	45
4.1.1	Bacia Rio Gualaxo do Sul	48

4.1.2 Bacia do Ribeirão do Carmo	51
4.1.3 Bacia do Rio Gualaxo do Norte	59
4.1.4 Sub-bacia do Rio Piracicaba	61
4.1.5 Sub-bacia do Córrego Águas Claras	63
4.1.6 Sub-bacia do Ribeirão Cachoeira do Brumado	65
4.2 Resultados dos parâmetros medidos em campo	67
4.2.1 Condutividade Elétrica - COND ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	67
4.2.2 Resistividade ($\mu\Omega$)	71
4.2.3 Total de Sólidos Dissolvidos - TDS (ppm)	74
4.2.4 Potencial Hidrogeniônico (pH)	78
4.2.5 Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	82
4.2.6 Discussão geral dos resultados em campo	86
4.3 Resultados das análises laboratoriais	89
4.3.1 Alumínio (Al)	90
4.3.2 Antimônio (Sb)	95
4.3.3 Ferro (Fe)	100
4.3.4 Manganês (Mn)	105
4.3.5 Discussão geral das análises laboratoriais	111
5 CONCLUSÃO	116
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
APÊNDICE(S)	124

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

O município de Mariana, localizado no estado de Minas Gerais, é conhecido por suas importantes reservas de minerais metálicos e não metálicos, bem como pela intensa atividade minerária. O quadrilátero ferrífero é uma região geológica com grande concentração de rochas ricas em ferro que abriga complexos minerários altamente produtivos, com destaque para a extração de minério de ferro. Além do seu centro urbano, a cidade é composta por vários distritos e subdistritos na zona rural. Com uma extensa área territorial, Mariana contém várias sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Rio Doce, que é usada para o abastecimento público.

Diante desse contexto, torna-se essencial o estudo sobre as concentrações naturais dos elementos químicos das águas superficiais dessa região, uma vez que ela é diretamente impactada pela intensa atividade minerária em sua área rural. Diversas pesquisas já foram conduzidas na região, com foco em sub-bacias específicas onde se concentram atividades de mineração, como a sub-bacia do rio Gualaxo do Norte (Costa et al. 2003) e a contaminação de arsênio no distrito de Passagem de Mariana (Mendes 2012). No entanto, observa-se uma lacuna em estudos que abordem de forma abrangente a hidroquímica das águas em todas as sub-bacias que compõem o território do município de Mariana.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo principal realizar o mapeamento hidroquímico e avaliar a qualidade das águas no município de Mariana. Para tanto, foram coletadas amostras de água em 58 pontos distribuídos por todo o município, incluindo seus distritos. A análise quantitativa dos parâmetros físico-químicos foi realizada com base na Portaria nº 888 GM/MS, de 4 de maio de 2021, e na Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005 para águas superficiais, e Resolução CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008 para águas subterrâneas. A partir dos resultados obtidos, foram gerados mapas hidroquímicos, permitindo a discussão dos valores não conformes e sua possível relação com a geologia local e/ou com as atividades antrópicas desenvolvidas na região.

1.2 Justificativa do Estudo.

De acordo com dados do IBGE (2024), o município de Mariana ocupa uma extensa área territorial de 1.194,208 km², sendo a maior parte composta por zonas rurais, onde se destacam fatores de grande relevância para o estudo hidroquímico. Entre esses fatores, estão: (1) uma rede hidrográfica abundante, com destaque para a Bacia do Rio Doce, principal fonte de abastecimento da região; (2) a composição natural de elementos inorgânicos presentes nas

litologias do Quadrilátero Ferrífero, que influenciam diretamente a qualidade das águas; e (3) a intensa atividade antrópica, especialmente a mineração, que historicamente movimenta a economia local, mas também gera impactos ambientais significativos. Diante desse cenário, torna-se essencial atentar para os recursos hídricos da região, buscando uma maior compreensão da qualidade da água consumida pela população urbana e rural de Mariana.

Estudos anteriores, como o de Mendes (2012), já abordaram aspectos pontuais da geoquímica na região, como a caracterização do arsênio em Passagem de Mariana. Estudo de (Costa et al. 2003). No entanto, o presente trabalho diferencia-se por propor um mapeamento hidroquímico abrangente, cobrindo toda a área territorial do município e contemplando a maioria das bacias e sub-bacias locais, bem como suas principais drenagens. Além disso, este estudo avança ao incluir uma gama mais ampla de elementos químicos maiores, menores e traços em sua análise, proporcionando uma visão mais completa da qualidade das águas. A construção de mapas hidroquímicos permitirá análises em maior escala, englobando todos os distritos e gerando dados inéditos e necessários para a região.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste em encontrar valores anômalos de metais para 58 amostras coletadas em pontos distribuídos pelo município de Mariana, com base nos critérios estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, e pela Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005 para águas superficiais e Resolução CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008 para águas subterrâneas. A partir dessas análises, busca-se identificar e destacar os parâmetros inorgânicos que apresentam concentrações acima do Valor Máximo Permitido (VMP), conforme estabelecido pelas legislações vigentes, visando compreender as possíveis fontes de contaminação ou alteração na qualidade das águas.

Além disso, o trabalho tem como meta a produção de mapas hidroquímicos que representem espacialmente a distribuição dos parâmetros analisados, permitindo a localização geográfica precisa dos pontos com alterações significativas. Esses mapas servirão como ferramenta visual para interpretar a relação entre as características hidroquímicas das águas, a geologia local e as atividades antrópicas, em especial a mineração, que é uma das principais atividades econômicas da região.

Por fim, pretende-se discutir os resultados obtidos à luz do contexto ambiental e socioeconômico de Mariana, contribuindo para um entendimento mais amplo dos impactos das atividades humanas sobre os recursos hídricos do município.

1.4 Localização e vias de acesso.

A área de estudo abrange o território municipal de Mariana e está localizada na região centro-sudeste de Minas Gerais. A principal via de acesso de Belo Horizonte até o município pode ser feita pelas rodovias MG 030 e posteriormente pela BR 356, conhecida como Rodovia dos Inconfidentes (Figura 1).

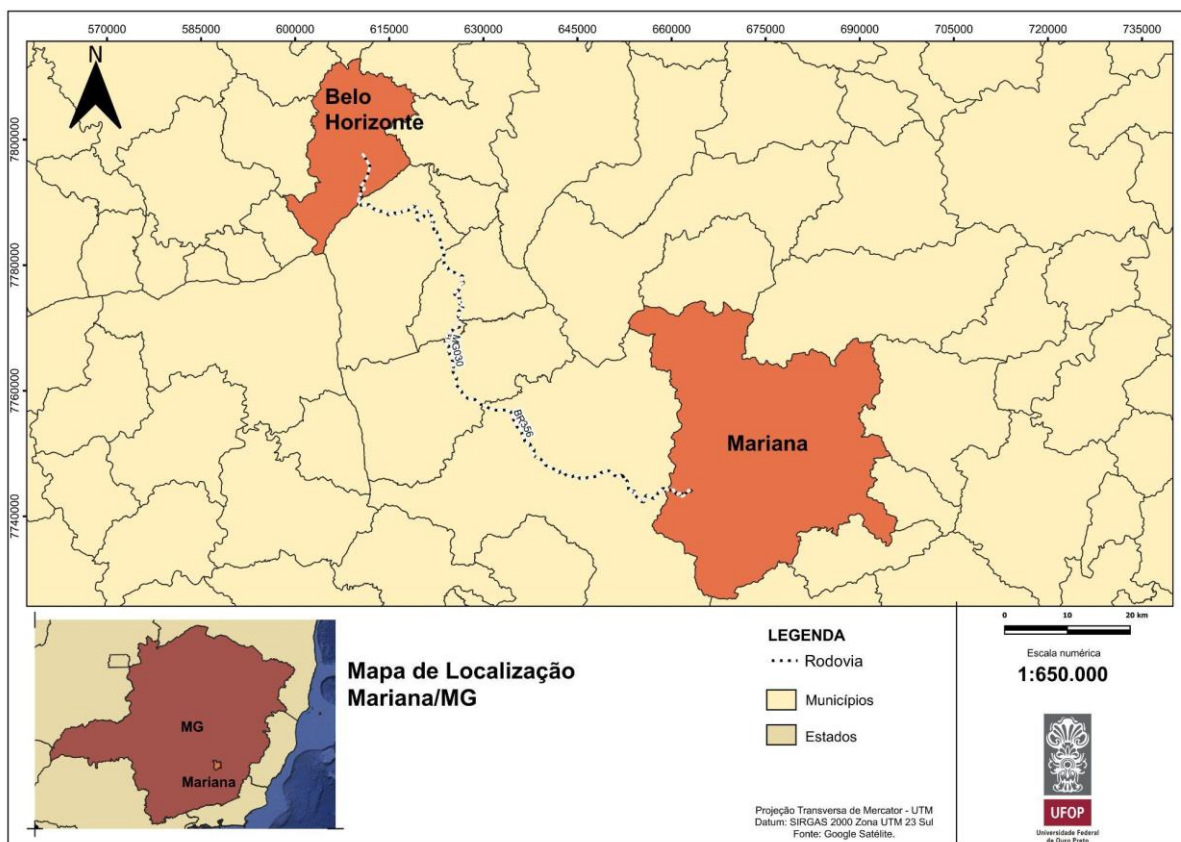


Figura 1 - Localização e vias de acesso do município de Mariana. Fonte: Google Satélite, 2023.

1.5 Materiais e Métodos

1.5.1 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica deste trabalho foi baseada em alguns estudos importantes: dissertação de mestrado Diagnóstico do meio físico como contribuição ao ordenamento territorial do município de Mariana-MG (Souza 2004), para a caracterização hidrográfica e geológica local do município de Mariana; a dissertação de mestrado Avaliação da exposição da população de Passagem de Mariana-MG aos elementos traço, com ênfase no arsênio (Mendes 2012), como base para estudos geoquímicos na região auxiliando nos parâmetros físico-químicos inorgânicos e como fonte das principais referências bibliográficas na temática de geologia médica utilizadas; e por fim o importante artigo Transamazonian Orogeny in the

Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero (Alkmim e Marshak, 1998), como base principal para descrição da geologia regional do quadrilátero ferrífero.

1.5.2 Etapa de amostragem

A coleta foi feita durante no início do período chuvoso, nos meses no ano de 2015 pelo grupo PET-Engenharia Geológica vinculada a um projeto em parceria com a Samarco, SAAE de Mariana. Foram coletadas 55 amostras de águas superficiais e 4 amostras de água subterrânea para realização de análises hidroquímicas (elementos maiores, menores e traços) das águas de consumo advindas de locais inseridos em nascentes, córregos, ETE's e poços (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). A metodologia da coleta foi baseada pela Resolução n°. 724, de 03 de outubro de 2011, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), a qual define o Guia Nacional de coleta e preservação de amostras de água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes.



Figura 2 - Fotos do processo de coleta e amostragem da água.

1.5.3 Análise laboratorial hidroquímica

Para as análises de parâmetros físico-químicos, mediu-se o pH, Eh, condutividade

elétrica, temperatura e sólidos totais dissolvidos, utilizando Ultrameter Myron in situ. Já as análises químicas dos metais (Alumínio, Antimônio, Arsênio, Bário, Berílio, Cádmio, Chumbo, Cobalto, Cobre, Cromo, Ferro, Manganês, Níquel, Prata, Selênio, Urânio, Vanádio, Zinco) utilizou-se o método ICP-MS no Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geologia da (Universidade Federal de Ouro Preto). A investigação por elementos inorgânicos foi feita devido o histórico da presença de metais como Ferro e Arsênio no quadrilátero ferrífero.

1.5.4 Análise quantitativa e tratamento dos dados

A principal ferramenta utilizada para o tratamento de dados foi o Excel, em tabelas separando os dados ICP MS recebidos e o tratamento dos mesmos foi feito com base principal nos parâmetros VMP dos elementos estipulados pela Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021 a resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005, resolução CONAMA n 396/2008. Com isso pode-se obter os elementos com alteração maior que os limites estabelecidos.

A sigla ICP MS tem o significado de Espectroscopia de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado, um método importante que trabalha a detecção de uma variedade de elementos e para isso usa-se um plasma com altas temperaturas responsáveis por agitar os átomos causando a emissão dos fótons para então determinar o comprimento de onda específico de cada elemento (Costa 2021). Esta técnica é muito eficaz para encontrar elementos traço em matriz como a água.

Posteriormente foi feito o tratamento estatístico dos dados e obteve-se as estatísticas descritivas básicas a partir da linguagem de programação Python. Na qual também foram elaborados os gráficos boxplots para melhor visualização dos elementos traço com alteração anômala de acordo com a Portaria GM/MS 888/21 e a Resolução CONAMA 357/05 para águas superficiais além da Resolução CONAMA 396/2008 para águas subterrâneas.

O Boxplot é uma ferramenta importante na representação estatística de dados quantitativos, pois exhibe visualmente a distribuição dos dados em um retângulo, mostrando a frequência acumulada de um elemento. Os resultados dos dados são representados por pontos dispersos, facilitando a análise da distribuição. Silva et al (2009) explicaram a composição do diagrama de caixa em três quartis (25%, 50% e 75%). O primeiro (Q1) e o terceiro (Q3) quartis correspondem aos limites inferior e superior do retângulo, enquanto o segundo quartil (Q2), que representa a mediana (50%), é indicado por uma linha no dentro do diagrama. Um outro componente relevante do gráfico boxplot são os outliers, que são pontos distantes dos demais quartis. Esses pontos geralmente são definidos como valores que estão além de 1,5 vezes o intervalo interquartil (IQR), ou seja, abaixo de $Q1 - 1,5 * IQR$

ou acima de $Q3 + 1,5 * IQR$. A Figura 3 a seguir exemplifica a simbologia do boxplot.

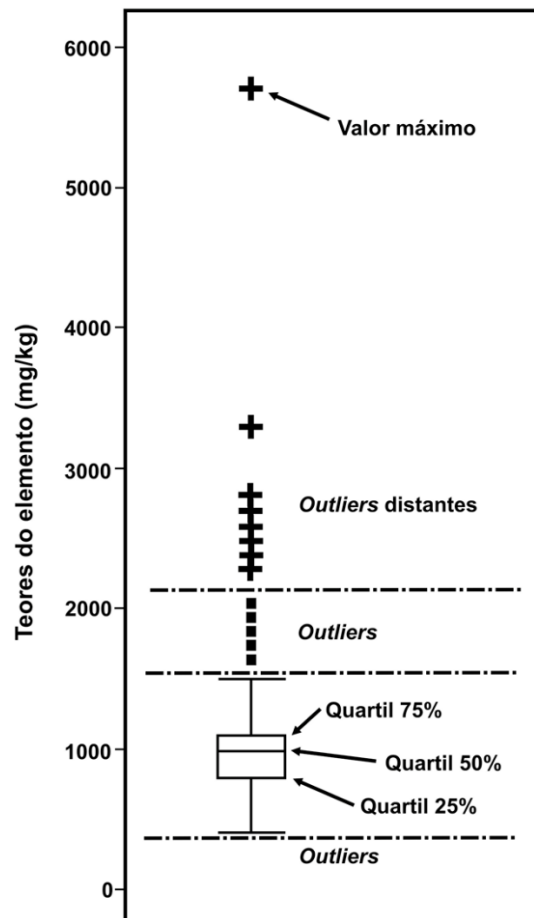


Figura 3 - Exemplo de boxplot. Fonte: Rodrigues & Nalini Júnior (2009).

1.5.5 Análise qualitativa

A partir dos dados obtidos, foram elaborados mapas hidroquímicos na plataforma QGIS, permitindo a visualização geoespacial dos pontos com concentrações anômalas. Além disso, foram gerados mapas de potabilidade da água, com o objetivo de avaliar os parâmetros medidos in situ que excedem os padrões de qualidade estabelecidos. Esses dados foram também analisados de forma quantitativa. Com base nos mapas hidroquímicos e no referencial teórico, foi possível estabelecer uma correlação entre os pontos de contaminação e as unidades litológicas presentes no município de Mariana. Essa associação permite diferenciar as possíveis fontes de contaminação, distinguindo entre origens naturais e antrópicas nas áreas analisadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BACIAS HIDROGRÁFICAS, INTERAÇÕES ENTRE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS

O ciclo hidrológico é composto pela relação entre as águas superficiais e subterrâneas. De acordo com Silva (2007) esta interação também necessita da caracterização de solos, do clima, da geologia e por fim das condições bióticas da bacia hidrográfica. Dessa forma pode-se definir águas superficiais como aquelas que transcorrem ou se encontram armazenadas na superfície terrestre com origem em águas subterrâneas, pela recarga de aquíferos, e águas pluviais. Esta última também ocasiona a formação de águas subterrâneas pela sua infiltração nos substratos inferiores dos solos para assim ser armazenada, são os denominados componentes de recarga (Figura 4).

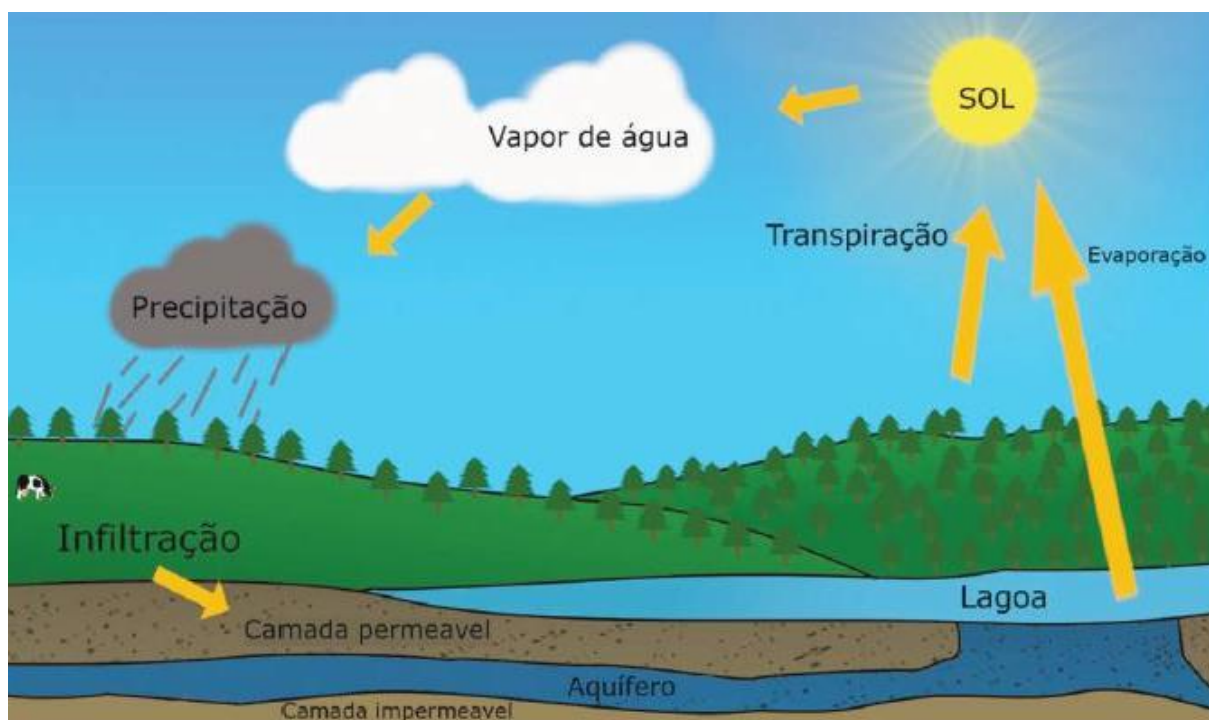


Figura 4 - Ciclo Hidrológico. Fonte: Página da revista TAE especializada em tratamento de águas e efluentes. Disponível em: <<https://www.revistatae.com.br/Artigo/166/Água-superficial-e-subterranea>>. Acesso em 3 de julho de 2023.

Silva (2007) aponta que a primordial interação entre porções superficiais e subterrâneas de água está na vazão de base do rio provinda da fonte subterrânea de aquíferos confinados e não confinados. Dessa maneira, fica evidente a importância dos corpos subterrâneos para o sucesso do ciclo das águas e o equilíbrio do sistema hidrológico.

2.2 ASPECTOS LEGAIS DAS ÁGUAS NO BRASIL

Von Sperling (1998) elaborou uma tabela com a evolução histórica da legislação ambiental brasileira, com foco para a gestão hídrica, até o ano de 1990. De acordo com a Tabela 1 nota-se uma linha do tempo, desde o ano de 1934, de códigos, decretos, conselhos, leis, portarias e resoluções das águas nacionais que auxiliaram a solidificar uma estrutura jurídica voltada para a proteção dos recursos hídricos no Brasil. A resolução CONAMA 020/86 é um importante marco na legislação hídrica pois estabeleceu uma classificação mais detalhada dos corpos d'água sendo um documento base para avaliação da qualidade da água de corpos receptores e de lançamento de efluentes.

Tabela 1 - Legislação ambiental no Brasil ao longo do século XX. Fonte: Von Sperling (1998).

ITEM	ANO	COMENTÁRIO
Código das Águas (Decreto 24.643, de 1934 e Decreto-lei 852, de 1938)	1934	Marco na legislação nacional. Instrumento obsoleto em alguns aspectos nos dias de hoje, mas bastante sintonizado com os interesses da época. Não houve uma grande preocupação com a água enquanto recurso natural, passível de proteção contra a poluição. No entanto, algumas normas de proteção foram incluídas (Artigos 109 e 110), considerando ilícita a conspurcação ou contaminação de águas por pessoas que não a consomem, identificando uma regra de responsabilidade civil e criminal em caso de poluição hídrica. O código definia ainda o direito de propriedade das águas pelo Estado, regulamentando o aproveitamento dos recursos hídricos e estabelecendo, como prioritário, o abastecimento público, reforçando a necessidade de manter-se a sua qualidade.
Código Penal Brasileiro (decreto-lei 2.848)	1940	Tal código, ainda vigente, estabelece a proteção da água potável contra o “envenenamento, corrupção e poluição”.
Código Nacional da Saúde (Decreto 49.974-A)	1960	Estabeleceu algumas restrições e obrigações por parte das indústrias no sentido de um controle do lançamento de resíduos líquidos. Estabeleceu ainda que os serviços de saneamento ficam sujeitos à orientação e fiscalização das autoridades sanitárias competentes. Postulou ainda sobre o preceito do controle da poluição através do controle da qualidade do corpo receptor.
Decreto Federal 50.877	1960	Primeira legislação federal específica sobre poluição das águas. Estabeleceu a exigência de tratamento dos resíduos líquidos, sólidos ou gasosos, domiciliares ou industriais, antes do seu lançamento às águas interiores ou litorâneas. Previu também a classificação das águas de acordo com os seus usos preponderantes, com respectivas taxas de poluição permissíveis, a ser estabelecida em regulamentação posterior. Definiu ainda o termo “poluição” aplicado às águas.
Código Florestal (Lei 4.771)	1965	Instituiu o Código Florestal. Menciona pela primeira vez a reserva de faixas de proteção à margem dos rios.
Código de Pesca (Decreto-lei 221)	1967	Estabeleceu o Código de Pesca.

ITEM	ANO	COMENTÁRIO
Código de Mineração (Lei 227)	1967	Instituiu o Código de Mineração.
Conselho Nacional de Controle da Poluição Ambiental (Decreto-lei 303)	1967	Criou o Conselho Nacional de Controle da Poluição Ambiental. Estendeu o conceito de poluição aos ambientes aéreo e terrestre e introduziu a expressão “meio ambiente”.
Secretaria Especial do Meio Ambiente (Decreto 73.030)	1973	Criação da Secretaria Especial do Meio Ambiente (SEMA). Consolidação da visão mais global do problema ambiental como um todo. Atribuições: elaborar, controlar e fiscalizar as normas e padrões relativos à preservação do meio ambiente. Introduziu o conceito de proteção à natureza, de equilíbrio ecológico, de preservação de espécies independentes de sua utilidade ou aparente nocividade.
Decreto-lei 1.413	1975	Estabeleceu o zoneamento urbano em áreas críticas de poluição. 1975 Dispôs sobre medidas de prevenção e controle de poluição industrial.
Decreto-lei 76.389	1975	Dispôs sobre medidas de prevenção e controle de poluição industrial
Portaria 013/Minter	1976	Estabeleceu pela primeira vez em âmbito federal, um critério de classificação de águas interiores, fixando padrões de qualidade e parâmetros a serem observados para cada classe, bem como o uso a que se destinam.
Portaria 0536/Minter	1976	Fixou, pela primeira vez, padrões específicos de qualidade das águas para fins de balneabilidade ou recreação de contato primário.
Decreto Federal 81.107	1977	Definiu o elenco de atividades sobre as quais os Estados não tinham jurisdição, por serem consideradas de interesse à segurança nacional.
Portaria Interministerial 01	1978	Recomendava que fossem levadas em conta condições de produção de energia hidrelétrica e de navegação para efeito de classificação e enquadramento de águas federais e estaduais.
Portaria Interministerial 90	1978	Criou o Comitê Especial de Estudos Integrados de Bacias Hidrográficas (CEEIBH), com atribuições de classificar os cursos d'água da União, estudar de forma integrada e acompanhar o uso racional dos recursos hídricos federais com o objetivo de obter o melhor aproveitamento múltiplo de cada bacia.
Lei 6.803	1980	Estabeleceu as diretrizes básicas para o zoneamento industrial nas áreas críticas de poluição.
Criação do SISNAMA e do CONAMA (Decreto 88.351, de 1983, e modificação pelo Decreto 91.305, de 1985)	1983 e 1985	Definição da Política Nacional de Meio Ambiente. Criação do Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA) e do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Passo de grande importância no processo de consolidação de uma política de gerenciamento dos recursos hídricos. A Política Nacional do Meio Ambiente foi desenvolvida a partir de uma série de princípios, entre eles: o equilíbrio ecológico, o planejamento do uso do solo, a proteção de ecossistemas, o controle e zoneamento de atividades poluidoras, o desenvolvimento de tecnologias de proteção aos recursos naturais, a recuperação de áreas já degradadas, a educação ambiental. Alguns instrumentos foram estabelecidos, tais como o estabelecimento de padrões de qualidade ambiental, o zoneamento ambiental, a avaliação de impactos ambientais e o

ITEM	ANO	COMENTÁRIO
		licenciamento ambiental de atividades poluidoras. Entre as atribuições do CONAMA, tem-se: baixar normas para implementação da Política Nacional do Meio Ambiente e estabelecer normas e critérios para licenciamento de atividades efetivas ou potencialmente poluidoras, incluindo a exigência de Estudos de Impacto Ambiental (EIA) quando for o caso. Como decorrência destes estudos deve ser elaborado o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), de acesso público.
Resoluções CONAMA 01 e 11	1986	Definiram a obrigatoriedade, o conceito e as diretrizes básicas do EIA e RIMA.
Resolução CONAMA 06	1986	Aprovou modelos de publicação de licenciamentos diversos para instalação e operação de empreendimentos.
Resolução CONAMA 20	1986	Alterou os critérios de classificação dos corpos d'água da União, estabelecidos anteriormente pela Portaria Minter 013/76, estendendo-os às águas salobras e salinas, acrescentando vários parâmetros analíticos e tornando mais restritivos os padrões relativos a vários componentes. De acordo com estas normas, "o enquadramento dos corpos d'água deve considerar não necessariamente seu estado atual, mas os níveis de qualidade que deveriam possuir para atender às necessidades da comunidade e garantir os usos concebidos para os recursos hídricos". Nesta resolução foram estabelecidos ainda: (a) Padrões de Balneabilidade, com base no número de coliformes totais e fecais, segundo os quais as águas são classificadas em excelentes, muito boas, satisfatórias ou impróprias e (b) que a competência para a sua aplicação é dos órgãos ambientais estaduais, ficando a SEMA incumbida dessa atribuição em caráter supletivo. A Resolução CONAMA 020/86 é atualmente o principal instrumento na legislação da qualidade das águas de corpos receptores e de lançamento de efluentes líquidos.
Resolução CONAMA 10	1988	Estabeleceu competência e objetivos das Áreas de Proteção Ambiental (APAs), impondo, entre outros itens, a obrigatoriedade de sistemas de coleta e tratamento de esgotos nas áreas urbanizadas das mesmas.
Lei Federal 7.661	1988	Instituiu o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro, visando orientar a utilização racional dos recursos da zona costeira, contribuindo para a proteção do seu patrimônio natural, incluindo as águas costeiras, fluviais e estuarinas.
Lei 7.735	1989	Extinguiu a Secretaria Especial do Meio Ambiente do Ministério do Interior (SEMA) e a Superintendência do Desenvolvimento da Pesca do Ministério da Agricultura (SUDEPE), criando o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), vinculado à Secretaria do Meio Ambiente da Presidência da República.
Resolução CONAMA 12	1989	Proibiu atividades que possam por em risco a conservação dos ecossistemas, a proteção à biota de espécies raras e a harmonia da paisagem nas Áreas de Relevante Interesse Ecológico (ARIES).
Lei 7.797	1989	Criou o Fundo Nacional do Meio Ambiente, com o objetivo de desenvolver projetos que visem ao uso racional e sustentável dos recursos naturais.

ITEM	ANO	COMENTÁRIO
Decreto 99.274	1990	Regulamentou as leis relativas à criação de Estações Ecológicas e Áreas de Proteção Ambiental e sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, sendo estabelecidos a estrutura do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e a constituição, funcionamento e competência do CONAMA e de suas Câmaras Técnicas.

Em 17 de março de 2005 é retificada a Resolução CONAMA 357, o artigo 1 propõe diretrizes para a classificação dos corpos de água, determina critérios para seu enquadramento e define padrões para o descarte de efluentes, visando à proteção ambiental e à gestão sustentável dos recursos hídricos, o documento é composto por 6 capítulos e 50 artigos (BRASIL 2005). A partir do capítulo III (Das condições e padrões de qualidade da água) na seção II (Das águas doces) da resolução, tem-se a seguinte tabela de padrões de qualidade da água com os parâmetros inorgânicos e o valor máximo permitido dos mesmos para consumo humano (Tabela 2).

Tabela 2 -Tabela padrão de potabilidade da água para metais. Fonte: CONAMA 357/05.

TABELA I - CLASSE 1 - ÁGUAS DOCES	
PADRÕES	
PARÂMETRO INORGÂNICOS	VALOR MÁXIMO
Alumínio dissolvido	0,1 mg/L Al
Antimônio total	0,005mg/L Sb
Arsênio total	0,01 mg/L As
Bário total	0,7 mg/L Ba
Berílio total	0,04 mg/L Be
Boro total	0,5 mg/L B
Cádmio total	0,001 mg/L Cd
Chumbo total	0,01mg/L Pb
Cobalto total	0,05 mg/L Co
Cobre dissolvido	0,009 mg/L Cu
Cromo total	0,05 mg/L Cr
Ferro dissolvido	0,3 mg/L Fe
Fósforo total (ambiente lântico)	0,020 mg/L P
Fósforo total (ambiente intermediário, com tempo de residência entre 2 e 40 dias, e tributários diretos de ambiente lântico)	0,025 mg/L P
Fósforo total (ambiente lótico e tributários de ambientes intermediários)	0,1 mg/L P

TABELA I - CLASSE 1 - ÁGUAS DOCES	
PADRÕES	
PARÂMETRO INORGÂNICOS	VALOR MÁXIMO
Lítio total	2,5 mg/L Li
Manganês total	0,1 mg/L Mn
Mercúrio total	0,0002mg/LHg
Níquel total	0,025mg/L Ni
Prata total	0,01 mg/L Ag
Selênio total	0,01 mg/L Se
Urânio total	0,02 mg/L U
Vanádio total	0,1 mg/L V
Zinco total	0,18 mg/L Zn

Outra resolução importante foi alterada em 2021, a Portaria GM/MS nº 5 de 28 de setembro de 2017 que aborda sobre o controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (Brasil 2021). A Portaria GM/MS nº 888 de 4 de maio de 2021 é composta por 6 capítulos e 56 artigos, e a comparação dos dados é feita pelo anexo 9, Tabela de Padrão de Potabilidade (Tabela 3), a qual os parâmetros são os elementos químicos e tem-se dois valores de referência: CAS (CAS é o número de referência de compostos e substâncias químicas adotado pelo Chemical Abstract Service) e o VMP (valor máximo permitido) para consumo humano.

Tabela 3 - Tabela padrão de potabilidade da água para metais. Fonte: Anexo 9, Portaria 888/21.

TABELA DE PADRÃO DE POTABILIDADE PARA SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS INORGÂNICAS QUE REPRESENTAM RISCO À SAÚDE		
Parâmetro	CAS(1)	VMP(2) (mg/L)
Antimônio	7440-36-0	0,006
Arsênio	7440-38-2	0,01
Bário	7440-39-3	0,7
Cádmio	7440-43-9	0,003
Chumbo	7439-92-1	0,01
Cobre	7440-50-8	2
Cromo	7440-47-3	0,05
Mercúrio Total	7439-97-6	0,001
Níquel	7440-02-0	0,07
Selênio	7782-49-2	0,04

TABELA DE PADRÃO DE POTABILIDADE PARA SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS INORGÂNICAS QUE REPRESENTAM RISCO À SAÚDE

Urânio	7440-61-1	0,03
--------	-----------	------

A resolução CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008, que trata sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas para consumo humano. Esta legislação apresenta 6 capítulos e 1 anexo, o qual os elementos inorgânicos estão apresentados na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 - Tabela parâmetros inorgânicos com maior probabilidade de ocorrência em águas subterrâneas, seus respectivos Valores Máximos Permitidos (VMP). Fonte: Anexo I, CONAMA 396/08.

Parâmetros	Nº CAS	Usos Preponderantes da Água				LQP Praticável - LQP
		Consumo Humano	Dessedentação de animais	Irrigação	Recreação	
Inorgânicos		µg.L-1				
Alumínio	7429-90-5	200 (1)	5.000	5.000	200	50
Antimônio	7440-36-0	5				5
Arsênio	7440-38-2	10	200		50	8
Bário	7440-39-3	700			1.000	20
Berílio	7440-41-7	4	100	100		4
Boro	7440-42-8	500 (2)	5.000	500 (4)	1.000	200
Cádmio	7440-43-9	5	50	10	5	5
Chumbo	7439-92-1	10	100	5.000	50	10
Cianeto	57-12-5	70			100	50
Cloreto	16887-00-6	250.000 (1)		100.000 - 700.000	400.000	2000
Cobalto	7440-48-4		1.000	50		10
Cobre	7440-50-8	2.000	500	200	1.000	50
Crômio (Cr III + Cr VI)	Cr III (16065831) Cr VI (18540299)	50	1.000	100	50	10
Ferro	7439-89-6	300 (1)		5.000	300	100
Fluoreto	7782-41-4	1.500	2.000	1.000		500
Lítio	7439-93-2			2.500		100
Manganês	7439-96-5	100 (1)	50	200	100	25
Mercurio	7439-97-6	1	10	2	1	1
Molibdênio	7439-98-7	70	150	10		10
Níquel	7440-02-0	20 (3)	1.000	200	100	10
Nitrato (expresso em N)	14797-55-8	10.000	90.000		10.000	300
Nitrato (expresso em N)	14797-65-0	1.000	10.000	1.000	1.000	20
Prata	7440-22-4	100			50	10
Selênio	7782-49-2	10	50	20	10	10
Sódio	7440-23-5	200.000 (1)			300.000	1000
Sólidos Totais Dissolvidos (STD)		1.000.000 (1)				2000
Sulfato		250.000 (1)	1.000.000		400.000	5.000
Urânio	7440-61-1	15 (2,3)	200	10 (4)		
100 (5)		50				
Vanádio	7440-62-2	50	100	100		20
Zinco	7440-66-6	5.000 (1)	24.000	2.000	5.000	100

Neste trabalho foram utilizados os padrões de qualidade referidos para águas superficiais, a preferência foi a Portaria 888 GM/MS nº 5, de 4 de maio de 2021 pois esta possui atualização mais recente. Portanto, a resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005 também foi importante para preencher os parâmetros inorgânicos com valores máximos não disponíveis pela Portaria 888/21. Os dois padrões de qualidade são em âmbito nacional dos órgãos Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e Ministério da Saúde (MS). No que tange às águas subterrâneas do presente estudo foi

utilizada a Resolução CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008 apresentada.

2.3 ELEMENTOS QUÍMICOS MENORES E TRAÇO

Segundo Mendes (2012), os níveis altos de concentração dos elementos-traço podem ocasionar toxicidade e contaminação dos recursos hídricos locais. Desta forma, deve-se fazer a caracterização dos parâmetros físico-químicos dos metais para maior compreensão da ocorrência natural dos mesmos no território global.

Alumínio (Al)

O alumínio constitui 8% da crosta terrestre. Na natureza, ele é encontrado em várias formas, tais como silicatos, óxidos e hidróxidos, muitas vezes combinado com outros elementos, como sódio e flúor, ou como parte de complexos com matéria orgânica (WHO 2003). Além disso, é capaz de formar complexos com diversos compostos orgânicos (como ácidos húmicos ou fúlvicos) e ligantes inorgânicos (tais como fluoreto, cloreto e sulfato), sendo que a maioria, mas não todos, desses complexos são solúveis. A química do alumínio na água é complexa e vários parâmetros químicos, incluindo o pH, determinam quais espécies de alumínio estão presentes em soluções aquosas. Em água pura, o alumínio possui uma solubilidade mínima na faixa de pH entre 5,5 e 6,0; as concentrações de alumínio total dissolvido aumentam em valores de pH mais elevados e mais baixos. (WHO 2003)

Antimônio (Sb)

O antimônio (Sb) é naturalmente encontrado na crosta terrestre, especialmente no solo, em rios e lagos, em concentrações mínimas. Embora possa ser encontrado em sua forma livre, é mais comum na forma de sulfetos, principalmente a antimonita (Sb_2S_3), embora também possa aparecer como valentinita (Sb_2O_3). Sua presença em ambientes aquáticos é resultado da erosão das rochas, lixiviação do solo e atividades humanas. Em águas não poluídas, as concentrações típicas de antimônio dissolvido são geralmente inferiores a $1\mu\text{g L}^{-1}$. No entanto, em áreas próximas a fontes de poluição humana, essas concentrações podem chegar a ser até 100 vezes maiores que os níveis naturais. (Filella, 2002).

Arsênio (As)

O Arsênio é um elemento inorgânico que geralmente ocorre associado ao ouro como arsenopirita e possui uma distribuição no globo cerca de 2mgKg^{-1} Mendes

apud Selinus (2005). Mas também se encontra arsênio em espécies orgânicas nos seguintes estados de oxidação: -3, 0, +3, +5 (Souza, 2011).

Manganês (Mn)

Barbosa (2015) caracteriza o Manganês como sendo um metal de coloração cinza com alto grau de dureza, número atômico 25 com densidade entre os valores de 7,21 e 7,40 g/cm(3) e um ponto de ebulição alto em 2150°C. É um elemento inorgânico bastante presente na crosta terrestre, pois está associado a uma gama de minerais existentes. Com isso, ocorre em vários ambientes do globo como rochas, biosfera (plantas) e ambientes aquáticos (Mendes 2012). Este elemento não ocorre de forma pura no ambiente, está associado às substâncias oxigênio, enxofre e cloro (ATSDR 2012).

Ferro (Fe)

O ferro é um metal de larga ocorrência na crosta terrestre, os seus íons Fe^{2+} e Fe^{3+} se associam com muitos elementos e composto formando sulfetos, hidróxidos, óxidos e carbonatos (Mendes 2012). E diferente de outros elementos inorgânicos ele é essencial para vida dos seres vivos no geral.

Bário (Ba)

O bário é um metal alcalino-terroso denso encontrado na natureza como um cátion divalente em combinação com outros elementos. Além de ocorrer naturalmente na crosta terrestre e, portanto, estar presente na maioria das águas superficiais, o bário também é liberado no ambiente por meio de emissões industriais. O tempo de permanência do bário na atmosfera pode ser de vários dias. (WHO 2001)

Berílio (Be)

De acordo com a tabela periódica o berílio é um elemento inorgânico de coloração cinza-aco, com pouca dureza, de número atômico 4 e peso atômico de 9,01. O metal livre de berílio não está disponível na natureza, é encontrado em minerais silicatados em relação aos sulfetos e em minerais de feldspato em relação aos minerais ferromagnesianos. A rocha com maior ocorrência e concentração deste elemento é o pegmatito (WHO 2009).

Cádmio (Cd)

O cádmio é um elemento metálico que faz parte do grupo IIb na tabela periódica. Segundo WHO (1992), este elemento não é encontrado em estado puro na natureza e por isso ocorre associado em diversos tipos de rochas, solos, água, carvão e petróleo. As principais fontes naturais de cádmio são as rochas com minérios de zinco, chumbo e cobre (WHO 1992).

Chumbo (Pb)

Chumbo é o mais comum dos elementos traço na crosta terrestre, ele pode ser encontrado na forma de isótopos estáveis na natureza, são eles ^{208}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb e ^{204}Pb (WHO 2003). Um fato interessante é que este metal ocorre na água da torneira pela dissolução a partir de fontes naturais e dos sistemas de encanamento residencial, nos quais os materiais tubos e soldas podem conter chumbo. Os tubos de PVC, por exemplo, também podem ser constituídos de compostos de chumbo pois de acordo com Mesquita Filho (2005) os estabilizantes mais antigos e necessários para formulação química do material PVC são feitos de chumbo.

Cobalto (Co)

De acordo com ATSDR (2023) o elemento Cobalto ocorre naturalmente no meio ambiente, através da intemperização de rochas com a deposição úmida (águas) e seca (solos) e também por atividades antrópicas, formando compostos com os elementos cloreto, enxofre e oxigênio. As fontes antropogênicas deste elemento cobalto abrangem a queima de combustíveis fósseis no setor energético, o uso de fertilizantes fosfatados na agricultura, bem como atividades de mineração e processamento de ligas contendo cobalto (ATSDR 2023). Essas atividades humanas são responsáveis pela significativa liberação de cobalto no meio ambiente.

Cobre (Cu)

O cobre é um metal expressivo na crosta terrestre, segundo Henckens and Worrell (2020) a concentração média do elemento é de 50 ppm, estima-se que os primeiros 3 km da crosta continental da Terra abrigam 60.000 bilhões de toneladas métricas de cobre. Com isso, o cobre também está presente em plantas e animais e é essencial para as funções do sistema corporal humano (ATSDR 2022).

2.4 GEOLOGIA MÉDICA

Pode-se definir a geologia médica como a ciência que analisa a influência de fatores geológicos de um ambiente com a presença de doenças humanas e dos animais no mesmo (Selinus 2006). Desta forma para a execução desses agentes é necessária a colaboração interdisciplinar de áreas como: geologia, medicina, biologia, agronomia, veterinária e outras que podem ser demandadas.

Para a geologia, um conceito primordial é de que as rochas são fontes naturais dos elementos químicos disponíveis na superfície terrestre de forma heterogênea. De

acordo com Galuska (2006) o termo background pode ser definido como a concentração geogênica de uma substância em uma amostra. Assim, é importante analisar os níveis de background da região que se deseja estudar, pois este é um importante parâmetro para fazer a diferenciação dos elementos que ocorrem naturalmente no ambiente ou que foram transportados por ação antrópica.

Os 97 elementos naturais da tabela periódica contam uma importante história geológica, pois eles são fundamentais nos processos biológicos da formação e continuação da vida. Nesse sentido, há a essencialidade destes elementos e também a toxicidade, quando ocorre uma biodisponibilidade nociva à saúde humana. Garrett (2013) exemplifica alguns elementos que com valores altos podem comprometer o ecossistema, são eles: chumbo, tálio e mercúrio, os quais não são necessários para a vida humana; o mercúrio presente em peixes pode causar toxicidade para os animais que são seus predadores; e por fim, o cádmio, que é considerado nocivo para a maioria dos seres vivos. Apesar dos exemplos citados deve-se também ter atenção com os elementos essenciais, pois eles podem ser nocivos em dosagem alta. No quadro a seguir, pode-se ver a relação dos elementos essenciais aos seres humanos (Quadro 1).

Quadro 1 - Funções dos elementos considerados essenciais aos humanos. Fonte: Silva, 2006.

	FUNÇÃO DOS ELEMENTOS CONSIDERADOS ESSENCIAIS AOS HUMANOS
O, H, N e C	Ver discussão sobre estes elementos no texto acima.
Ca	É o metal mais abundante no corpo humano na forma de fosfato de cálcio nos ossos e dentes. É essencial na regulação da atividade de membranas celulares, especialmente na contração muscular e na condução dos estímulos nervosos. Participa da coagulação sanguínea, divisão celular e liberação de hormônios (Qtdd total média no corpo = 1.200 g).
Cl	Manutenção do equilíbrio hídroeletrolítico e secreções do corpo; digestão dos alimentos como ácido clorídrico no estômago (Qtdd total no corpo =95 g).
K	Manutenção do equilíbrio dos fluidos em nível intracelular (concentra-se dentro das células), participando da contração muscular e condução nervosa (Qtdd total no corpo =110-140 g).
Mg	Atua na manutenção da estrutura dos ossos; regula a passagem de substâncias através das membranas celulares; participa como co-fator de mais de 100 enzimas e na fabricação de proteínas, sendo importantíssimo no processo de crescimento e desenvolvimento normal (Qtdd total no corpo =25 g).
Na	Manutenção do equilíbrio hídroeletrolítico permanecendo sempre fora das células, participando da contração muscular e condução nervosa (Qtdd total no corpo = 100 g).
P	Constituinte dos ossos e dentes na forma de fosfato de cálcio. É essencial o processo de produção química de energia através de moléculas orgânicas do tipo ATP (trifosfato de adenosina), além de fazer parte da molécula de DNA (Qtdd total no corpo = 780 g).
S	Faz parte da estrutura da queratina, principal constituinte dos cabelos, unhas e camada externa da pele. Faz parte de várias enzimas essenciais ao metabolismo normal e da vitamina B1 (Qtdd total no corpo = 140 g).
Co	Constituinte da vitamina B12 envolvida na manutenção da integridade do sistema nervoso e na produção de glóbulos vermelhos.
Cr	Essencial para o metabolismo da glicose. Apesar de sua provável relação com desenvolvimento de diabetes no adulto, casos clínicos de deficiência humana desse elemento não foram ainda descritos.
Cu	Constituinte de uma dezena de enzimas importantes no metabolismo humano como a superoxi-dismutase, envolvida no controle de radicais livres.
F	Essencial à manutenção da estrutura sadia de dentes (esmalte) e ossos em doses mínimas.
Fe	Componente da hemoglobina é responsável pelo transporte de oxigênio no sangue e reserva desse elemento nos músculos.
I	Essencial ao funcionamento normal da tireóide, pois é constituinte dos hormônios tireoidianos, tiroxina e triiodotironina. A deficiência nutricional de hormônio é bastante conhecida como produtora de déficit de crescimento normal e sérios distúrbios mentais cognitivos.
Ni	Considerado essencial e ligado ao controle do crescimento, mas pouco conhecido quanto aos seus mecanismos de ação no metabolismo normal.
Mn	Apesar de ser considerado essencial, suas funções específicas são pouco conhecidas; ainda participa de reações enzimáticas e da atividade da vitamina B1 em quantidades mínimas.
Mo	É constituinte de várias enzimas importantes, entre elas a xantina-oxidase, envolvida no metabolismo de proteínas e a aldeído-oxidase, envolvida na biotransformação do álcool etílico.
Se	A definição de essencialidade do selênio é recente, de 1975, quando se descobriu que era constituinte da molécula da enzima glutatona peroxidase, importantíssima no controle de formação de radicais livres no metabolismo humano. Em 1991 descobriu-se que também faz parte da molécula da deiodinase, que participa da produção dos hormônios tireoidianos.
Si	A partir de 1972 foi definido que o silício é essencial e ligado ao processo de crescimento ósseo.
Sn	Ainda controverso com relação à sua real essencialidade em humanos. Não são conhecidos efeitos de sua deficiência. Foi considerado essencial anteriormente por sua suposta participação no hormônio gastrina.
V	Está relacionado com a regulação de enzimas envolvidas no equilíbrio do sódio-potássio no sistema nervoso. Menos de 0,5% do Vanádio ingerido é absorvido na dieta.
Zn	Ocorre em todos os tecidos, principalmente em ossos, músculos e pele; atua no sistema imunológico; regula crescimento corpóreo, proteção ao fígado. Deficiência reduz crescimento corpóreo.

Capitani (2006) afirma que a epidemiologia procura analisar todos os aspectos relacionados ao parâmetro saúde-doença, tais quais: fatores genéticos, de hábitos de

vida, de contágio, fatores dos meios ocupacionais e por fim aspectos do meio ambiente, o qual a geologia médica mais se aproxima por se tratar de um objeto causal do âmbito geológico. Dessa forma, a partir de agentes hidroquímicos pode-se estudar as seguintes relações de doenças ocasionadas pela exposição de alguns elementos inorgânicos.

O arsênio (As) possui uma toxicidade reconhecida mundialmente e os seus efeitos à saúde humana são divulgados pela Organização Mundial da Saúde (OMS), como por exemplo impactos aos seguintes órgãos vitais: membrana mucosa, pele, sistema nervoso, medula óssea, fígado e coração. E assim pode-se ocasionar doenças como melanomas, há casos de câncer de pele; conjuntivites; queratose e hiperqueratose, produção excessiva de queratina e por fim despigmentação da pele (Sellinus 2006).

O ferro (Fe) é um micronutriente metálico o qual está presente no corpo humano mais especificamente fixados na hemoglobina, proteína existente nos glóbulos vermelhos do sangue (Cortecci 2006). Este elemento está presente nos alimentos através de parâmetros geoquímicos dos solos e das águas. O consumo excessivo de ferro para humanos pode favorecer o processo de formação de câncer (carcinogênese).

O manganês (Mn) também é um elemento essencial e fundamental para a manutenção da vida de muitos animais, está presente em órgãos como rins e fígado. Pode ser adquirido de forma externa por meio de alimentos e sua ingestão abundante ocasiona tais doenças: artrite reumatóide; oclusões coronárias, obstrução de artérias do coração; disfunções neurológicas e distúrbios psiquiátricos.

O alumínio (Al) tem ocorrência considerável na crosta terrestre e de uma das fontes geradoras de elementos do planeta terra, o sistema solar. No entanto, não é um elemento essencial para humanos. Dessa forma, sua ingestão pode relacionar-se à doença de Alzheimer, pelo adensamento do elemento em porções no cérebro e distrofia óssea, ocasionada em pacientes em tratamento por hemodiálise com água com alto teor de alumínio (Cortecci 2006).

O antimônio (Sb) se difunde no meio ambiente de forma livre, em sulfetos e através do intemperismo de rochas em níveis traço. É um elemento não essencial ao corpo humano e sua toxicidade está relacionada com efeitos nocivos de curto prazo, vômito, náusea e diarreia; e longo prazo, aumenta o nível de colesterol no sangue e por consequência diminui o nível de açúcar (Razzoto 2009).

O elemento chumbo (Pb) exposições crônicas em níveis acima deste valor podem levar à ocorrência de efeitos adversos à saúde comprometendo o sistema nervoso central, com efeitos irreversíveis, também causando anemia, alterações renais e

alteração do metabolismo da vitamina D. (WHO 1995)

3 GEOLOGIA, HIDROGRAFIA E GEOQUÍMICA

3.1 HIDROGRAFIA

A hidrografia regional que engloba o município de Mariana é representada pela Bacia Hidrográfica do Rio Doce. Uma importante bacia com extensão de drenagem de 87.715 km, percorrendo regiões de dois estados brasileiros tais quais: Leste de Minas Gerais e Centro-Norte do Espírito Santo. (Figura 5). A área do presente estudo está localizada a sudoeste deste grande domínio hídrico, próxima ao Rio Piracicaba.

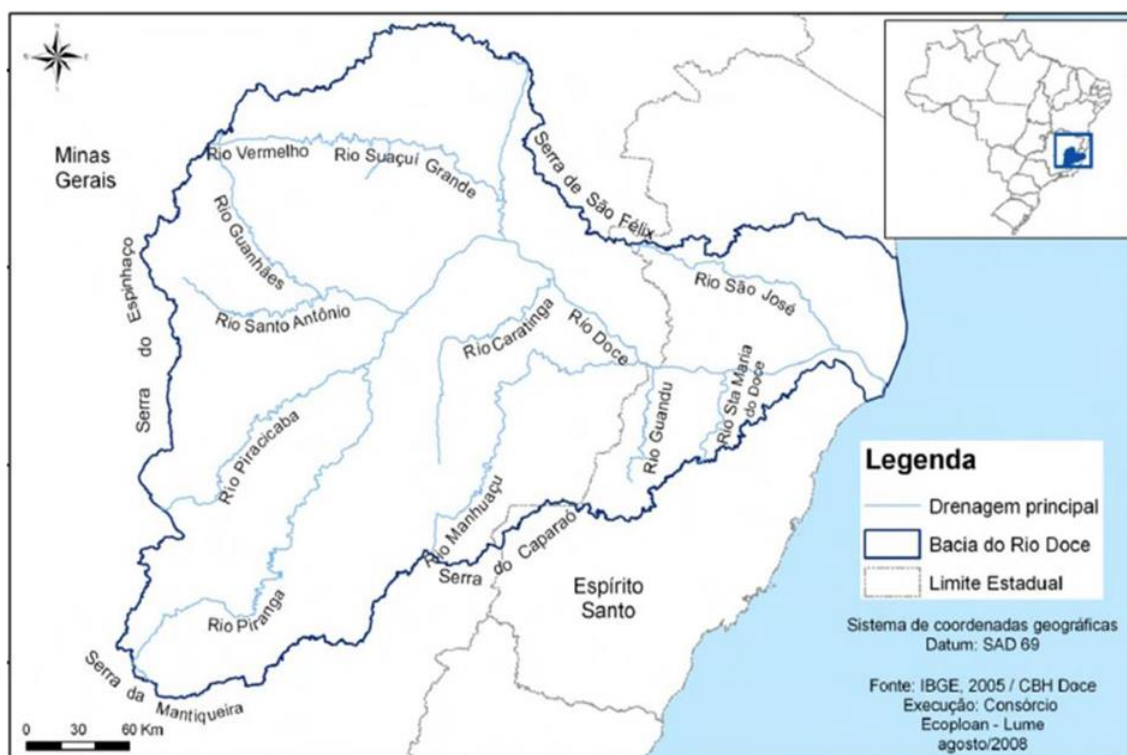


Figura 5 - Bacia do Rio Doce Regional. Fonte: PIRH,2010.

No contexto hidrográfico local, Souza (2004) identificou a presença de três bacias hidrográficas e quatro sub-bacias na área territorial analisada. Seguindo uma definição hierárquica, o autor classificou os rios Gualaxo do Norte, Gualaxo do Sul e Ribeirão do Carmo como bacias principais. A partir dessas, foram delimitadas as seguintes sub-bacias: Ribeirão do Caraça, Ribeirão Cachoeira do Brumado, Córrego Águas Claras e Ribeirões Boa Vista/Paciência. Cada uma dessas sub-bacias está associada, respectivamente, aos rios Piracicaba, Gualaxo do Sul e Gualaxo do Norte, conforme indicado no (Quadro 4).

Quadro 4 - Bacias e sub-bacias e os distritos no município de Mariana. Fonte: Souza, 2004.

Bacia/sub-bacia	Área (Km ²)	Principais tributários	Padrão de Drenagem	Localidades que abrange
Bacia do Rio Gualaxo do Sul	314,09	Rio Gualaxo do Sul Rio Mainart Ribeirão Dom José	Treliça tendendo a dendrítico	Passagem de Mariana Padre Viegas Furquim
Bacia do Ribeirão do Carmo	261,60	Ribeirão do Carmo Córrego Canela Córrego do Seminário	Treliça	Passagem de Mariana Mariana Camargos Bandeirantes Monsenhor Horta Furquim
Bacia do Rio Gualaxo do Norte	253,16	Rio Gualaxo do Norte Córrego Santarém Córrego Ouro Fino	Treliça e dendrítico, ocasionalmente	Santa Rita Durão Camargos Monsenhor Horta Furquim
Sub-bacia do Rio Piracicaba	131,08	Rio Piracicaba Córrego das Almas Córrego Faria	Dendrítico	Santa Rita Durão
Sub-bacia dos Ribeirões Boa Vista/Paciência	42,13	Ribeirão Paciência Ribeirão Boa Vista Córrego do Trigo	Dendrítico	Cláudio Manoel
Sub-bacia do Ribeirão Águas Claras	88,73	Ribeirão Águas Claras Córrego Caldereiro Córrego da Pegada	Dendrítico com porções tipo treliça	Cláudio Manoel
Sub-bacia do Ribeirão Cachoeira do Brumado	108,96	Ribeirão Cachoeira do Brumado Córrego Água Limpa Córrego Curral Velho	Dendrítico	Padre Viegas Cachoeira do Brumado Furquim

O mapa hidrográfico a seguir (Figura 6), ilustra a territorialidade das bacias e sub-bacias citadas, suas drenagens principais e a localização dos distritos e subdistritos de Mariana, são eles: Santa Rita Durão ao Norte, Cláudio Manuel e Águas Claras a nordeste, Bento Rodrigues e Camargos a noroeste, Bandeirantes e Monsenhor Horta ao Centro, Padre Viegas e Passagem de Mariana a sudoeste e por fim Cachoeira do Brumado e Furquim a sudeste. Deste modo, o mapa hidrográfico mostra os distritos alocados nos 7 corpos d'água do município, com destaque para a representação das suas principais drenagens.

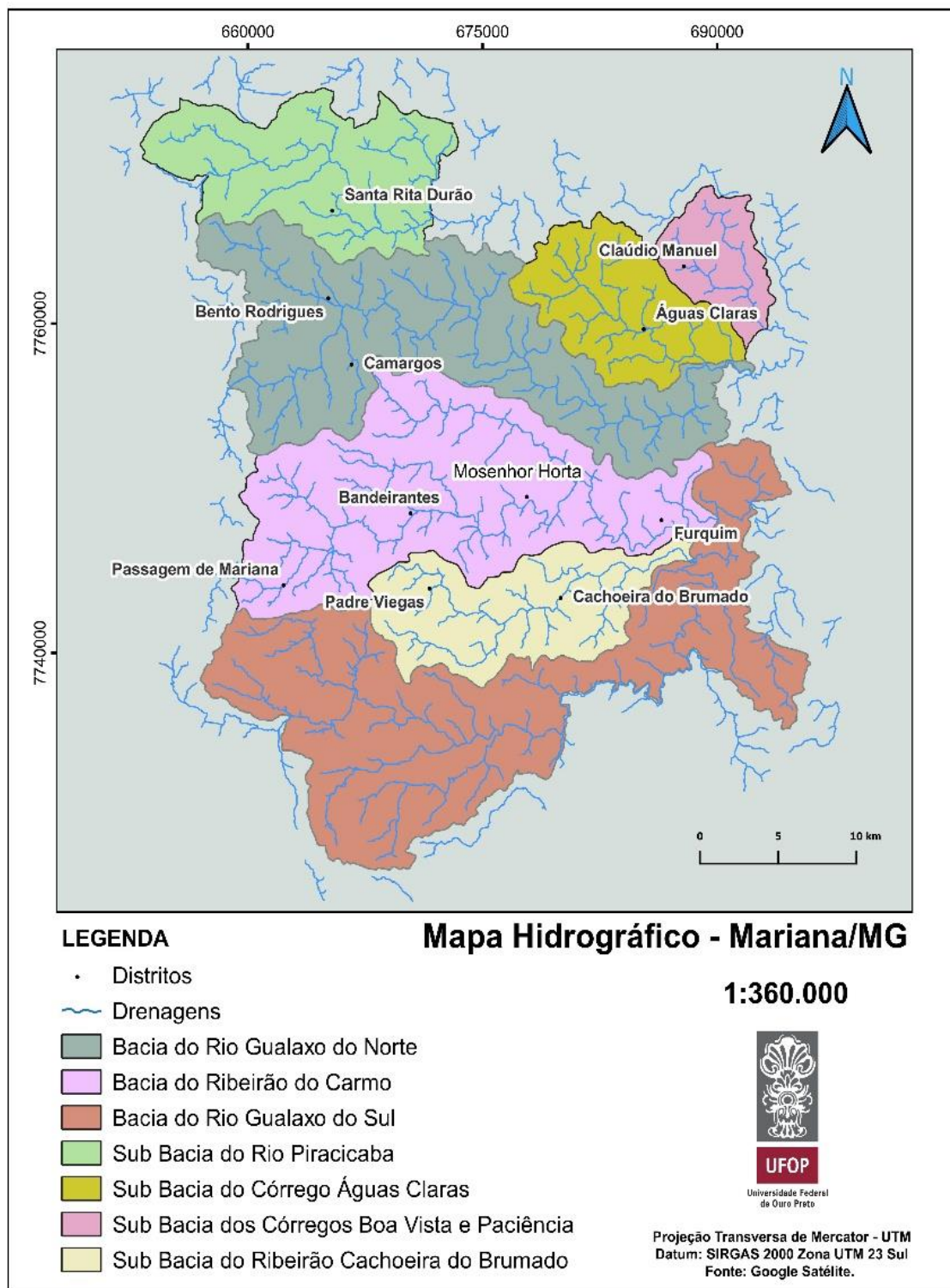


Figura 6 - Mapa de localização das bacias e sub-bacias do município de Mariana, além dos distritos. Fonte: Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias e sub-bacias (Souza 2005).

3.2 GEOLOGIA REGIONAL

Quadrilátero Ferrífero

O quadrilátero ferrífero está localizado na porção sul do Cráton São Francisco (Figura 7) esta região engloba as seguintes cidades: Itabira, Mariana, Congonhas, Itaúna, Nova Lima, Sabará, Santa Bárbara, Itabirito e Ouro Preto.

A evolução magmática da crosta arqueana no Quadrilátero Ferrífero (QF), conforme descrita por Lana et al. (2013), é caracterizada por uma sequência de eventos magmáticos e metamórficos ao longo de diferentes períodos. O evento Santa Bárbara é marcado pela formação de rochas tonalíticas-trondhjemíticas-granodioríticas (TTG's) em 2930 Ma e 2900 Ma caracterizando o Complexo Santa Bárbara, o segundo evento (Rio das Velhas I) formaram-se granito-gnaisses TTG's dos Complexos Bação, Belo Horizonte e Bonfim. O Rio das Velhas II caracteriza-se por um novo ciclo magmático sugerindo mudanças nos processos tectônicos e magmáticos, e por fim o evento metamórfico com a formação de granitóides potássicos.

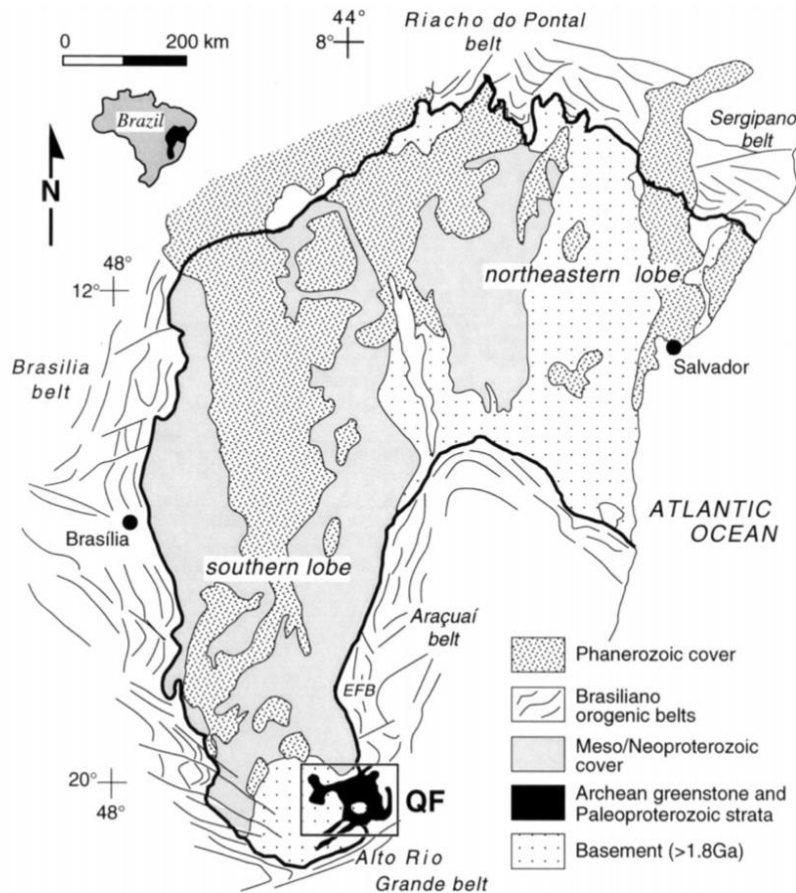


Figura 7 - Mapa geológico simplificado para o Cráton São Francisco com destaque para o Quadrilátero Ferrífero (Modificado de Alkmim & Marshak 1998).

De acordo com Alkmim & Marshak (1998), o cráton São Francisco possui datação do Eon arqueano com blocos crustais paleoproterozóicos. No que tange a porção sul do CSF, onde o quadrilátero ferrífero está localizado, tem-se a bacia do São Francisco, uma plataforma continental coberta por estratos Paleo/Mesoproterozóico a Mesozóico. Com a erosão de camadas litoestratigráficas da plataforma, houve a exposição de rochas arqueanas e paleoproterozóicas, as quais serão mais detalhadas a seguir.

Unidades litoestratigráficas do QF

De modo geral, o quadrilátero ferrífero é composto das seguintes unidades litoestratigráficas: Embasamento, Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas e por fim o Grupo Itacolomi.

Embasamento

O embasamento cristalino do QF é caracterizado por rochas que compõem complexos terrenos granito-gnáissicos (TTG's) gnáissicos e migmatíticos datados do Éon Arqueano (Alkmim & Marshak 1998). Os Complexos migmatíticos são caracterizados por rochas metamórficas de médio a alto grau e ígneas associadas (Baltazar & Raposo 1993 apud Schorscher 1975; Schorscher e Guimarães 1976; Almeida 1976 e 1977).

Supergrupo Rio das Velhas

Esta unidade é composta por uma sequência de rochas metavulcanosedimentares, também denominado de greenstone belt, datadas com 2.7 Ga em rochas efusivas ácidas do Grupo Nova Lima, sua subunidade (Machado et al 1992). Um tipo de rocha característica é a Formação Ferrífera Bandada (BIF) (Alkmim & Marshak 1998).

De acordo com Ladeira (1980) e Noce (1992) a caracterização litoestratigráfica do Grupo Nova Lima pode ser dividida em: unidade metavulcânica (rochas ultramáficas basais, metabasaltos, formação ferrífera do tipo Algoma, metacherts, filitos carbonosos, meta-riolitos subordinados e xistos tufáceos); unidade metassedimentar química (intercalação da rocha tipo BIF com filitos carbonosos e xistos tufáceos félsicos a intermediários) e, por fim, a unidade metassedimentar clástica composta por rochas carbonáticas, quartzitos, metaconglomerados e quartzo-mica xisto.

No topo tem-se o Grupo Maquiné definido por Dorr et al (1957) com rochas metassedimentares clásticas. Zucchetti & Baltazar (2000) definiu os tipos de rocha como xisto quartzo-mica com intercalações de quartzito micáceo e camadas

subordinadas de metamicroconglomerado e metaconglomerado polimítico da Formação Palmital, além de sericita quartzito com intercalações de metaconglomerado polimítico e camadas xistosas com cloritóide da Formação Casa Forte.

Supergrupo Minas

Alkmim e Marshak (1998) classificam o Supergrupo Minas como uma sequência metassedimentar que sucede o Supergrupo Rio das Velhas com inconformidades. Nesse sentido, esta unidade é estruturada por uma variedade de subunidades que foram depositadas no Éon Proterozóico: Grupo Caraça, Grupo Itabira, Grupo Piracicaba e Grupo Sabará.

O Grupo Caraça é composto pela Formação Moeda e Formação Batatal. A primeira é caracterizada por conglomerados, filitos e quartzitos indicando uma variação composicional e uma possível transgressão marinha em um ambiente fluvial (Renge 1993). De outra forma, a Formação Batatal é oriunda de um ambiente marinho plataformar (Noce 1995), com rochas do tipo filito grafitoso, metachert e formação ferrífera bandada.

Ainda no ambiente marinho-plataformar, o Grupo Itabira é caracterizado pela inserção de uma sedimentação química, com a rocha Itabirito da Formação Cauê e carbonática, com dolomito da Formação Gandarela (Noce 1995).

O início deposicional do Grupo Piracicaba é marcado por um período de instabilidade tectônica (Noce 1995), o que explica a discordância na coluna estratigráfica entre a Formação Gandarela e Cercadinho (Figura 8). Desta forma a composição petrográfica da Formação Cercadinho é constituída por conglomerados basais e dolomitos, quartzitos e filitos ferruginosos (Dorr 1969). Segundo Noce (1995) apud Moraes (1985), a Formação Fecho do Funil é caracterizada por uma sequência transgressiva com rochas do tipo filito quartzoso e filito dolomítico. Em ambiente de água profunda, as formações Taboões e Barreiro depositam (Noce 1995), com rochas do tipo orto quartzito e filito, respectivamente.

O Grupo Sabará é a última subunidade a compor o Supergrupo Minas. O seu início deposicional é ocasionado por uma discordância erosiva local, a qual as rochas do Grupo Sabará encobrem todas as formações do Grupo Piracicaba (Dorr 1969). Conglomerados basais e expostos, xisto Sabará (Clorita xisto) são descritos com seixos graníticos. Noce (1995) classifica como a primeira ocorrência de clastos de granito no Supergrupo Minas, dessa forma pode-se dizer que o Grupo Sabará é a sedimentação sin-orogênica do Evento Transamazônico.

Grupo Itacolomi

Segundo Alkmim & Marshak (1998), o Grupo Itacolomi é composto por conglomerados polimíticos com clastos da Formação Cauê e arenito de granulometria grossa. Outra característica importante desta unidade é a sequência tipo molássica, que sucede a sedimentação do Grupo Sabará (Noce 1995).

A partir da apresentação das unidades litoestratigráficas do quadrilátero ferrífero, a Figura 8 abaixo apresenta a coluna estratigráfica desta região.

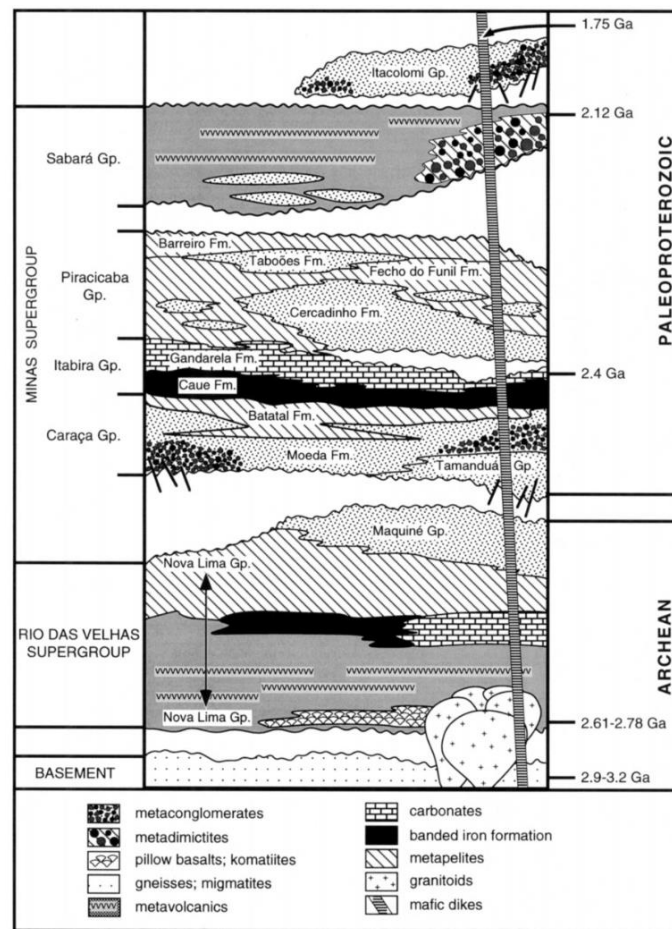


Figura 8 - Coluna estratigráfica do quadrilátero ferrífero. Fonte: Alkmim & Marshak (1998).

3.3 GEOLOGIA LOCAL

O contexto geológico local da cidade de Mariana contém importantes unidades litoestratigráficas do quadrilátero ferrífero. O mapa geológico local (Figura 9), apresenta as litologias regionais do QF abordadas no subcapítulo anterior. Com isso, serão descritas as unidades litológicas locais a seguir.

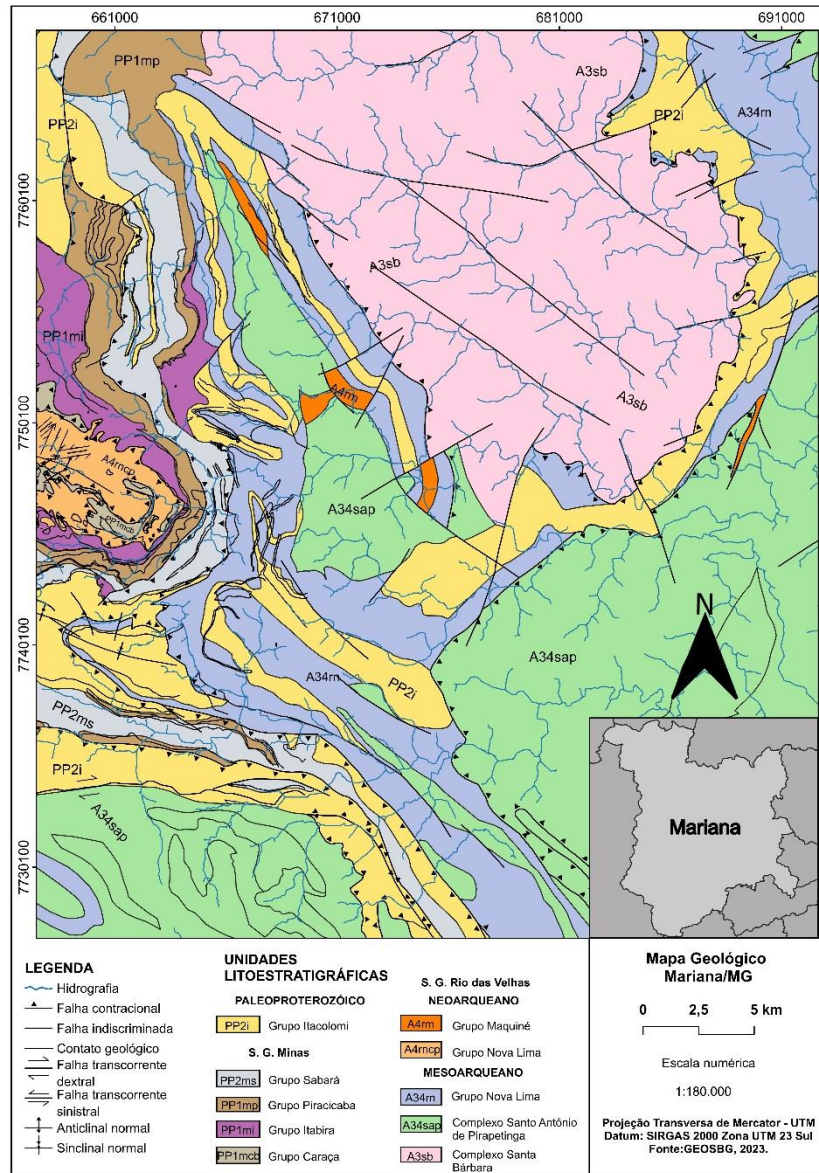


Figura 9 - Mapa geológico local do território de Mariana, MG. Base: Mapa geológico de Minas Gerais (1:1.000.000) GEOSBG (2023); Hidrografia (FABDEM 2023).

Complexo Santa Bárbara

O Complexo Santa Bárbara é parte dos complexos migmatíticos definidos por Alkmim e Marshak (1998) no embasamento do Supergrupo Rio das Velhas. A autora Sichel (1983) destaca que os tipos de rochas característicos, são: (i) migmatitos, (ii) anfibolitos e (iii) gnaisses metatéticos. O anfibolito desta unidade possui composição mineralógica com biotita e clorita de Mg com inclusões de quartzo e proporção de até 40% de plagioclásio (Baltazar & Raposo 1993). No mapa acima (Figura 9) pode-se localizar este domínio geológico na porção norte e nordeste.

Complexo Santo Antônio do Pirapetinga

De acordo com a sequência estratigráfica, o Complexo Santo Antônio do Pirapetinga é caracterizado por rochas básicas e ultrabásicas com metamorfismo e metassomatismo e gnaisses tonalíticos a graníticos (Baltazar & Raposo 1993). No mapa, esta unidade do embasamento está alocada em grande parte na porção sudeste do município, uma parte a sudoeste e um fragmento delgado a noroeste.

Grupo Nova Lima

O Grupo Nova Lima aparece no município de Mariana subdividido em duas unidades, uma pertencente ao embasamento com rochas metavulcânicas de composição máfica-ultramáfica e textura do tipo spinifex (Souza 2004). A oeste, preenchendo o antiforme de Mariana, visualiza-se no mapa geológico local esta unidade (Figura 9).

De acordo com a classificação de Ladeira (1980) o outro litotipo está incluído no Supergrupo Rio das Velhas, caracterizado por rochas metassedimentares clásticas e químicas na região estudada, Souza (2004) destacou a ocorrência de rochas como metacherts, clorita xisto e filito grafitoso. Ela aparece a noroeste e sudeste do território marianense.

Grupo Maquiné

O Grupo Maquiné aparece no mapa geológico abaixo em pequenas porções delgadas e tubulares do centro a noroeste, a oeste e na direção leste. As rochas encontradas na região são os quartzitos, rochas quartzosas com feldspatos e micas que apresentam níveis ferruginosos (Baltazar & Raposo 1993).

Grupo Caraça

Pertencente ao Supergrupo Minas, o Grupo Caraça ocorre no centro do anticlinal à oeste de Mariana. Souza (2004) define que as rochas presentes na região são os quartzitos sericíticos da Formação Moeda e xistos sericíticos da Formação Batatal.

Grupo Itabira

O Grupo Itabira ocorre nas bordas do anticlinal local a noroeste no território municipal, os principais litotipos são os itabiritos da Formação Cauê na base e as rochas carbonáticas da Formação Gandarela ao topo (Souza 2004).

Grupo Piracicaba

Na região de Mariana, o Grupo Piracicaba é subsequente ao Grupo Itabira, também na porção noroeste, apenas algumas lentes afloram a sudoeste. De acordo com Baltazar & Raposo (1993) as rochas que compõem as sub unidades litoestratigráficas são: quartzitos ferruginosos da Formação Cercadinho (Sichel 1983); Filitos dolomíticos

da Formação Fecho do Funil; quartzitos finos da Formação Taboões e filitos carbonosos da Formação Barreiro.

Grupo Sabará

O Grupo Sabará é composto em suma por clorita xisto e pelo mapa geológico local está difundido em forma delgada de noroeste a sudoeste.

Grupo Itacolomi

Assim como na literatura, as rochas do Grupo Itacolomi na região estudada são os conglomerados polimíticos e quartzitos médios (Souza 2004). Está distribuído em fatias médias de noroeste a sudoeste e na porção nordeste. No mapa geológico local (Figura 9) esta unidade preenche o sinclinal de Mariana. Para Baltazar e Raposo (1993), o quartzito observado na Folha de Mariana apresenta a composição mineralógica de cianita em prisma e sericita.

3.4 GEOQUÍMICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

O Quadrilátero Ferrífero é uma das regiões mais ricas em minério de ferro do Brasil e do mundo, concentrando grandes depósitos desse recurso natural, especialmente na porção leste onde o município de Mariana se localiza. Para Bölviken (1990), as províncias metalogenéticas podem coocorrer com as províncias geoquímicas. Nesse sentido, lugares que apresentam depósitos de minério também podem possuir concentrações geoquímicas significativas dos elementos formadores daquela rocha.

A região é marcada pela intensa atividade mineradora, incluindo operações em minas de grande porte, como o Complexo de Germano, que são focadas principalmente na extração de ferro. Esses processos minerários podem impactar a qualidade das águas e a geodinâmica dos rios da região, afetando tanto o ambiente aquático quanto as comunidades locais. Costa et al (2003) aborda que nessa área, as formações geológicas mineralizadas são entrecortadas por sistemas fluviais que pertencem à bacia hidrográfica do Rio Doce.

O mapa hidroquímico abaixo (Figura 10) apresenta um exemplo da coleta de águas superficiais e o resultado de Ferro na Bacia do Rio Doce. A imagem apresenta o Rio Gualaxo do Norte, localizado em Mariana, município do QF (Viglio 2016).

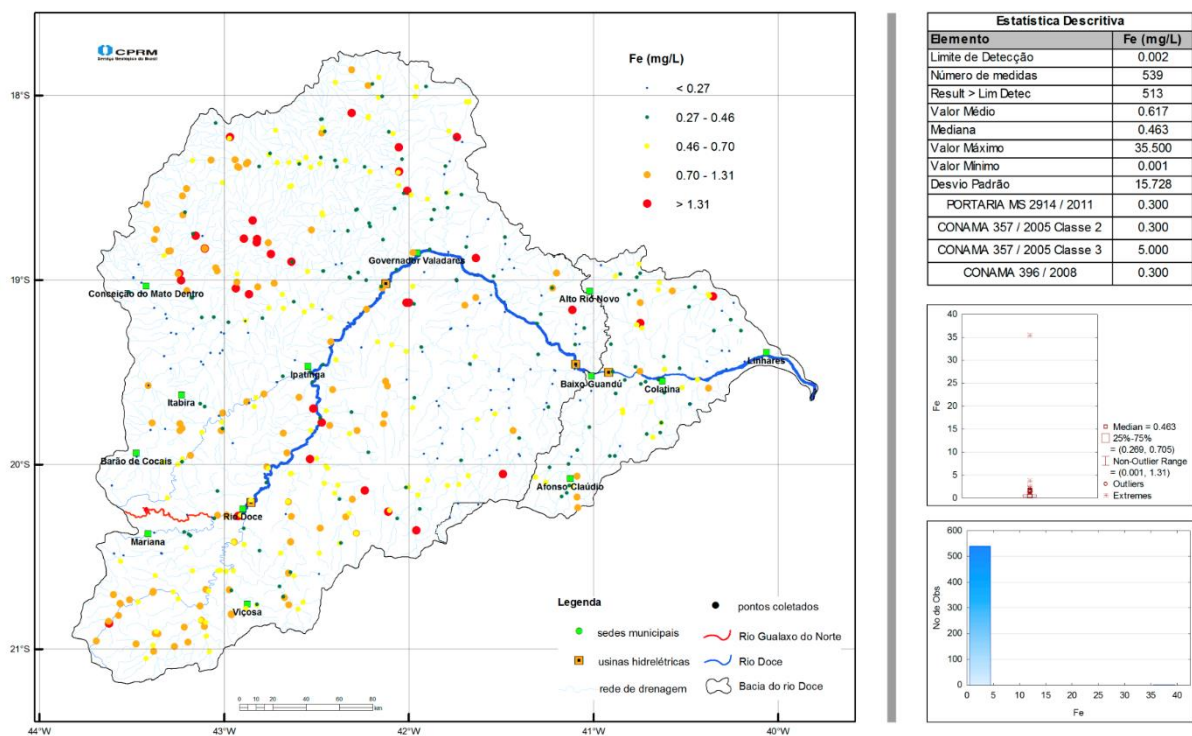


Figura 10 - Mapa hidroquímico do elemento Ferro em amostragens na Bacia do Rio Doce (Viglio, 2016).

A caracterização geoquímica das unidades litoestratigráficas do Quadrilátero Ferrífero (QFe) é essencial para uma compreensão aprofundada das rochas e dos elementos presentes na região. Nesse contexto, serão descritas as litologias dos Complexos Gnáissicos, do Supergrupo Rio das Velhas, do Supergrupo Minas e do Grupo Itacolomi.

De acordo com estudos geoquímicos da Folha de Mariana SF.23-X-B-I o qual dividiu as litologias em cinco populações geológicas, a População 1 representa o Complexo de Santa Bárbara. Os resultados obtidos para sedimento de corrente compreendem em associações geoquímicas, assim, para este grupo citado houveram os seguintes elementos associados: Co-Ni-Cr e Co-Zn. Isto indica a co-precipitação do óxido de Ferro (Baltazar & Raposo 1993).

Outra unidade importante do embasamento é o Complexo Santo Antônio do Pirapetinga localizado a Leste e Noroeste do quadrilátero, sua constituição petrográfica é de gnaisses leucocráticos, e rochas máficas e ultramáficas (Roeser 1977). O levantamento geológico feito na década de 90 pela Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (Baltazar & Raposo 1993) aborda esta litologia na População 2 da caracterização geoquímica citada, a associação Ni-Cr presente destaca as rochas ultrabásicas deste Complexo.

Seguindo a cronoestratigrafia das unidades do QFe, o Supergrupo Rio das Velhas é composto pelos Grupo Quebra Osso, Nova Lima e Maquiné. Para Schorscher (1979) o Grupo Quebra Osso é definido como a base do Supergrupo Rio das Velhas com os komatíitos. A geoquímica dos komatíitos é composta por altas concentrações de Ni e Cr (Ferreira 2020).

Ladeira (1980) definiu o Grupo Nova Lima em três sub-unidades: metavulcânicas (rochas ultramáficas basais, metabasaltos, formação ferrífera do tipo Algoma, metacherts, filitos carbonosos, meta-riolitos subordinados e xistos tufáceos), metassedimentares químicas (intercalação da rocha tipo BIF com filitos carbonosos e xistos tufáceos félsicos a intermediários) e clásticas (rochas carbonáticas, quartzitos, metaconglomerados e quartzo-mica xisto). De acordo com o mapeamento geológico da Folha de Mariana SF.23-X-B-I (Baltazar & Raposo 1993), esta unidade está representada na População 3, e possui associação química do Cu-Zn para as rochas vulcânicas básicas do Grupo Nova Lima.

O Grupo Maquiné também compõe o Supergrupo rio das Velhas e é definido por rochas metassedimentares clásticas para Formação Palmital e Casa Forte. No entanto, no que tange a geoquímica dos elementos característicos destas rochas, não foram encontrados estudos significativos.

A sequência estratigráfica do Supergrupo Minas é composta por rochas metassedimentares datadas do Paleoproterozóico (Alkmim & Marshak, 1998). O Grupo Caraça, unidade basal dessa sequência, inclui a Formação Moeda, composta por quartzitos e conglomerados, e a Formação Batatal, que é formada por filitos grafitosos. Em termos de caracterização geoquímica, os conglomerados da Formação Moeda, segundo o estudo de Minter et al. (1990), apresentam anomalias nos elementos inorgânicos arsênio (As), cromo (Cr), urânio (U), tório (Th) e estrôncio (Sr). Já nos filitos da Formação Batatal, Cabral et al. (2011) detectaram a presença de molibdênio (Mo) em análises isotópicas.

Ao subir a estratigrafia tem-se o Grupo Itabira, composto pela Formação Cauê (Itabiritos) e Formação Gandarela (Dolomitos). Para a Folha de Mariana (CPRM 1993), a concentração alta do metal ferro está atrelada a Formação Cauê. Estudos recentes abordam a gama de diferentes tipos de itabiritos presentes no quadrilátero ferrífero (ENDO et al. 2020).

Os dolomitos da Formação Cercadinho e Fecho do Funil do Grupo Piracicaba apresentam concentrações anômalas de ferro (Fe), manganês e estrôncio (Bekker et al.

2003). De acordo com Romano (1989), a Formação Barreiro possui filitos carbonosos com pirritas.

Dessa forma, constatou-se a diversidade litológica e geoquímica das rochas no Quadrilátero Ferrífero, com altas concentrações de elementos inorgânicos, o que corrobora a afirmação de Bölviken (1990) de que províncias metalogenéticas coincidem com províncias geoquímicas, uma vez que a região se destaca pela presença significativa de metais em sua geologia.

4 RESULTADOS E DICUSSÕES

Neste capítulo serão descritos e apresentados os pontos amostrados bem como os resultados de campo e os resultados analíticos das amostragens realizadas no município de Mariana.

4.1 Descrição e apresentação geral dos pontos

Os dados serão apresentados por bacia hidrográfica, para uma melhor compreensão do contexto hídrico. A Figura 11 apresenta os pontos amostrados e as bacias e sub-bacias hidrográficas contida no limite municipal de Mariana, são elas: Bacia Rio Gualaxo do Norte, Bacia Ribeirão do Carmo, Bacia do Rio Gualaxo do Sul, Sub-bacia do rio Piracicaba, Sub-bacia do Córrego Águas Claras, Sub-bacia dos Córregos Boa Vista e Paciência e Sub-bacia do Ribeirão Cachoeira do Brumado.

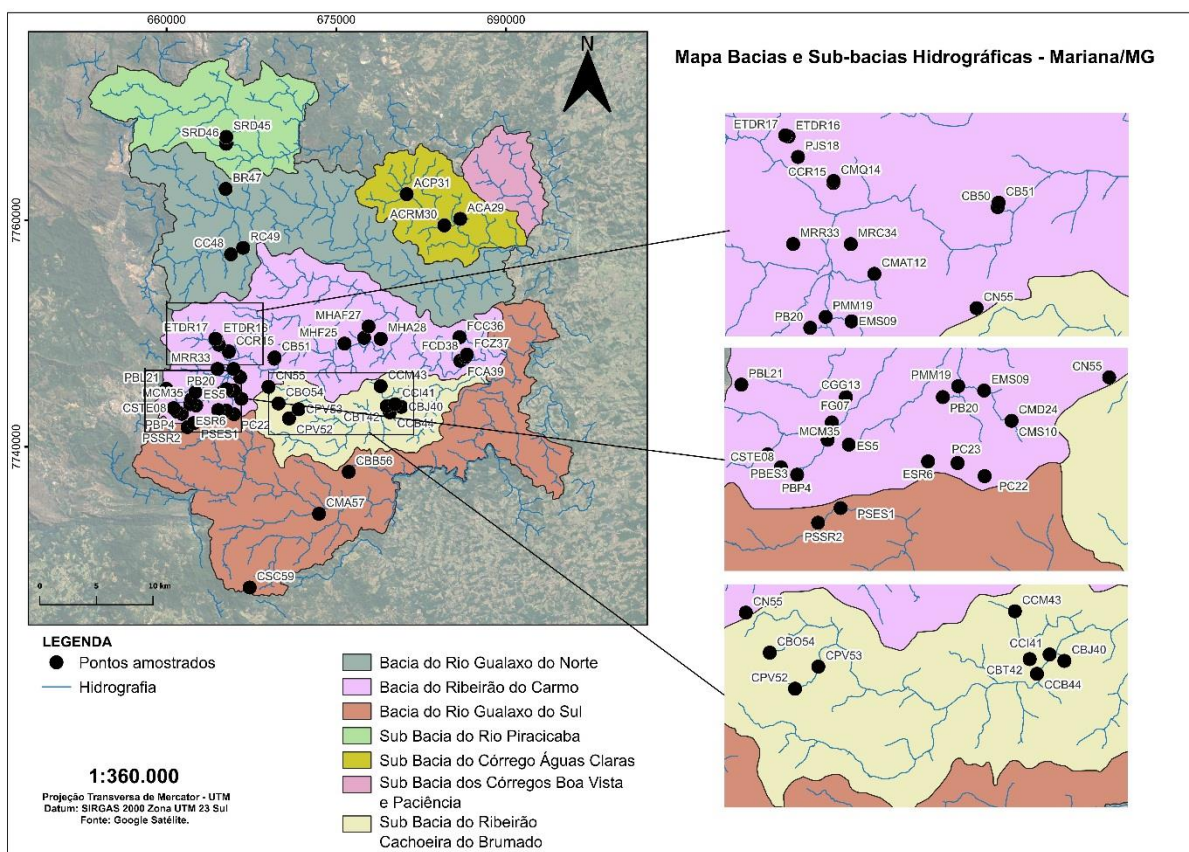


Figura 11 - Pontos amostrados e as bacias e sub-bacias do município de Mariana-MG. Fonte: Bacias (Souza 2005).

A apresentação dos pontos por bacia inclui também uma caracterização geológica local com as litologias presentes no município de Mariana. Nesse sentido o mapa a seguir (Figura 12) mostra os 58 pontos amostrados, as unidades litoestratigráficas, a geologia estrutural da área e as principais drenagens. Salienta-se que para a construção deste produto cartográfico foram utilizadas as bases da Folha de Mariana (SF.23-X-B-I-3 e SF.23-X-B-IV-1) e o mapa geológico de Minas Gerais 1:1.000.000 via GEOSBG. A descrição das unidades litológicas e suas siglas foram feitas utilizando o mapa geológico de Mariana 1: 50.000.

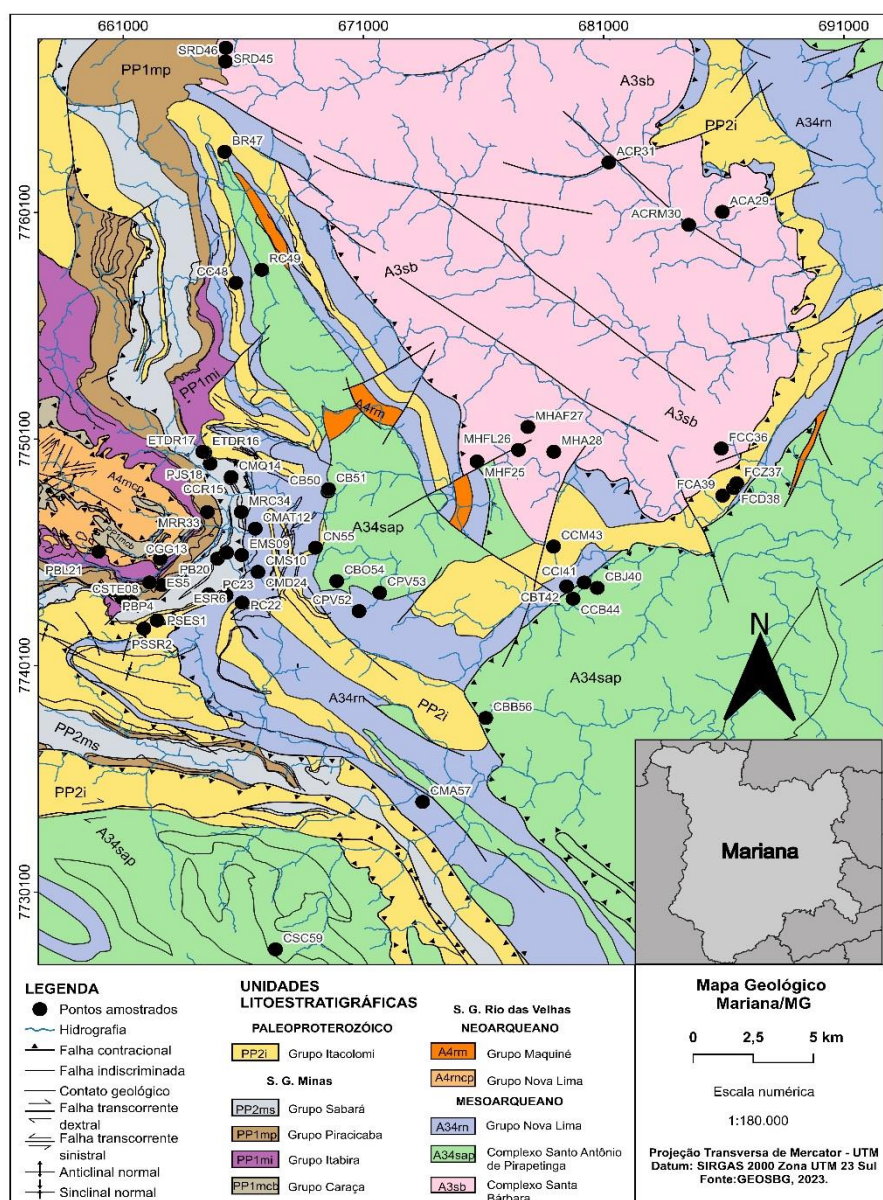


Figura 12 - Mapa geológico local com os pontos amostrados. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais 1:1.000.000 e Folha Mariana.

Deste modo, nos sub-capítulos seguintes será apresentada uma descrição detalhada por bacia e sub-bacia hidrográfica destacando a litologia de cada ponto. Pois assim, será possível

identificar, a partir das análises laboratoriais, a relação da alteração hidroquímica de dado ponto com os elementos e as características da sua rocha fonte.

Outro dado importante são as descrições fisiográficas de cada ponto, os quais são apresentados no APÊNDICE I e abordam as especificações de cada área coletada como as captações próximas, data da coleta, características da vegetação ao redor, distritos ou bairros beneficiados pela drenagem e caracterização petrográfica em alguns pontos.

4.1.1 Bacia Rio Gualaxo do Sul

De acordo com a Tabela 5 a Bacia do Rio Gualaxo do Sul possui cinco pontos amostrados, são eles: Captação Serrinha 2 (Alta, Eta Santa Efigênia) (PSSR2), Captação Serrinha 1 (Eta Sul) (PSES1), Captação Do João Bibito (CBB56), Captação Mainart (CMA57) e Captação Serra Do Carmo (CSC59). Na tabela estão descritos os nomes dos pontos e sua sigla, as coordenadas X e Y em UTM, a localidade dentro do território de Mariana, o tipo de estação hídrica, a sigla da unidade litológica e por fim as rochas encontradas em cada ponto.

Tabela 5 - Descrição geral dos pontos da Bacia Rio Gualaxo do Sul.

NOME DOS PONTOS	SIGLA	X	Y	LOCALIDADE	BACIA	TIPO	SIGLA_UNID	LITOTIPO
CAPTAÇÃO DO JOÃO BIBITO	CBB56	676090	7737782	BARRO BRANCO	Rio Gualaxo do Sul	CÓRREGO	A34sap	Metabasito, Gnaiss
CAPTAÇÃO MAINART	CMA57	673463	7734079	MAINART	Rio Gualaxo do Sul	CÓRREGO	A34rn	Metabasito, Metabasalto, Talco xisto, Gnaiss, Serpentinó, Ultramafito
CAPTAÇÃO SERRA DO CARMO	CSC59	667338	7727569	SERRA	Rio Gualaxo do Sul	CÓRREGO	A34sap	Metabasito, Gnaiss
CAPTAÇÃO SERRINHA 1 (ETA SUL)	PSES1	662410	7742093	PASSAGEM	Rio Gualaxo do Sul	CAPTAÇÃO	PP2i	Metaconglomerado, Quartzito, Filito, Formação ferrífera bandada
CAPTAÇÃO SERRINHA 2 (ALTA, ETA SANTA EFIGÊNIA)	PSSR2	661857	7741733	PASSAGEM	Rio Gualaxo do Sul	CAPTAÇÃO	PP2i	Metaconglomerado, Quartzito, Filito, Formação ferrífera bandada

A

Figura 13 abaixo representa um mapa geológico da Bacia Gualaxo do Sul com os pontos amostrados. Nesse sentido, pode-se inferir a litologia e a drenagem a qual pertence cada ponto. Os pontos PSES1 e PSSR2 estão contidos no Grupo Itabira onde podem aflorar as rochas: metaconglomerado, quartzito, filito, formação ferrífera bandada, a oeste da bacia. Enquanto no Complexo Santo Antônio do Pirapetinga estão os pontos CSC59 e CBB56 com gnaisses e metabasitos. O último ponto (CMA57) está presente no Grupo Nova Lima (A34rn) e sua caracterização petrográfica é de metabasito, metabasalto, talco xisto, gnaise, serpentinito, ultramafito.

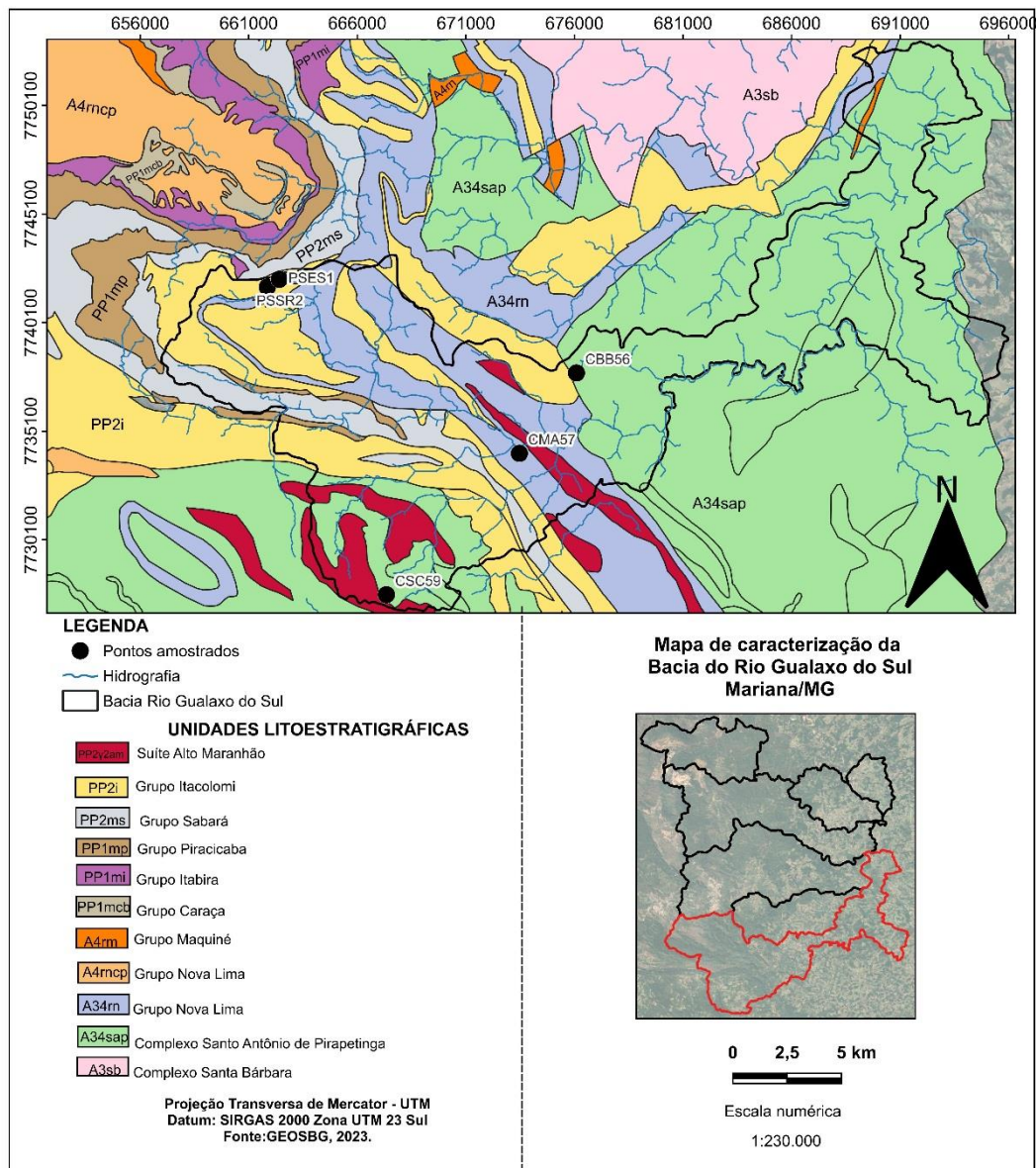


Figura 13 - Mapa de caracterização da Bacia Rio Gualaxo do Sul. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais 1:1.000.000.

4.1.2 Bacia do Ribeirão do Carmo

Tabela 6 - Descrição geral dos pontos na Bacia do Ribeirão do Carmo.

NOME DOS PONTOS	SIGLA	X	Y	LOCALIDADE	BACIA	TIPO	SIGLA_UNID	LITOTIPO
CAPTAÇÃO BANDEIRANTES	CB50	669522	7747779	BANDEIRANTES	Bacia do Ribeirão do Carmo	CÓRREGO	A34rn	Metabasito, Metabasalto, Talco xisto, Gnaiss, Serpentinó, Ultramafito
CAPTAÇÃO BANDEIRANTES	CB51	669543	7747887	BANDEIRANTES	Bacia do Ribeirão do Carmo	CÓRREGO	A34rn	Metabasito, Metabasalto, Talco xisto, Gnaiss, Serpentinó, Ultramafito
CAPTAÇÃO CRISTAIS	CCR15	665487	774837	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	CÓRREGO	PP2ms	Metatufo, Quartzito, Formação ferrífera bandada, Metapelito, Metadiamictito, Mica xisto, Filito, Conglomerado
CAPTAÇÃO GOGO	CGG13	662540	7748905	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	CÓRREGO	A4mcp	Metachert, Rocha metaultramáfica, Formação ferrífera bandada, Sericita-quartzó xisto, Metavulcânica ultramáfica, Metavulcânica máfica, Esteatito, Calcissiltito
CAPTAÇÃO MATADORO	CMAT12	666495	7746141	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	CÓRREGO	A34rn	Metabasito, Metabasalto, Talco xisto, Gnaiss, Serpentinó, Ultramafito
CAPTAÇÃO MATA DO SEMINÁRIO II	CMD24	666607	7744234	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	CÓRREGO	A34rn	Metabasito, Metabasalto, Talco xisto, Gnaiss, Serpentinó, Ultramafito

NOME DOS PONTOS	SIGLA	X	Y	LOCALIDADE	BACIA	TIPO	SIGLA_UNID	LITOTIPO
CAPTAÇÃO MAQUINE	CMQ14	665495	774842	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	CÓRREGO	PP2ms	Metatufo, Quartzito, Formação ferrífera bandada, Metapelito, Metadiamictito, Mica xisto, Filito, Conglomerado
CAPTAÇÃO MATA SEMINARIO	CMS10	666089	7744840	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	CÓRREGO	A34rn	Metabasito, Metabasalto, Talco xisto, Gnaiss, Serpentinó, Ultramafito
CAPTAÇÃO NIVALDA	CN55	669003	774530	PADRE VIEGAS	Bacia do Ribeirão do Carmo	CÓRREGO	A34rn	Metabasito, Metabasalto, Talco xisto, Gnaiss, Serpentinó, Ultramafito
CAPTAÇÃO SANTA EFIGENICA	CSTE08	660619	7743411	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	CÓRREGO	PP1mp	Quartzito ferruginoso, Sericita xisto, Metaconglomerado, Quartzito, Mármore dolomítico, Formação ferrífera bandada
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO MATA SEMINARIO	EMS09	665933	7744977	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	ESTAÇÃO	PP2ms	Metatufo, Quartzito, Formação ferrífera bandada, Metapelito, Metadiamictito, Mica xisto, Filito, Conglomerado
RESERVATÓRIO ETA SUL	ES5	662612	7743649	PASSAGEM	Bacia do Ribeirão do Carmo	ESTAÇÃO	PP1mp	Quartzito ferruginoso, Sericita xisto, Metaconglomerado, Quartzito, Mármore dolomítico, Formação ferrífera bandada

NOME DOS PONTOS	SIGLA	X	Y	LOCALIDADE	BACIA	TIPO	SIGLA_UNID	LITOTIPO
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO Sta RITA	ESR6	664557	7743238	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	ESTAÇÃO	PP2ms	Metatufo, Quartzito, Formação ferrífera bandada, Metapelito, Metadiamictito, Mica xisto, Filito, Conglomerado
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DEL REY	ETDR16	664387	7749511	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	MINA	PP2ms	Metatufo, Quartzito, Formação ferrífera bandada, Metapelito, Metadiamictito, Mica xisto, Filito, Conglomerado
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DEL REY	ETDR17	664307	7749540	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	MINA	PP2ms	Metatufo, Quartzito, Formação ferrífera bandada, Metapelito, Metadiamictito, Mica xisto, Filito, Conglomerado
CAPTAÇÃO CAIXA DO ARRAIAL NOVO	FCA39	685954	7747600	FURQUIM	Bacia do Ribeirão do Carmo	CÓRREGO	PP2i	Metaconglomerado, Quartzito, Filito, Formação ferrífera bandada
CAPTAÇÃO CÓRREGO DOS COELHOS	FCC36	685895	7749678	FURQUIM	Bacia do Ribeirão do Carmo	CÓRREGO	A3sb	Granodiorito, Tonalito, Trondhjemitó
RESERVATÓRIO CÓRREGO DEDE METRALHA	FCD38	686408	7747932	FURQUIM	Bacia do Ribeirão do Carmo	-	PP2i	Metaconglomerado, Quartzito, Filito, Formação ferrífera bandada
CAPTAÇÃO CÓRREGO ZECA BARBOSA	FCZ37	686539	7748142	FURQUIM	Bacia do Ribeirão do Carmo	CÓRREGO	PP2i	Metaconglomerado, Quartzito, Filito, Formação ferrífera bandada
FONTE DA GLORIA	FG07	662194	7744194	PASSAGEM	Bacia do Ribeirão do Carmo	MINA	PP1mi	Filito, Xisto

NOME DOS PONTOS	SIGLA	X	Y	LOCALIDADE	BACIA	TIPO	SIGLA_UNID	LITOTIPO
CAPTAÇÃO CACHOEIRA DO MATADOURO	MCM35	662093	7743767	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	CACHOEIRA	PP1mi	Filito, Xisto
CAPTAÇÃO ARTUR	MHA28	678923	7749537	MONSENHOR HORTA	Bacia do Ribeirão do Carmo	NASCENTE	A3sb	Granodiorito, Tonalito, Trondhjemitó
CAPTAÇÃO ÁGUA FRIA	MHAF27	677842	7750631	MONSENHOR HORTA	Bacia do Ribeirão do Carmo	CÓRREGO	A3sb	Granodiorito, Tonalito, Trondhjemitó
CAPTAÇÃO FERREIRAS	MHF25	675726	7749108	MONSENHOR HORTA	Bacia do Ribeirão do Carmo	CÓRREGO	A3sb	Granodiorito, Tonalito, Trondhjemitó
CAPTAÇÃO FLAVINHO	MHFL26	677453	7749617	MONSENHOR HORTA	Bacia do Ribeirão do Carmo	NASCENTE	A3sb	Granodiorito, Tonalito, Trondhjemitó
RESERVATÓRIO COLINA	MRC34	665917	7746871	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	RESERVATÓRIO	PP2ms	Metatufo, Quartzito, Formação ferrífera bandada, Metapelito, Metadiamictito, Mica xisto, Filito, Conglomerado
RESERVATÓRIO ROSARIO	MRR33	664500	7746874	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	RESERVATÓRIO	PP1mp	Quartzito ferruginoso, Sericita xisto, Metaconglomerado, Quartzito, Mármore dolomítico, Formação ferrífera bandada
POÇO BUCAO	PB20	664920	7744816	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	POÇO	PP2ms	Metatufo, Quartzito, Formação ferrífera bandada, Metapelito, Metadiamictito, Mica xisto, Filito,

NOME DOS PONTOS	SIGLA	X	Y	LOCALIDADE	BACIA	TIPO	SIGLA_UNID	LITOTIPO
								Conglomerado
CAPTAÇÃO BELÉM 2 (CANO 150mm ETA SUL)	PBES3	660943	7743092	PASSAGEM	Bacia do Ribeirão do Carmo	CAPTAÇÃO	PP2ms	Metatufos, Quartzito, Formação ferrífera bandada, Metapelito, Metadiamicrito, Mica xisto, Filito, Conglomerado
POÇO BAIRRO LIBERDADE	PBL21	659973	7745121	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	POÇO	A4mcp	Metachert, Rocha metaultramáfica, Formação ferrífera bandada, Sericita- quartzito xisto, Metavulcânica ultramáfica, Metavulcânica máfica, Esteatito, Calcissiltito
CAPTAÇÃO BELÉM 4 (DESÁGUA NO PANTERA)	PBP4	661344	7742911	PASSAGEM	Bacia do Ribeirão do Carmo	CAPTAÇÃO	PP1mp	Quartzito ferruginoso, Sericita xisto, Metaconglomerado, Quartzito, Mármore dolomítico, Formação ferrífera bandada
CAPTAÇÃO PICO DA CARTUCHA I	PC22	665947	7742876	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	CÓRREGO	PP2i	Metaconglomerado, Quartzito, Filito, Formação ferrífera bandada
CAPTAÇÃO PICO DA CARTUCHA II	PC23	665282	7743198	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	CÓRREGO	A34rn	Metabasito, Metabasalto, Talco xisto, Gnaiss, Serpentinítico, Ultramafito

NOME DOS PONTOS	SIGLA	X	Y	LOCALIDADE	BACIA	TIPO	SIGLA_UNID	LITOTIPO
POÇO JARDIM SANTANA	PJS18	664620	774901	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	POÇO	PP2ms	Metatufo, Quartzito, Formação ferrífera bandada, Metapelito, Metadiamictito, Mica xisto, Filito, Conglomerado
POÇO MARIA MENINA	PMM19	665298	7745085	MARIANA	Bacia do Ribeirão do Carmo	POÇO	PP2ms	Metatufo, Quartzito, Formação ferrífera bandada, Metapelito, Metadiamictito, Mica xisto, Filito, Conglomerado

A Bacia do Ribeirão do Carmo apresenta 35 pontos amostrados do presente estudo, mais de 60% do conjunto de amostras coletadas. Este importante domínio hídrico engloba a cidade de Mariana e cinco distritos do município. De acordo com a CPRM (2016) os rios Piracicaba e do Carmo funcionam como receptores de rejeitos e efluentes gerados pela atividade mineradora. A Tabela 6 acima é uma caracterização geral dos pontos com os nomes e sua sigla, as coordenadas X e Y em UTM, a localidade dentro do território de Mariana, o tipo de estação hídrica, a sigla da unidade litológica e por fim uma descrição petrográfica.

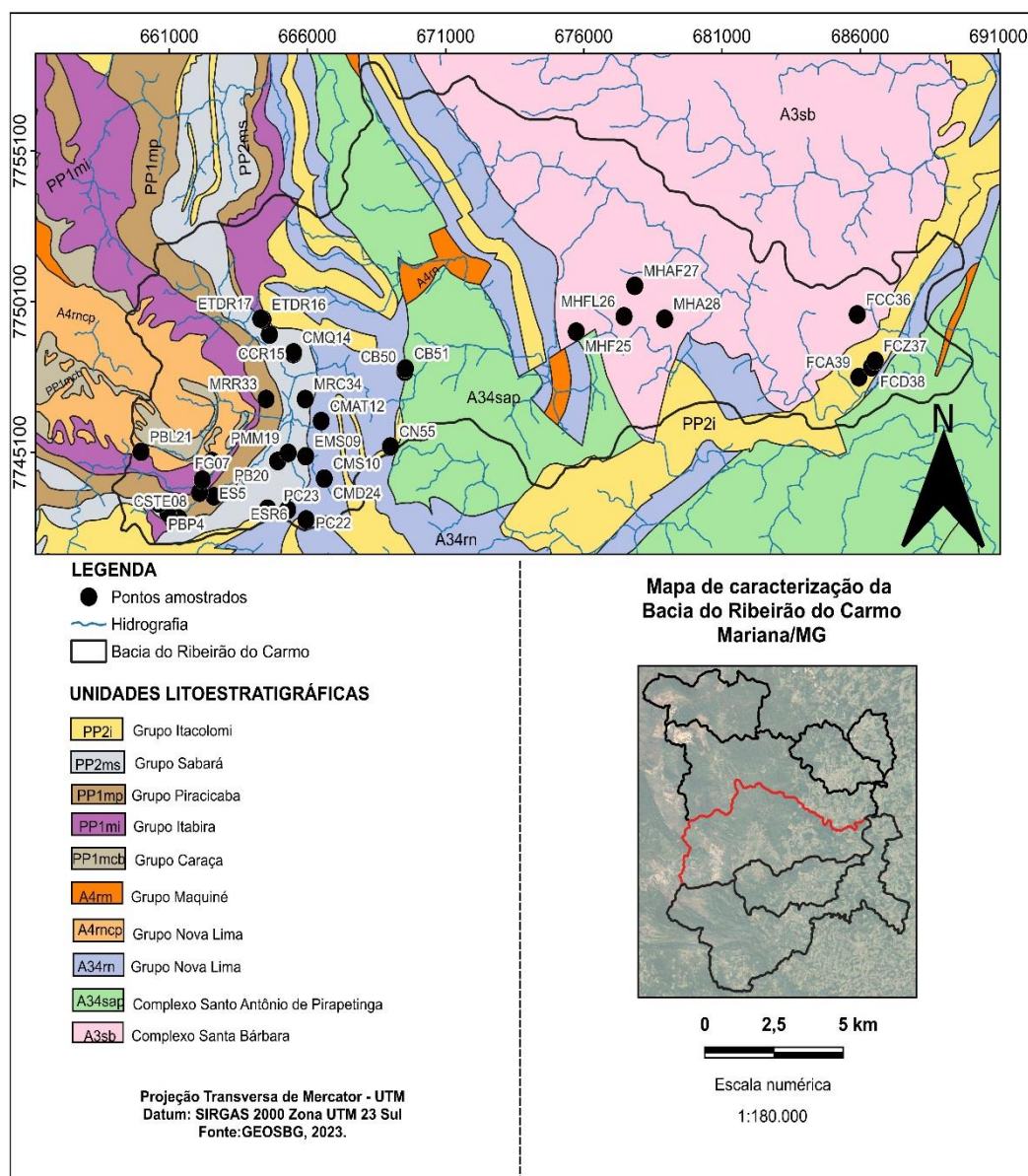


Figura 14 - Mapa de caracterização da Bacia Ribeirão do Carmo. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais 1:1.000.000.

Os pontos amostrados estão representados no mapa geológico (Figura 14) da Bacia do Ribeirão do Carmo. Ao fazer a relação das descrições do mapa e a tabela apresentada temos

que os pontos localizados no distrito de Monsenhor Horta (MHA28, MHAF27, MHF25 e MHFL26) possuem características litológicas semelhantes pois estão contidos no Complexo Santa Bárbara, a nordeste, portanto apresentam os seguintes tipos de rocha: granodiorito, tonalito e trondhjemitó. Mais a leste do mapa tem-se os pontos do distrito de Furquim (FCA39, FCC36, FCD38, FCZ37), três deles se alocam no Grupo Itacolomi (PP2i) com os seguintes tipos petrográficos: metaconglomerado, quartzitos, filito, formação ferrífera bandada. A oeste e sudoeste da bacia está a maior densidade dos pontos amostrados, 7 deles (CB50, CB51, CMAT12, CMD24, CMS10, CN55 e PC23) estão presentes no Grupo Nova Lima (A34rn), 11 pontos (PB20, PBES3, CMQ14, CCR15, EMS09, ESR6, ETDR16, ETDR17, MRC34, PJS18, PMM19) estão alocados no Grupo Sabará (PP2ms). Em menor quantidade o Grupo Piracicaba (PP1mp) apresentou 4 coletas (CSTE08, ES5, MRR33, PBP4) em sua litologia, o Grupo Itabira (PP1mi) 2 pontos amostrais (FG07, MCM35), e por fim o Grupo Nova Lima (A4mcp) com duas amostras (PBL21, CCG13).

4.1.3 Bacia do Rio Gualaxo do Norte

Tabela 7 - Descrição geral dos pontos na Bacia Rio Gualaxo do Norte.

NOME DOS PONTOS	SIGLA	X	Y	LOCALIDADE	BACIA	TIPO	SIGLA_UNID	LITOTIPO
CAPTAÇÃO BENTO RODRIGUES	BR47	665219	7762777	BENTO RODRIGUES	Rio Gualaxo do Norte	CÓRREGO	PP2i	Metaconglomerado, Quartzito, Filito, Formação ferrífera bandada
CAPTAÇÃO CAMARGOS	CC48	665685	7756995	CAMARGOS	Rio Gualaxo do Norte	RESERVATÓRIO	PP2i	Metaconglomerado, Quartzito, Filito, Formação ferrífera bandada
RESERVATÓRIO CAMARGOS	RC49	666762	7757570	CAMARGOS	Rio Gualaxo do Norte	RESERVATORIO	A34sap	Metabasito, Gnaisse

Segundo Costa et al (2001) as sub-bacias Maravilha, Bruto, Águas Claras, do médio curso do rio Gualaxo do Norte, drenam áreas com os gnaisses e granitos do Complexo Santa Bárbara. Esta bacia apresenta três pontos amostrados: Captação Camargos (CC48), Captação Bento Rodrigues (BR47) e Reservatório Camargos (RC49). A Tabela 7 apresenta que as coletas foram feitas nos distritos Camargos e Bento Rodrigues, portanto a oeste da bacia, na área de sua cabeceira.

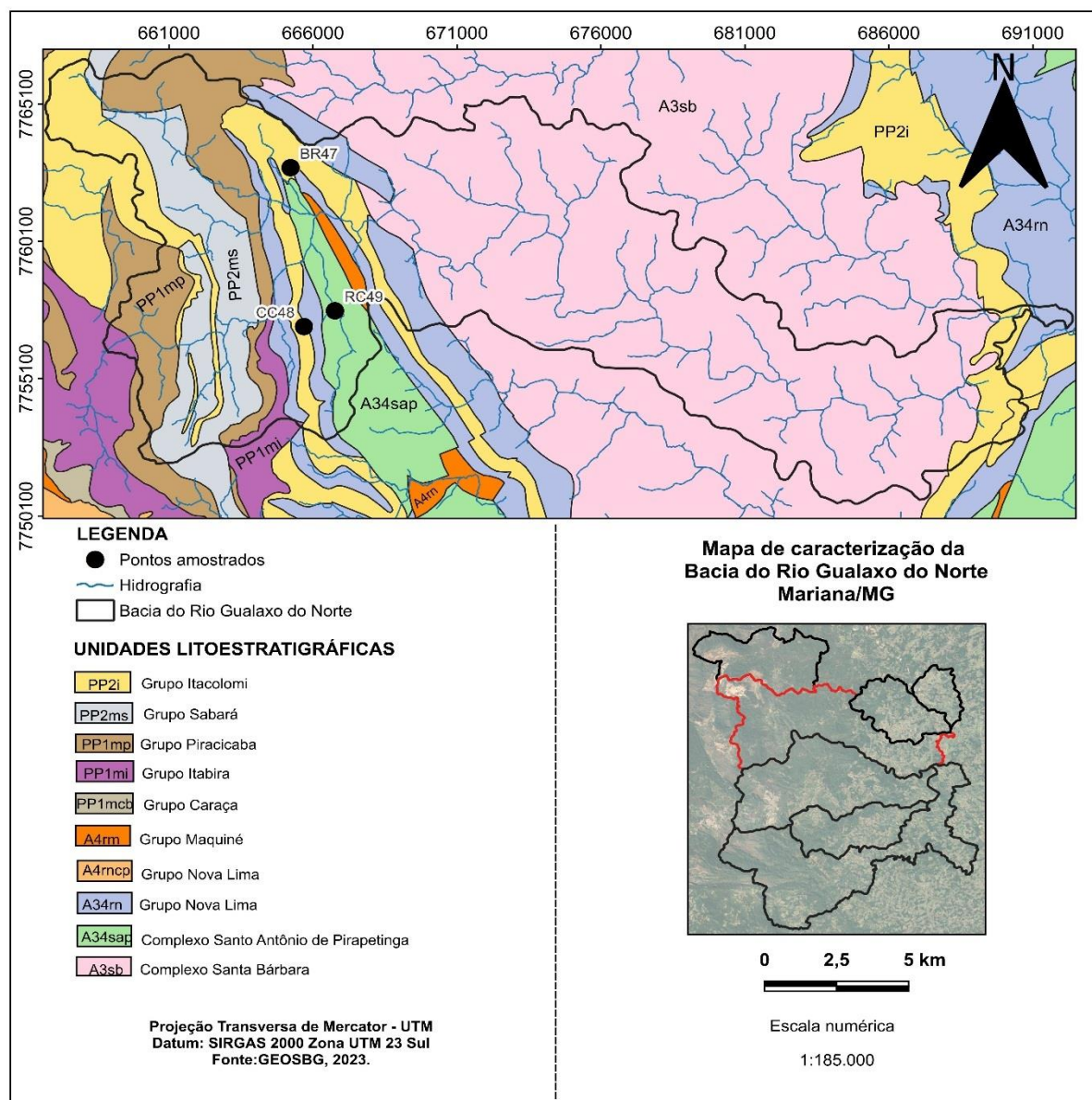


Figura 15 - Mapa de caracterização da Bacia Rio Gualaxo do Norte. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais 1:1.000.000.

A partir da Figura 15 pode-se inferir a litologia dos pontos amostrados, BR47 e CC48 estão sobre o Grupo Itabira com as rochas metaconglomerado, quartzito, filito, formação ferrífera bandada. Enquanto que a coleta RC49 está alocada no Complexo Santo Antônio de Pirapetinga com metabasitos e gnaisses.

4.1.4 Sub-bacia do Rio Piracicaba

Tabela 8 - Descrição geral dos pontos na Sub-bacia do Rio Piracicaba.

NOME DOS PONTOS	SIGLA	X	Y	LOCALIDADE	BACIA	TIPO	SIGLA_UNID	LITOTIPO
RESERVATÓRIO SANTA RITA DURÃO	SRD45	665271	7767371	SANTA RITA DURÃO	Sub bacia do Rio Piracicaba	RESERVATÓRIO	A3sb	Granodiorito, Tonalito, Trondhjemitó
RESERVATÓRIO SANTA RITA DURÃO	SRD46	665255	7766762	SANTA RITA DURÃO	Sub bacia do Rio Piracicaba	RESERVATÓRIO	A3sb	Granodiorito, Tonalito, Trondhjemitó

A Sub-bacia do Rio Piracicaba está no extremo norte do município de Mariana e faz parte do território do distrito Santa Rita Durão. Como visto na Tabela 8 acima, a sub-bacia possui 2 pontos amostrais no Reservatório Santa Rita Durão (SRD45 e SRD46).

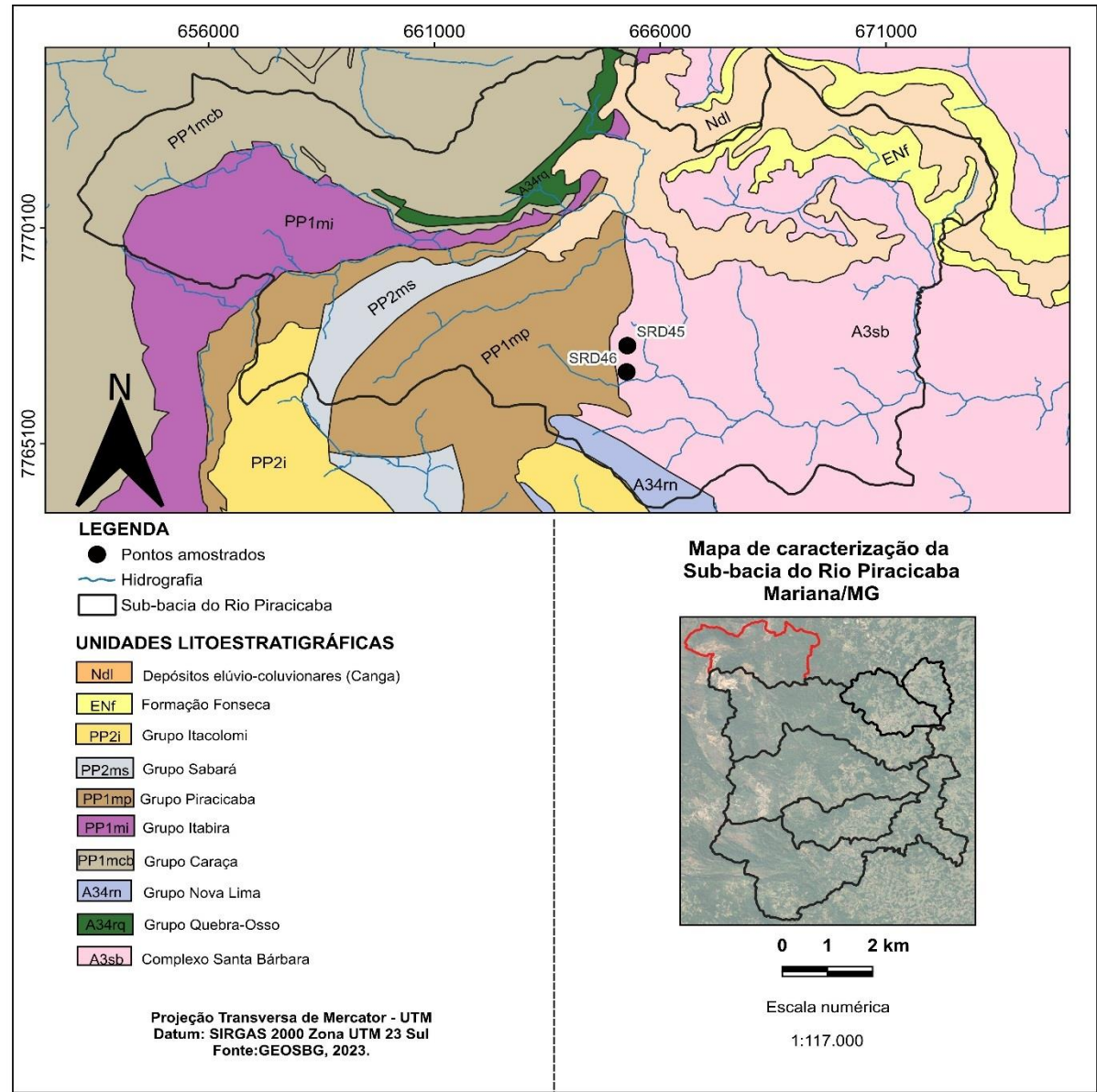


Figura 16 - Mapa de caracterização da Sub-bacia do Rio Piracicaba. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais 1:1.000.000.

O mapa acima (Figura 16) aborda características geológicas da Sub-bacia do Rio Piracicaba. Nesse sentido, os pontos SRD45 e SRD46 estão na unidade litológica do Complexo Santa Bárbara (A3sb), com os litotipos granodiorito, tonalito e trondhjemitito.

4.1.5 Sub-bacia do Córrego Águas Claras

Tabela 9 - Descrição geral dos pontos na Sub-bacia do Córrego Águas Claras.

NOME DOS PONTOS	SIGLA	X	Y	LOCALIDADE	BACIA	TIPO	SIGLA_UNID	LITOTIPO
CAPTAÇÃO DO AMADEU	ACA29	685942	7760126	ÁGUAS CLARAS	Sub bacia do Córrego Águas Claras	CÓRREGO	A3sb	Granodiorito, Tonalito, Trondhjemito
CAPTAÇÃO PRATA	ACP31	681214	7762312	ÁGUAS CLARAS	Sub bacia do Córrego Águas Claras	CÓRREGO	A3sb	Granodiorito, Tonalito, Trondhjemito
CAPTAÇÃO RIBEIRÃO MINEIRO	ACRM30	684541	7759551	ÁGUAS CLARAS	Sub bacia do Córrego Águas Claras	CÓRREGO	A3sb	Granodiorito, Tonalito, Trondhjemito

A sub-bacia do Córrego Águas Claras está localizada a nordeste do município de Mariana, e possui o distrito de mesmo nome Águas Claras. A Tabela 9 apresenta a descrição dos pontos Captação Amadeus (ACA29), Captação Prata (ACP 31) e Captação Ribeirão Mineiro (ACRM30).

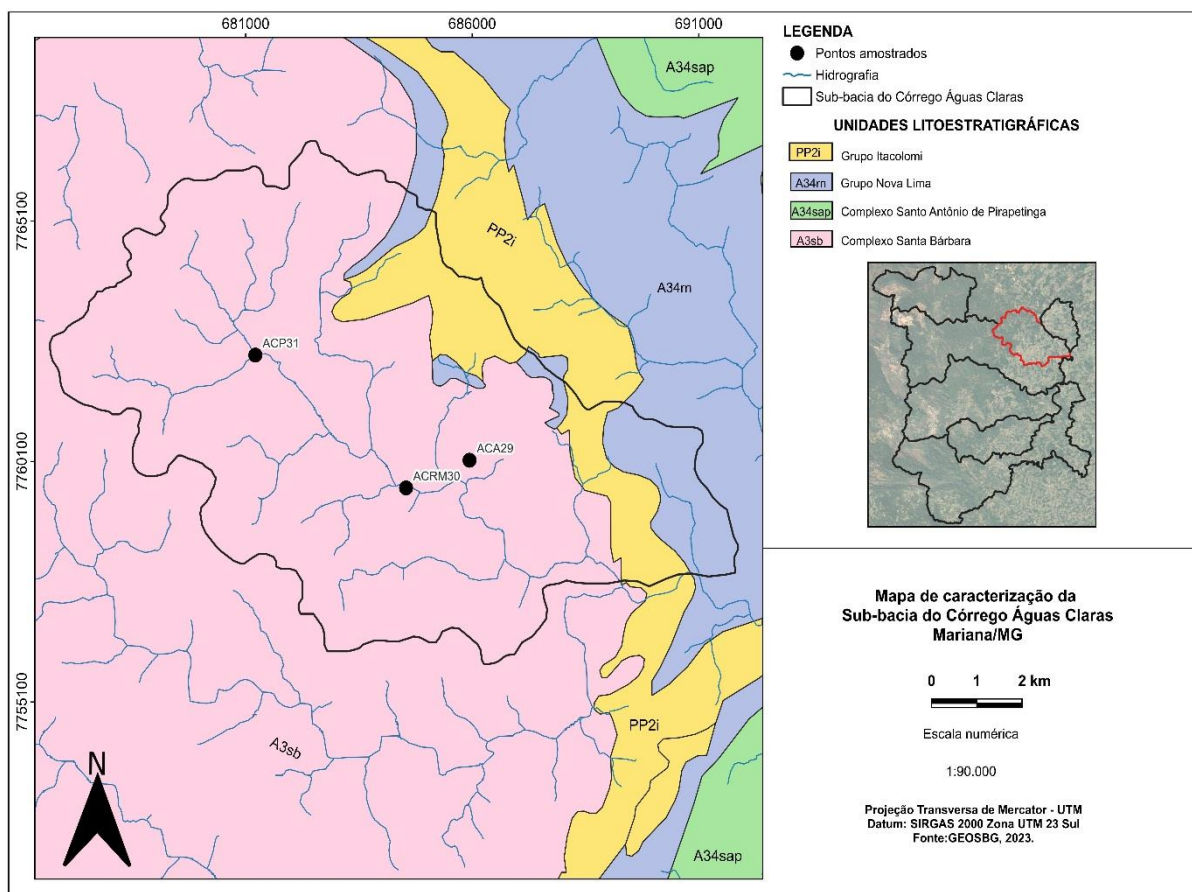


Figura 17 - Mapa de caracterização da Sub-bacia do Córrego Águas Claras. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais 1:1.000.000.

No mapa (Figura 17), os pontos ACA29, ACP31 e ACRM 30 aparecem nas drenagens da litologia do Complexo Santa Bárbara com os tipos de rocha granodiorito, gnaiss tonalito a trondhjemitico.

4.1.6 Sub-bacia do Ribeirão Cachoeira do Brumado

Tabela 10 - Descrição geral dos pontos na Sub-bacia do Ribeirão Cachoeira do Brumado.

NOME DOS PONTOS	SIGLA	X	Y	LOCALIDADE	BACIA	TIPO	SIGLA_UNID	LITOTIPO
CAPTAÇÃO CÓRREGO DO BURACO DO JUA	CBJ40	680735	7743526	CACHOEIRA DO BRUMADO	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	CÓRREGO	A34sap	Metabasito, Gnaiss
CAPTAÇÃO BURACO DA ONÇA	CBO54	669887	7743829	PADRE VIEGAS	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	CÓRREGO	A34sap	Metabasito, Gnaiss
CAPTAÇÃO BARRAGEM DO TOMBADOURO	CBT42	679456	7743591	CACHOEIRA DO BRUMADO	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	CÓRREGO	A34rn	Metabasito, Metabasalto, Talco xisto, Gnaiss, Serpentinó, Ultramafito
CAPTACAO CACHOEIRA DO BRUMADO	CCB44	679725	7743048	CACHOEIRA DO BRUMADO	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	CACHOEIRA	A34sap	Metabasito, Gnaiss
CAPTAÇÃO DA IGREJA	CCI41	680190	7743762	CACHOEIRA DO BRUMADO	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	CÓRREGO	A34sap	Metabasito, Gnaiss
CAPTAÇÃO MATA DA CIA/CACHOEIRA DO BRUMADO	CCM43	678911	7745354	CACHOEIRA DO BRUMADO	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	CÓRREGO	PP2i	Metaconglomerado, Quartzito, Filito, Formação ferrífera bandada
CAPTAÇÃO PADRE VIEGAS	CPV52	670816	7742501	PADRE VIEGAS	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	CÓRREGO	A34rn	Metabasito, Metabasalto, Talco xisto, Gnaiss, Serpentinó, Ultramafito
CAPTAÇÃO PADRE VIEGAS	CPV53	671673	7743315	PADRE VIEGAS	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	RESERVATORIO	A34sap	Metabasito, Gnaiss

A Tabela 10 organiza descrições importantes dos pontos contidos na Sub-bacia do Ribeirão Cachoeira do Brumado. O conjunto amostral presente neste domínio hídrico estão alocados nos distritos Cachoeira do Brumado e Padre Viegas. Oito pontos compõem as coletas feitas nesta sub-bacia.

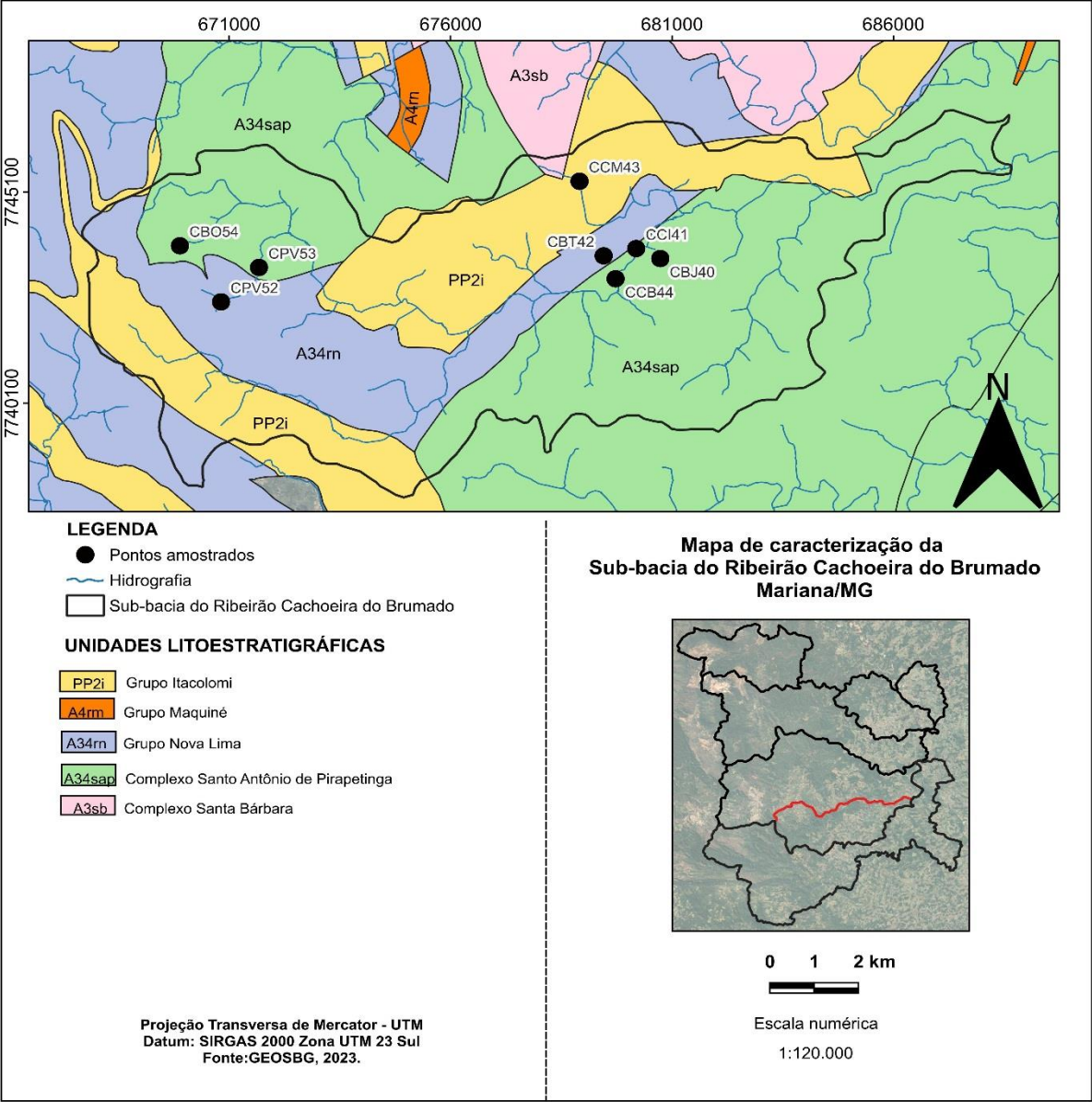


Figura 18 - Mapa de caracterização da Sub-bacia do Ribeirão Cachoeira do Brumado. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais 1:1.000.000.

De acordo com a imagem cartográfica acima (Figura 18), observa-se os pontos amostrados sobre três unidades litológicas, são elas: Complexo Santo Antônio do Pirapetinga (A34sap) com os pontos CBJ40, CBO54, CCB44, CCI41 e CPV53; Grupo Nova Lima basal (A34rn) contém CBT42 e CPV52 e por fim o Grupo Itacolomi com a amostra CCM43.

4.2 Resultados dos parâmetros medidos em campo

Nesta seção serão apresentados os resultados dos parâmetros coletados em campo os quais serão discutidos por bacia hidrográfica. Os parâmetros físico-químicos medidos foram: Condutividade elétrica, Resistividade, pH, Sólidos Totais Dissolvidos (STD) e Temperatura.

De acordo com o APÊNDICE I, as datas de coleta estão compreendidas entre 16/10/2015 e 07/11/2015, o que corresponde ao final do período seco, devendo-se, portanto, considerar as características desse período hidrológico. Outro evento relevante a ser levado em conta é o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, no distrito de Bento Rodrigues, ocorrido em 5 de novembro de 2015. No entanto, as coletas realizadas após a tragédia aconteceram nos domínios hídricos ao sul do Rio Gualaxo do Norte, uma vez que o rejeito liberado pelo rompimento foi direcionado para o Rio Doce, ao norte. Dessa forma, é possível que as amostras dos dias 06/11/2015 e 07/11/2015 não tenham sido impactadas por essa ação antrópica.

Para a análise estatística, além dos gráficos boxplots, foi apresentado uma tabela no APÊNDICE III com estes dados numéricos.

4.2.1 Condutividade Elétrica - COND ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

A condutividade elétrica (COND), segundo Parron *et al.* (2011), refere-se à capacidade de uma solução aquosa de conduzir corrente elétrica. Essa capacidade depende principalmente de fatores como a presença de íons, a concentração total de íons, a mobilidade iônica, a valência dos íons, as concentrações relativas dos diferentes íons e a temperatura da solução. A Waterwatch Australia (2005) propõe que 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de COND é o valor máximo para o consumo humano. Nesse sentido a Tabela 11 apresenta os resultados dos 56 pontos amostrados.

Tabela 11 - Dados aferidos em campo de Condutividade Elétrica (COND) por bacia, sub-bacia e ponto.

Pontos (Sigla)	Bacias e sub-bacias	COND ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
ACA29	Sub bacia do Córrego Águas Claras	22,7
ACP31	Sub bacia do Córrego Águas Claras	33,01
ACRM30	Sub bacia do Córrego Águas Claras	32,22
BR47	Rio Gualaxo do Norte	6,67

Pontos (Sigla)	Bacias e sub-bacias	COND (μS/cm)
CB50	Bacia do Ribeirão do Carmo	9,54
CB51	Bacia do Ribeirão do Carmo	10,36
CBB56	Rio Gualaxo do Sul	9,38
CBJ40	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	26,3
CBO54	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	31,94
CBT42	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	55,12
CC48	Rio Gualaxo do Norte	8,26
CCB44	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	23,49
CCI41	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	51,28
CCM43	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	6,89
CCR15	Bacia do Ribeirão do Carmo	9,86
CGG13	Bacia do Ribeirão do Carmo	37,38
CMA57	Rio Gualaxo do Sul	63,21
CMAT12	Bacia do Ribeirão do Carmo	5,68
CMD24	Bacia do Ribeirão do Carmo	39,23
CMQ14	Bacia do Ribeirão do Carmo	31,46
CMS10	Bacia do Ribeirão do Carmo	41,65
CN55	Bacia do Ribeirão do Carmo	31,69
CPV52	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	32,57
CPV53	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	31,81
CSC59	Rio Gualaxo do Sul	19,27
CSTE08	Bacia do Ribeirão do Carmo	5,32
EMS09	Bacia do Ribeirão do Carmo	55,8
ES5	Bacia do Ribeirão do Carmo	17,9
ESR6	Bacia do Ribeirão do Carmo	9,68
ETDR16	Bacia do Ribeirão do Carmo	8,15
ETDR17	Bacia do Ribeirão do Carmo	9,28
FCA39	Bacia do Ribeirão do Carmo	35,08
FCC36	Bacia do Ribeirão do Carmo	23,06
FCD38	Bacia do Ribeirão do Carmo	36,19
FCZ37	Bacia do Ribeirão do Carmo	19,84
FG07	Bacia do Ribeirão do Carmo	22,27
MCM35	Bacia do Ribeirão do Carmo	50,31
MHA28	Bacia do Ribeirão do Carmo	14,1
MHAF27	Bacia do Ribeirão do Carmo	10,35
MHF25	Bacia do Ribeirão do Carmo	44,17
MHFL26	Bacia do Ribeirão do Carmo	19,58
MRC34	Bacia do Ribeirão do Carmo	3,83
MRR33	Bacia do Ribeirão do Carmo	8,06

Pontos (Sigla)	Bacias e sub-bacias	COND ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
PB20	Bacia do Ribeirão do Carmo	142,3
PBES3	Bacia do Ribeirão do Carmo	11,76
PBL21	Bacia do Ribeirão do Carmo	157,4
PBP4	Bacia do Ribeirão do Carmo	7,85
PC22	Bacia do Ribeirão do Carmo	46,04
PC23	Bacia do Ribeirão do Carmo	9,69
PJS18	Bacia do Ribeirão do Carmo	7,4
PMM19	Bacia do Ribeirão do Carmo	151,6
PSES1	Rio Gualaxo do Sul	5,05
PSSR2	Rio Gualaxo do Sul	4,35
RC49	Rio Gualaxo do Norte	8,22
SRD45	Sub bacia do Rio Piracicaba	16,44
SRD46	Sub bacia do Rio Piracicaba	17,04

A Figura 19 apresenta um gráfico boxplot para cada bacia e sub-bacia com os resultados medidos em campo. Nota-se que os valores do primeiro e terceiro quartil dos boxplots estão entre 0 a 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ do gráfico, o que mostra que os dados aferidos nas bacias e sub-bacias não tiveram uma variação significativa e diferente entre si. Outro ponto importante na interpretação dos diagramas de caixa são os outliers observados na Bacia do Ribeirão do Carmo (PMM19, PB20 e PBL21), Bacia do Rio Gualaxo do Sul (CMA 57) e na Sub-bacia da Cachoeira do Brumado (CCM43 e CBT42). Como visto, a Bacia do Ribeirão do Carmo possui uma malha amostral de 35 pontos coletados e juntamente com os pontos de Cachoeira do Brumado possuem maior condutividade elétrica.

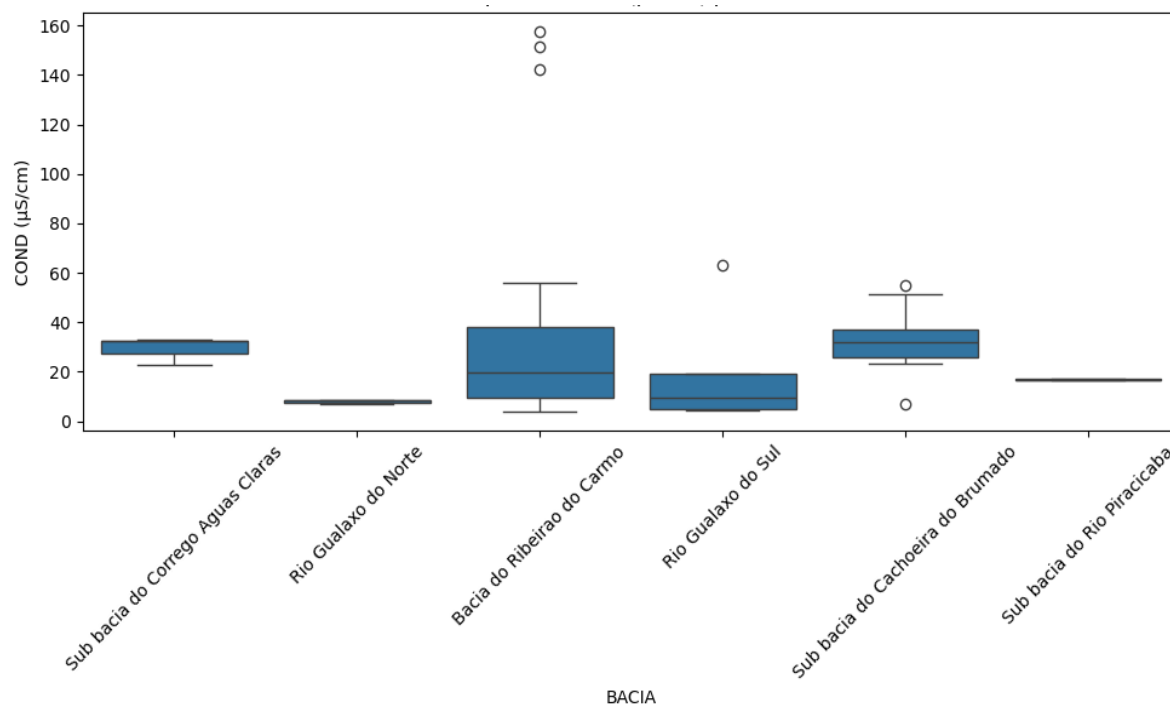


Figura 19 - Gráfico com boxplots por bacia e sub-bacia do parâmetro Condutividade Elétrica (COND).

No mapa abaixo (Figura 20) pode-se ver os pontos amostrados, os seus valores, as litologias e os limites das bacias e sub-bacias as quais estão inseridos. A CETESB (2014) preconiza que valores acima de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de condutividade elétrica podem indicar ambientes afetados pela concentração de íons. Sendo assim, os pontos amostrados com estas concentrações superiores se referem a superfície amostral de outiliers a oeste da Bacia do Rio do Carmo, os quais: PMM19 apresenta 151,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, PBL21 com 157,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e PB20 possui 142,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Inseridos nas unidades litológicas paleoproterozóicas do Grupo Sabará e do Grupo Itabira, respectivamente.

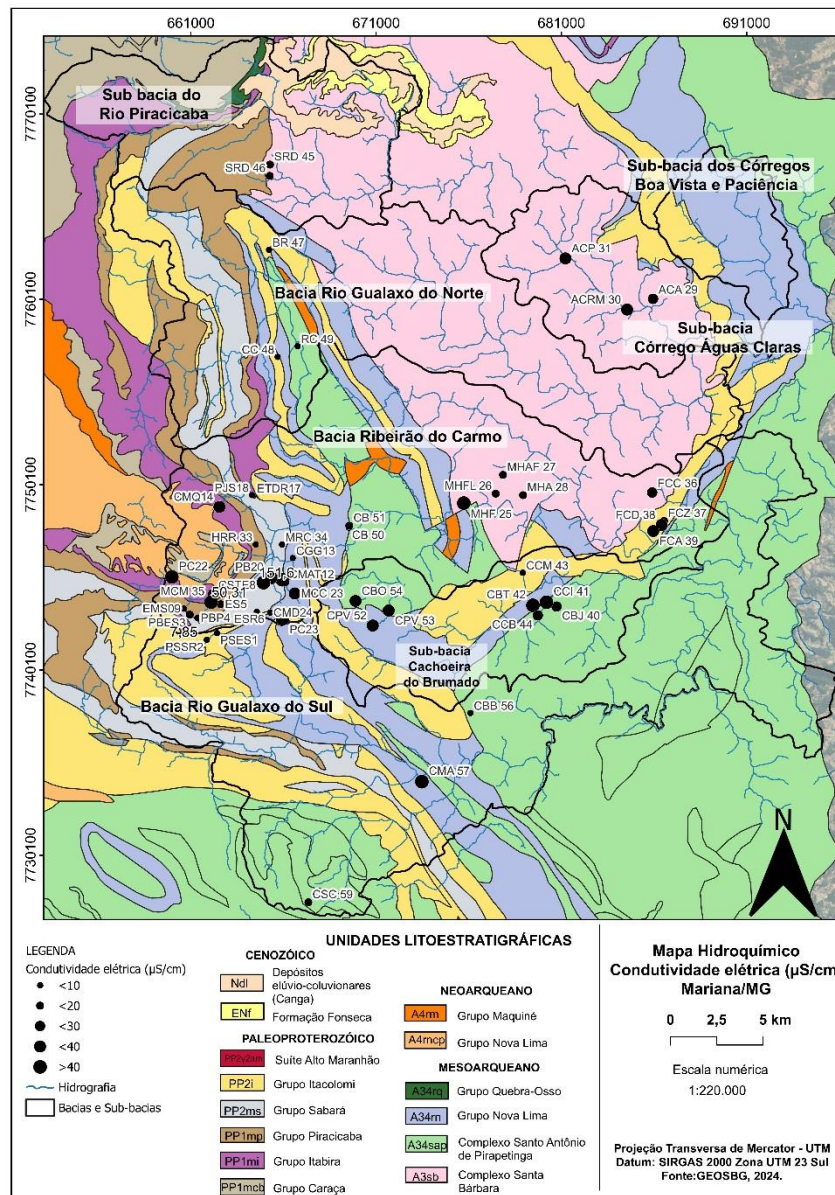


Figura 20 - Mapa Hidroquímico da Condutividade elétrica e os pontos amostrados. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais (1:1.000.000); Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias (Souza 2005).

4.2.2 Resistividade ($\mu\Omega$)

A resistividade elétrica do meio é inversamente proporcional à concentração de sais no eletrólito que preenche, total ou parcialmente, os vazios do meio. Ou seja, quanto maior a concentração de sais, menor será a resistividade elétrica (Mota 2009). Com isso, este parâmetro apresenta uma caracterização inversa da condutividade elétrica. A Tabela 12 abaixo apresenta os resultados de campo de 47 amostras do parâmetro Resistividade medidos com a unidade ohm por metro (Ωm).

Tabela 12- Dados aferidos em campo do parâmetro Resistividade (Ωm) por bacia, sub-bacia e ponto.

Pontos	Bacias e sub-bacias	Resistividade (Ωm)
--------	---------------------	------------------------------

ACA29	Sub bacia do Córrego Águas Claras	42,81
ACP31	Sub bacia do Córrego Águas Claras	29,41
ACRM30	Sub bacia do Córrego Águas Claras	30,25
BR47	Rio Gualaxo do Norte	144,5
CB50	Bacia do Ribeirão do Carmo	101,4
CB51	Bacia do Ribeirão do Carmo	93,33
CBB56	Rio Gualaxo do Sul	102,6
CBJ40	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	36,84
CBO54	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	30,11
CBT42	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	71,62
CC48	Rio Gualaxo do Norte	116,5
CCB44	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	41,36
CCI41	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	18,93
CCM43	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	143,8
CCR15	Bacia do Ribeirão do Carmo	90,83
CGG13	Bacia do Ribeirão do Carmo	263,5
CMA57	Rio Gualaxo do Sul	15,28
CMAT12	Bacia do Ribeirão do Carmo	15,36
CMD24	Bacia do Ribeirão do Carmo	24,61
CMQ14	Bacia do Ribeirão do Carmo	30,67
CMS10	Bacia do Ribeirão do Carmo	23,15
CPV52	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	29,78
CPV53	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	30,51
CSC59	Rio Gualaxo do Sul	50,23
CSTE08	Bacia do Ribeirão do Carmo	170,1
EMS09	Bacia do Ribeirão do Carmo	17,36
ETDR16	Bacia do Ribeirão do Carmo	116,7
ETDR17	Bacia do Ribeirão do Carmo	103,8
FCA39	Bacia do Ribeirão do Carmo	27,54
FCC36	Bacia do Ribeirão do Carmo	41,76
FCD38	Bacia do Ribeirão do Carmo	26,65
FCZ37	Bacia do Ribeirão do Carmo	48,6
FG07	Bacia do Ribeirão do Carmo	43,78
MCM35	Bacia do Ribeirão do Carmo	19,21
MHA28	Bacia do Ribeirão do Carmo	68,7
MHAF27	Bacia do Ribeirão do Carmo	93,34
MHF25	Bacia do Ribeirão do Carmo	21,84
MHFL26	Bacia do Ribeirão do Carmo	49,36

MRC34	Bacia do Ribeirão do Carmo	235
MRR33	Bacia do Ribeirão do Carmo	118,6
PC22	Bacia do Ribeirão do Carmo	20,95
PC23	Bacia do Ribeirão do Carmo	100
PJS18	Bacia do Ribeirão do Carmo	131
RC49	Rio Gualaxo do Norte	114,3
SRD45	Sub bacia do Rio Piracicaba	58,8
SRD46	Sub bacia do Rio Piracicaba	56,71

Relacionando-se os dados da Tabela 12 e a Figura 21 tem-se que o primeiro e o terceiro quartil dos boxplot das bacias e sub-bacias estão aproximadamente entre 20 a 100 Ω m, exceto a Bacia do Rio Gualaxo do Norte que apresentou uma variação aproximada entre 100 a 150 Ω m, indicando maior mediana e com isso resistividades mais altas. A bacia do Ribeirão do Carmo e a sub-bacia Cachoeira do Brumado tiveram ocorrência de outiliers, os pontos CGG13 e MRC34 para a primeira e o CCM43 para a segunda. Este último ponto seguiu a ordem inversamente proporcional entre a resistividade e a condutividade elétrica visto que para COND ele foi um outlier abaixo do primeiro quartil e neste diagrama de caixa ele apresentou-se como um outlier acima do terceiro quartil. Vale destacar que alguns pontos não apresentaram medição em campo.

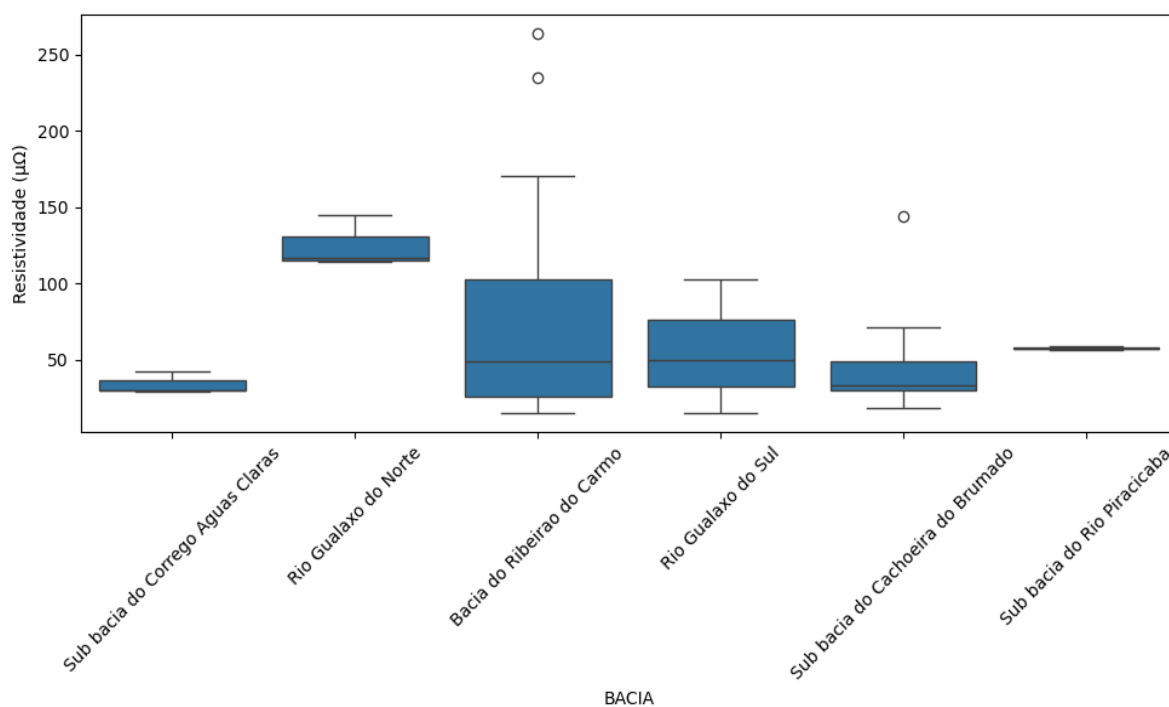


Figura 21: Gráfico com boxplots por bacia e sub-bacia do parâmetro Resistividade elétrica.

4.2.3 Total de Sólidos Dissolvidos - TDS (ppm)

Von Sperling (2005) classifica que os sólidos dissolvidos são aqueles que podem

caracterizado pelo conjunto de sólidos, sejam eles orgânicos e inorgânicos. Nesse sentido, os dados de campo referentes ao parâmetro químico discutido neste sub-capítulo serão apresentados na Tabela 13 a seguir em partes por milhão (ppm).

Tabela 13 - Dados aferidos em campo do parâmetro TDS por bacia e sub-bacia e ponto.

Pontos	Bacias e sub-bacias	TDS (ppm)
ACA29	Sub bacia do Córrego Águas Claras	14,84
ACP31	Sub bacia do Córrego Águas Claras	21,91
ACRM30	Sub bacia do Córrego Águas Claras	21,22
BR47	Rio Gualaxo do Norte	4,38
CB50	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,31
CB51	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,85
CBB56	Rio Gualaxo do Sul	6,23
CBJ40	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	17,39
CBO54	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	21,4
CBT42	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	36,79
CC48	Rio Gualaxo do Norte	5,45
CCB44	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	15,39
CCI41	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	34,3
CCM43	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	4,5
CCR15	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,56
CGG13	Bacia do Ribeirão do Carmo	23,98
CMA57	Rio Gualaxo do Sul	42,41
CMAT12	Bacia do Ribeirão do Carmo	397
CMD24	Bacia do Ribeirão do Carmo	26,29
CMQ14	Bacia do Ribeirão do Carmo	21,01
CMS10	Bacia do Ribeirão do Carmo	7,98
CN55	Bacia do Ribeirão do Carmo	21,12
CPV52	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	21,64
CPV53	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	21,1
CSC59	Rio Gualaxo do Sul	12,71
CSTE08	Bacia do Ribeirão do Carmo	3,5
EMS09	Bacia do Ribeirão do Carmo	37,3
ES5	Bacia do Ribeirão do Carmo	11,88
ESR6	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,41
ETDR16	Bacia do Ribeirão do Carmo	5,47

Pontos	Bacias e sub-bacias	TDS (ppm)
ETDR17	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,17
FCA39	Bacia do Ribeirão do Carmo	23,47
FCC36	Bacia do Ribeirão do Carmo	15,31
FCD38	Bacia do Ribeirão do Carmo	24,24
FCZ37	Bacia do Ribeirão do Carmo	13,15
FG07	Bacia do Ribeirão do Carmo	14,66
MCM35	Bacia do Ribeirão do Carmo	33,71
MHA28	Bacia do Ribeirão do Carmo	9,31
MHAF27	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,85
MHF25	Bacia do Ribeirão do Carmo	26,6
MHFL26	Bacia do Ribeirão do Carmo	12,9
MRC34	Bacia do Ribeirão do Carmo	2,53
MRR33	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,36
PB20	Bacia do Ribeirão do Carmo	95,48
PBES3	Bacia do Ribeirão do Carmo	7,81
PBL21	Bacia do Ribeirão do Carmo	106,1
PBP4	Bacia do Ribeirão do Carmo	5,18
PC22	Bacia do Ribeirão do Carmo	30,91
PC23	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,38
PJS18	Bacia do Ribeirão do Carmo	4,81
PMM19	Bacia do Ribeirão do Carmo	101,8
PSES1	Rio Gualaxo do Sul	3,31
PSSR2	Rio Gualaxo do Sul	2,83
RC49	Rio Gualaxo do Norte	5,81
SRD45	Sub bacia do Rio Piracicaba	10,89
SRD46	Sub bacia do Rio Piracicaba	11,32

Ao fazer a análise da Figura 23 e os dados da Tabela 13 observa-se que o primeiro e o terceiro quartil mantiveram-se entre 0 e 50 ppm, levando-se em consideração a diferença de malha amostral entre as bacias e sub-bacias. Com isso, os outliers da Bacia do Ribeirão do Carmo apresentaram valores anômalos significativos como CMAT12 com 397 ppm e os pontos PMM19, PBL21 e PB20 com valores próximos ou maior que 100 ppm. De outra forma, os outliers da Bacia do Rio Gualaxo do Sul e da Sub-bacia Cachoeira do Brumado atingiram valores próximos ao primeiro e terceiro quartil como o ponto CMA57 para o primeiro domínio hídrico. Os pontos CCM43 e CBT42, apesar de outliers, aparecem no diagrama de caixa bem próximos ao primeiro e terceiro quartil.

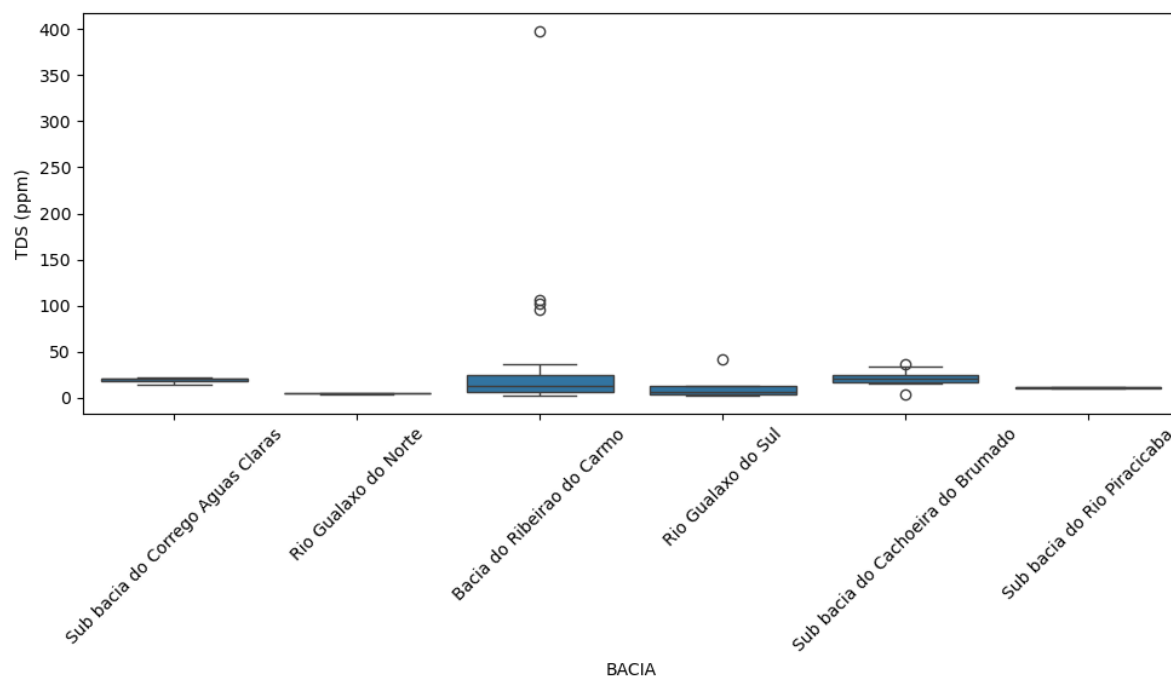


Figura 23 - Gráfico com boxplots por bacia e sub-bacia do parâmetro (TDS).

A visualização dos pontos amostrados no mapa (Figura 24) torna possível a caracterização geológica. Nesse sentido, os pontos anômalos para o parâmetro TDS estão contidos nas seguintes litologias: unidade mesoarqueana do Grupo Nova Lima apresenta o ponto CMAT12, unidades paleoproterozóicas do Grupo Itabira, Sabará e Itacolomi contém os pontos PMM19, PBL21, PB20, CCM43 e CBT42.

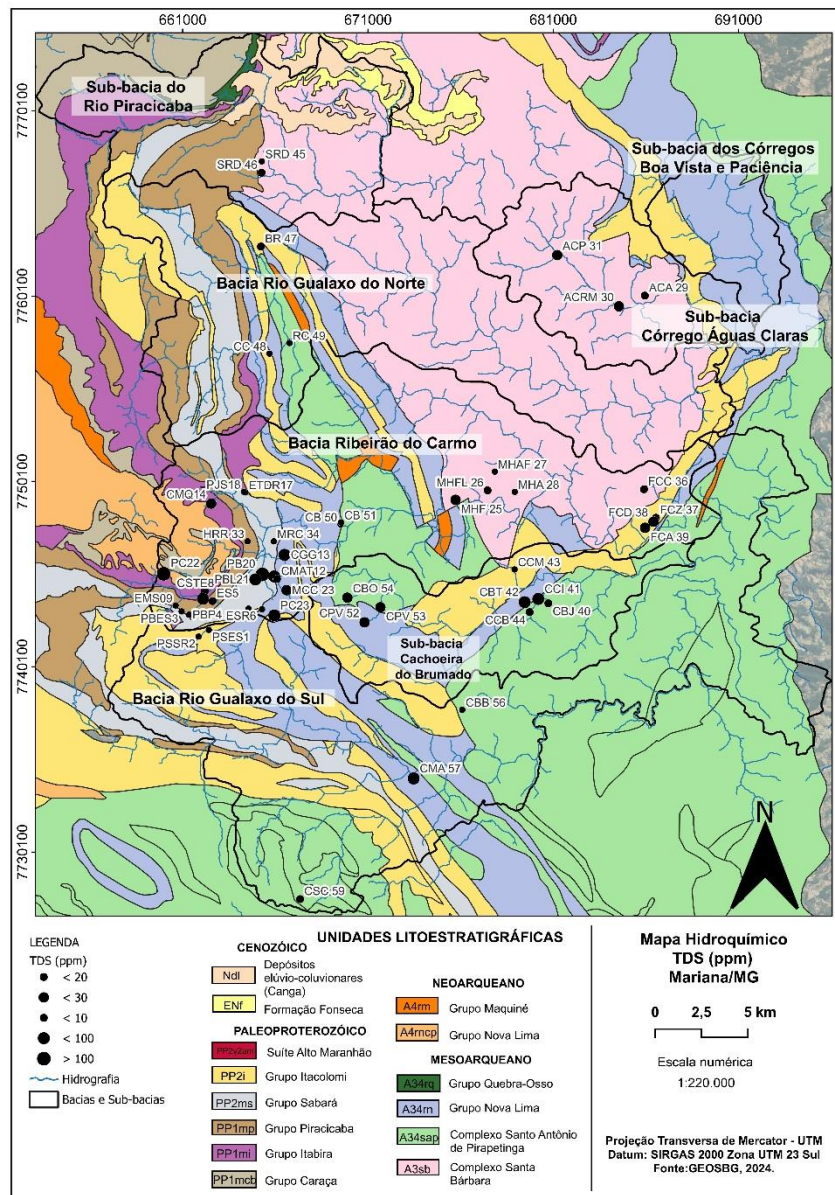


Figura 24 - Mapa hidroquímico do parâmetro TDS e os pontos amostrados. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais (1:1.000.000) GEOSBG (2023); Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias (Souza 2005).

4.2.4 Potencial Hidrogeniônico (pH)

Para Von Sperling (2005) o parâmetro químico pH pode ser descrito como a concentração de H^+ em uma dada solução (água) e sua condição de acidez (<7), neutralidade (=7) e alcalinidade (>7). Nesse sentido, na Tabela 14 abaixo serão apresentados os dados de pH da coleta feita em campo.

Tabela 14 - Dados aferidos em campo do parâmetro pH por bacia e sub-bacia e ponto.

Pontos	Bacias e sub-bacias	pH
ACA29	Sub bacia do Córrego Águas Claras	6,42
ACP31	Sub bacia do Córrego Águas	7,23

Pontos	Bacias e sub-bacias	pH
	Claras	
ACRM30	Sub bacia do Córrego Águas Claras	7,01
BR47	Rio Gualaxo do Norte	5,9
CB50	Bacia do Ribeirão do Carmo	8,01
CB51	Bacia do Ribeirão do Carmo	7,26
CBB56	Rio Gualaxo do Sul	7,63
CBJ40	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	6,54
CBO54	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	7,57
CBT42	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	6,22
CC48	Rio Gualaxo do Norte	5,13
CCB44	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	6,57
CCI41	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	6,5
CCM43	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	6,25
CCR15	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,12
CGG13	Bacia do Ribeirão do Carmo	7,51
CMA57	Rio Gualaxo do Sul	7,57
CMAT12	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,64
CMD24	Bacia do Ribeirão do Carmo	7,29
CMQ14	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,02
CMS10	Bacia do Ribeirão do Carmo	7,09
CN55	Bacia do Ribeirão do Carmo	7,16
CPV52	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	7,29
CPV53	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	7,04
CSC59	Rio Gualaxo do Sul	6,99
CSTE08	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,4
EMS09	Bacia do Ribeirão do Carmo	7,64
ES5	Bacia do Ribeirão do Carmo	7,3
ESR6	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,79
ETDR16	Bacia do Ribeirão do Carmo	5,36
ETDR17	Bacia do Ribeirão do Carmo	4,56
FCA39	Bacia do Ribeirão do Carmo	7,3
FCC36	Bacia do Ribeirão do Carmo	7,08
FCD38	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,99
FCZ37	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,65
FG07	Bacia do Ribeirão do Carmo	4,88
MCM35	Bacia do Ribeirão do Carmo	7,53
MHA28	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,03
MHAF27	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,01

Pontos	Bacias e sub-bacias	pH
MHF25	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,91
MHFL26	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,8
MRC34	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,11
MRR33	Bacia do Ribeirão do Carmo	5,82
PB20	Bacia do Ribeirão do Carmo	7,4
PBES3	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,83
PBL21	Bacia do Ribeirão do Carmo	7,94
PBP4	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,28
PC22	Bacia do Ribeirão do Carmo	7,94
PC23	Bacia do Ribeirão do Carmo	7,03
PJS18	Bacia do Ribeirão do Carmo	5,18
PMM19	Bacia do Ribeirão do Carmo	6,98
PSES1	Rio Gualaxo do Sul	6,14
PSSR2	Rio Gualaxo do Sul	6,56
RC49	Rio Gualaxo do Norte	5,4
SRD45	Sub bacia do Rio Piracicaba	6,07
SRD46	Sub bacia do Rio Piracicaba	6,04

A partir dos dados apresentados a Figura 25 acima apresenta os diagramas de caixa por bacia do parâmetro pH, assim nota-se que a variação do primeiro e terceiro quartil ficou entre 5 e 7,5 de pH. Os valores menores que 6 pertencem as bacias Rio Gualaxo do Norte com as amostras RC49, CC48 e BR47, do Ribeirão do Carmo com os pontos PJS18, FG07, ETDR16, ETDR17 e MRR33 o que indica drenagens mais ácidas nessas regiões. O gráfico também mostra que os domínios hídricos do Córrego Águas Claras, do Ribeirão do Carmo e Rio Gualaxo do Sul apresentaram medianas próximas ao número 7, indicando um pH neutro para a maior parte das amostras. As sub-bacias Cachoeira do Brumado e Rio Piracicaba apresentam-se levemente ácidas.

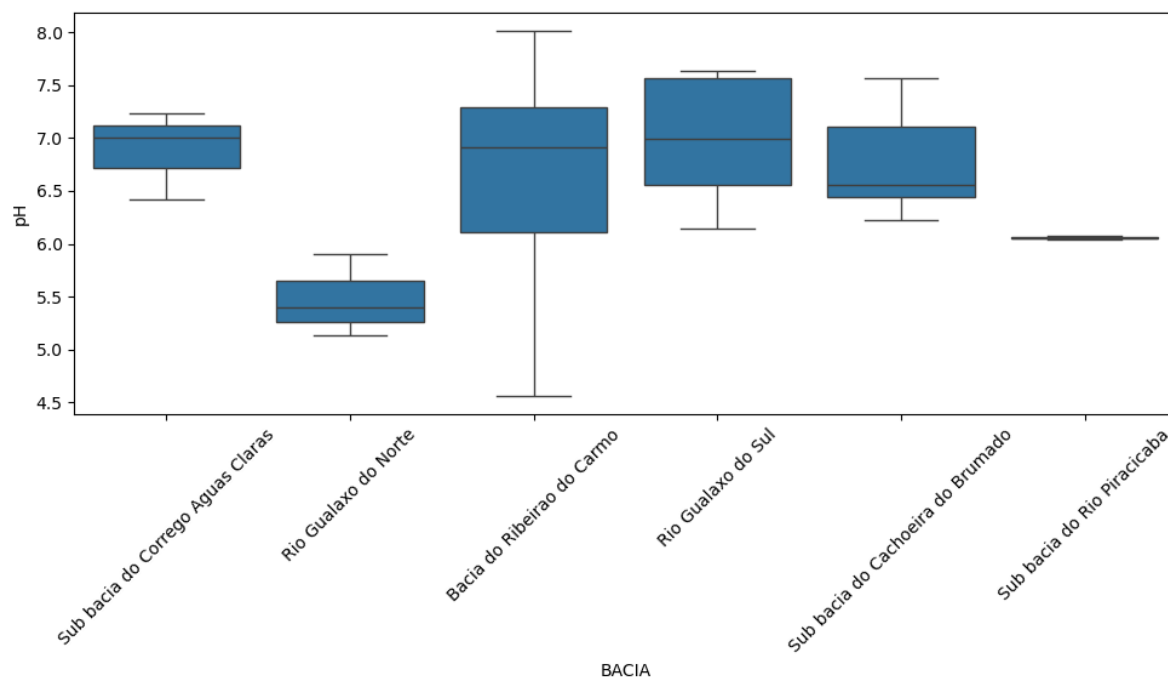


Figura 25 - Gráfico com boxplots por bacia e sub-bacia do parâmetro (pH).

O mapa hidroquímico acima (Figura 26), localiza os pontos com maior acidez e alcalinidade nas bacias e unidades litológicas. Desse modo, os pontos mais ácidos da bacia Rio Gualaxo do Norte estão alocados nas seguintes litologias: Complexo Santo Antônio do Pirapetinga e Grupo Itacolomi. Enquanto que para a bacia do Ribeirão do Carmo apresenta estes pontos em unidades paleoproterozóicas do Grupo Piracicaba e Sabará pertencentes ao Supergrupo Minas. Vale lembrar que a cabeceira do rio Gualaxo do Norte se encontra a oeste, onde foram feitas as coletas dos pontos amostrais da bacia.

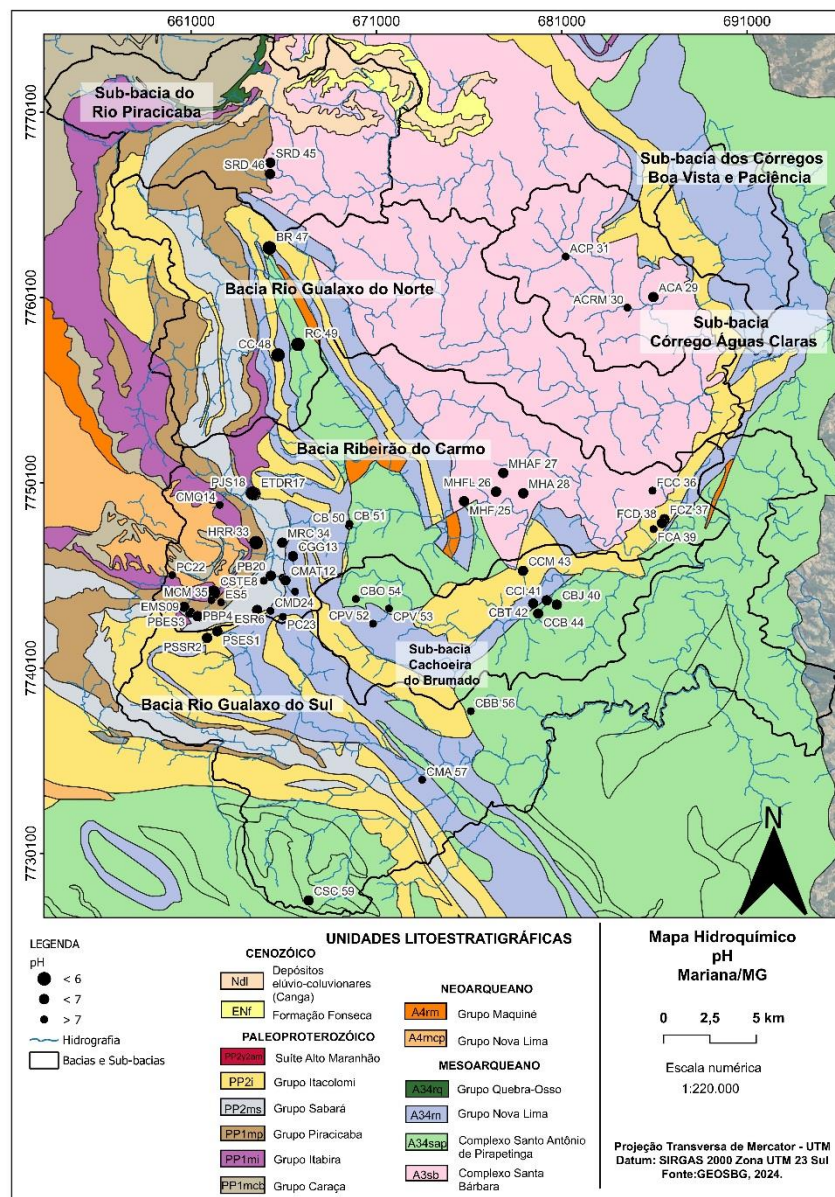


Figura 26 - Mapa hidroquímico do parâmetro pH e os pontos amostrados. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais (1:1.000.000) GEOSBG (2023); Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias (Souza 2005).

4.2.5 Temperatura (°C)

A temperatura é um parâmetro fundamental no meio aquático, influenciando diversas variáveis físico-químicas, pois com o aumento da temperatura de 0 a 30°C, observam-se diminuições na viscosidade, tensão superficial, compressibilidade, calor específico, constante de ionização e calor latente de vaporização, enquanto a condutividade térmica e a pressão de vapor aumentam (CETESB 2014). Desse modo, serão apresentados os valores medidos em campo na Tabela 15 da malha amostral do presente estudo.

Tabela 15 - Dados aferidos em campo do parâmetro Temperatura por bacia e sub-bacia e ponto.

Pontos	Bacias e sub-bacias	Temperatura (°C)
ACA29	Sub bacia do Córrego Águas Claras	26,1
ACP31	Sub bacia do Córrego Águas Claras	26,4
ACRM30	Sub bacia do Córrego Águas Claras	31,1
BR47	Rio Gualaxo do Norte	24,5
CB50	Bacia do Ribeirão do Carmo	21,5
CB51	Bacia do Ribeirão do Carmo	21
CBB56	Rio Gualaxo do Sul	21,9
CBJ40	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	23,7
CBO54	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	21,4
CBT42	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	28,2
CC48	Rio Gualaxo do Norte	21,9
CCB44	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	25,8
CCI41	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	25
CCM43	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	27,3
CCR15	Bacia do Ribeirão do Carmo	21,4
CGG13	Bacia do Ribeirão do Carmo	22,5
CMA57	Rio Gualaxo do Sul	22,2
CMAT12	Bacia do Ribeirão do Carmo	22
CMD24	Bacia do Ribeirão do Carmo	21,1
CMQ14	Bacia do Ribeirão do Carmo	22
CMS10	Bacia do Ribeirão do Carmo	21,6
CN55	Bacia do Ribeirão do Carmo	23,2
CPV52	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	23,2
CPV53	Sub bacia do Cachoeira do Brumado	23,5
CSC59	Rio Gualaxo do Sul	22,6
CSTE08	Bacia do Ribeirão do Carmo	19,3
EMS09	Bacia do Ribeirão do Carmo	22,2
ES5	Bacia do Ribeirão do Carmo	24,2
ESR6	Bacia do Ribeirão do Carmo	23,6
ETDR16	Bacia do Ribeirão do Carmo	19,7
ETDR17	Bacia do Ribeirão do Carmo	19,8
FCA39	Bacia do Ribeirão do Carmo	21,3
FCC36	Bacia do Ribeirão do Carmo	19,5

Pontos	Bacias e sub-bacias	Temperatura (°C)
FCD38	Bacia do Ribeirão do Carmo	20,7
FCZ37	Bacia do Ribeirão do Carmo	21,3
FG07	Bacia do Ribeirão do Carmo	20,6
MCM35	Bacia do Ribeirão do Carmo	21,5
MHA28	Bacia do Ribeirão do Carmo	24,2
MHAF27	Bacia do Ribeirão do Carmo	23,8
MHF25	Bacia do Ribeirão do Carmo	20,1
MHFL26	Bacia do Ribeirão do Carmo	22,7
MRC34	Bacia do Ribeirão do Carmo	20,9
MRR33	Bacia do Ribeirão do Carmo	21,3
PB20	Bacia do Ribeirão do Carmo	22,3
PBES3	Bacia do Ribeirão do Carmo	19,7
PBL21	Bacia do Ribeirão do Carmo	21,4
PBP4	Bacia do Ribeirão do Carmo	21,6
PC22	Bacia do Ribeirão do Carmo	20,7
PC23	Bacia do Ribeirão do Carmo	21,2
PJS18	Bacia do Ribeirão do Carmo	23,3
PMM19	Bacia do Ribeirão do Carmo	23,6
PSES1	Rio Gualaxo do Sul	22,1
PSSR2	Rio Gualaxo do Sul	20,6
RC49	Rio Gualaxo do Norte	27
SRD45	Sub bacia do Rio Piracicaba	22,04
SRD46	Sub bacia do Rio Piracicaba	22

A Figura 27 apresenta os gráficos boxplots de cada bacia e sub-bacia. Nesse sentido, pode-se analisar que aos dados com as temperaturas mais elevadas, próximas a 30 °C, estão na sub-bacia do Córrego Águas Claras e 2 pontos da sub-bacia Cachoeira do Brumado, enquanto que para temperaturas menores tem-se os resultados da bacia do Rio Ribeirão do Carmo e do Rio Gualaxo do Sul. Nesta última, observa-se no diagrama de caixa um outlier de 20,6 °C para o ponto PSSR2, indicando uma temperatura menor levando em consideração o período (outubro e novembro), aferido.

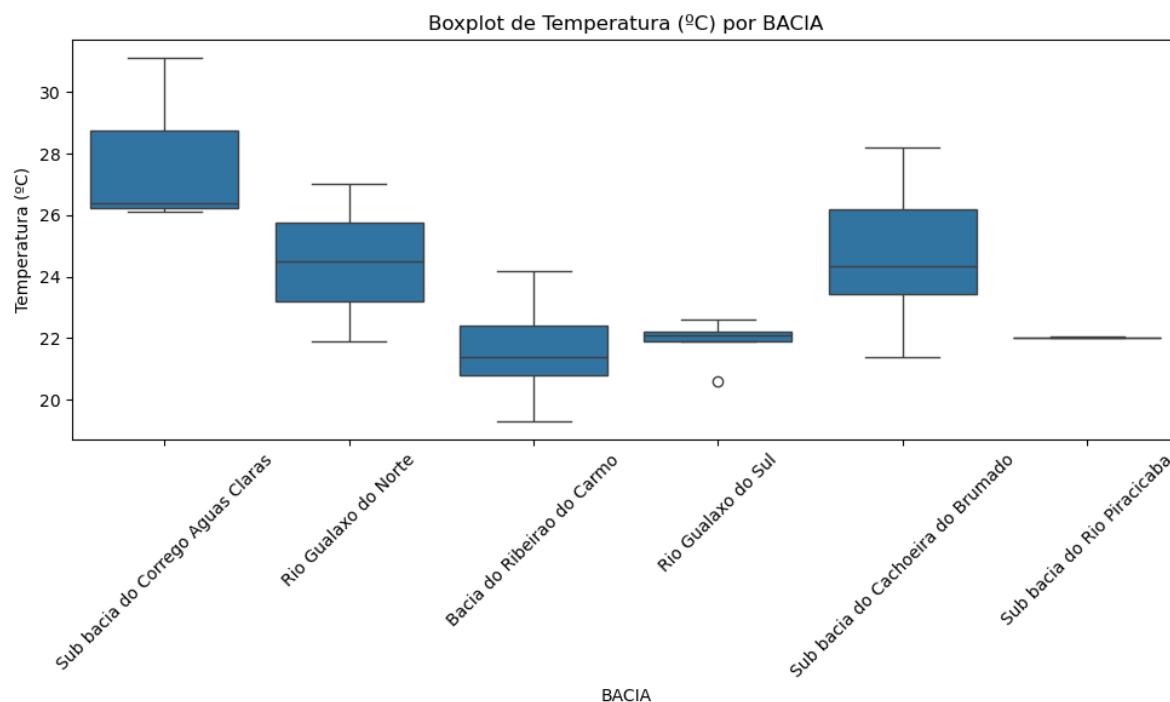


Figura 27 - Gráfico com boxplots por bacia e sub-bacia do parâmetro Temperatura.

Para maior entendimento e localização da variação das temperaturas no município de Mariana, o mapa hidroquímico (Figura 28) apresenta os maiores valores deste parâmetro nos pontos ACA29, ACP31, ACRM30 da sub-bacia Córrego Águas Claras e os pontos CCM43 e CBT42 na sub-bacia da Cachoeira do Brumado. Para menores temperaturas pontos a oeste da bacia Ribeirão do Carmo e todas as amostras do Rio Gualaxo do Sul variaram de 19 a 22 °C. É importante destacar que esta variação pode estar relacionada com o período do dia e do ano que as coletas foram realizadas, sendo, portanto, o final do período seco, o qual as temperaturas começam a subir.

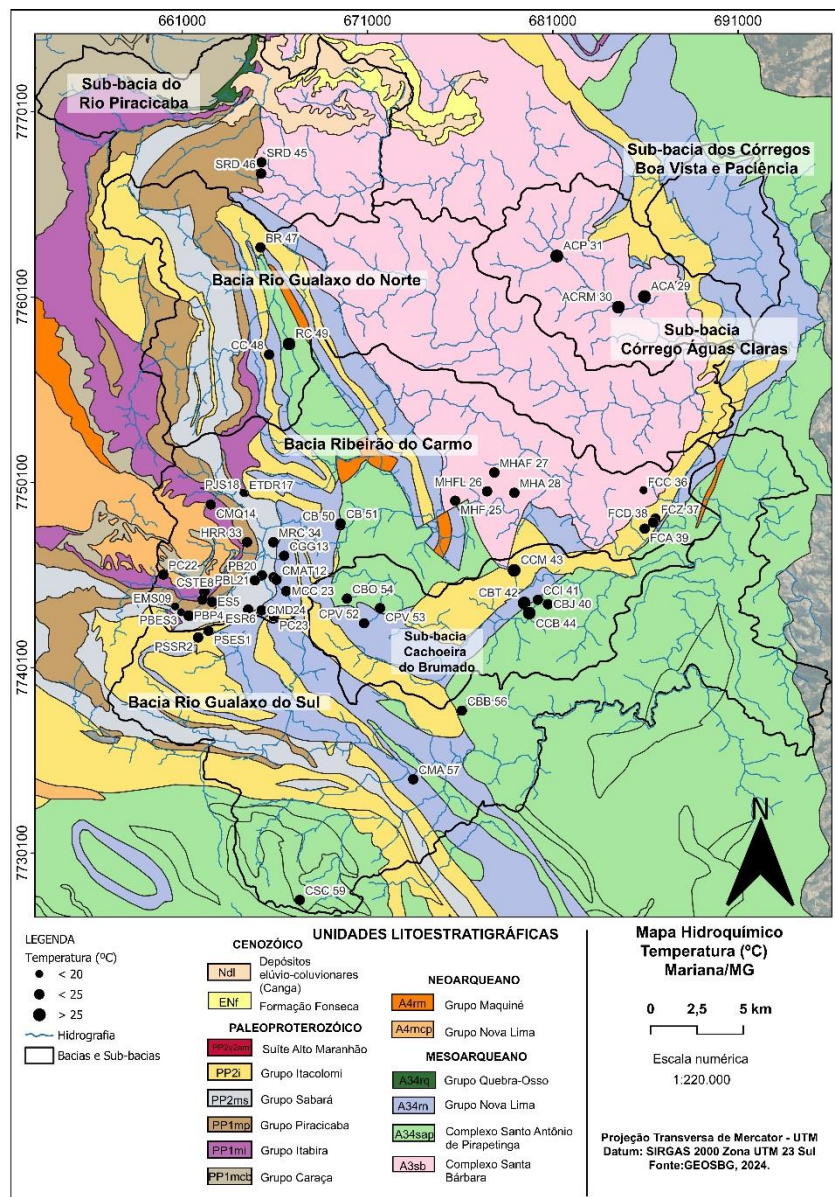


Figura 28 - Mapa hidroquímico do parâmetro Temperatura e os pontos amostrados. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais (1:1.000.000) GEOSBG (2023); Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias e sub-bacias (Souza 2005).

4.2.6 Discussão geral dos resultados em campo

Após a análise e descrição das tabelas, gráficos e mapas dos parâmetros condutividade elétrica (COND), resistividade, total de sólidos dissolvidos (TDS), pH e temperatura, nota-se a repetição de anomalias dos pontos PMM19, PB20 e PBL21 referentes a bacia Ribeirão do Carmo para os parâmetros físicos condutividade elétrica, resistividade e o parâmetro químico TDS. Para o parâmetro pH foi visto que houveram pontos nas bacias do Rio Gualaxo do Norte e no Ribeirão do Carmo apresentaram valores inferiores a 6, indicando drenagens ácidas. Desse modo serão discutidas algumas possibilidades para estas alterações.

Os pontos anômalos recorrentes na bacia do Ribeirão do Carmo (PMM19, PB20 e PBL21) estão localizados em litologias distintas (Grupo Sabará e Grupo Nova Lima do topo) e são próximos entre si. Os valores anômalos foram altos para condutividade elétrica e TDS, e consequentemente com valores menores para a resistividade, pois ela é inversamente proporcional à condutividade. É importante destacar que essas amostras foram coletadas na área urbana de Mariana e Passagem de Mariana, em locais com captação por poços. Nesses pontos, variáveis relacionadas à poluição devem ser levadas em consideração, pois, conforme o APÊNDICE I, o ponto PMM19 está situado em uma área urbanizada, próximo a um córrego poluído, com forte odor; o poço PBL21 está localizado próximo ao reservatório da mineração Sampaio, o que pode sugerir uma contaminação antrópica. A composição petrográfica das rochas aflorantes nos pontos amostrais também deve ser observada. A unidade litológica neoarqueana do Grupo Nova Lima, que afeta a área, é composta por rochas carbonáticas, quartzitos, metaconglomerados e quartzo-mica xisto, enquanto o Grupo Sabará é formado por conglomerados basais expostos e xisto Sabará (clorita xisto). Em ambas as litologias, é possível observar os elementos Al, Si, O, associados à mica e ao quartzito, enquanto o ferro (Fe) se destaca nas formações ferríferas bandadas típicas do quadrilátero ferrífero. No entanto, com base nas características observadas em campo e nas condições dos poços, destaca-se as ações antrópicas de poluição e atividade de mineração como causas mais para as contaminações.

O ponto CBT42, na sub-bacia do Ribeirão Cachoeira do Brumado, apresentou valores elevados para os parâmetros de condutividade elétrica e TDS, e valores menores para resistividade, apesar de não haver um valor de referência estabelecido para esses parâmetros. Este ponto está localizado na litologia do Grupo Nova Lima basal e a composição petrográfica sugere a presença de metais, como o ferro, que podem contribuir para o aumento dos valores observados nesses parâmetros. No entanto, o maior destaque para esta localização é a relação às condições descritas em campo pois o ponto CBT42 está a montante, dentro do distrito Cachoeira do Brumado, próximo ao esgoto.

A CETESB (2014) aponta que o pH é um parâmetro essencial para a potabilidade da água, devendo os valores para o abastecimento público variar entre 6,0 e 9,5, conforme estabelecido pela Portaria 518/04 do Ministério da Saúde. Na bacia do Rio Gualaxo do Norte, os valores mais baixos de pH foram observados nas amostras RC49, CC48 e BR47, enquanto no Ribeirão do Carmo, os pontos PJS18, FG07, ETDR16, ETDR17 e MRR33 apresentaram valores semelhantes. A maioria desses pontos está situada em litologias paleoproterozóicas do

Supergrupo Minas e do Grupo Itacolomi. Os pontos da bacia do Rio Gualaxo do Norte (RC49, CC48 e BR47), que estão a montante e são responsáveis pelo abastecimento das comunidades locais, apresentam áreas de mata bem preservadas, embora sem cercas, e não há indícios de poluição em massa. Já na Bacia do Ribeirão do Carmo, o ponto que requer maior atenção é o FG07, localizado em uma mina a montante dentro da cidade de Mariana. A acidez observada nas drenagens que não apresentaram características alarmantes na descrição de campo pode estar relacionada à composição petrográfica das litologias do Supergrupo Minas, desde sua base até o topo, abrangendo os Grupos Itabira, Piracicaba e Sabará, que são compostos por conglomerados, quartzitos, filitos ferruginosos, itabiritos e xistos de clorita.

4.3 Resultados das análises laboratoriais

Como descrito na metodologia deste trabalho, após a etapa de coleta, 58 amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto. Os resultados das análises foram disponibilizados em 08 de junho de 2016. Vale ressaltar que foram obtidos resultados analíticos de 58 amostras.

A partir dos resultados analíticos do equipamento espectrofotômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP OES) de modelo Agilent /725, os dados foram compilados para comparação com os padrões de qualidade da Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021 e a resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005. O APENDICE II apresenta a tabela com os resultados de todas as análises realizadas para os seguintes parâmetros inorgânicos: alumínio, antimônio, arsênio, bário, berílio, cádmio, chumbo, cobalto, cobre, cromo, ferro, manganês, níquel, prata, selênio, urânio, vanádio, zinco. Conforme a Portaria GM/MS 888/21, o limite de quantificação (LQ) das metodologias empregadas deve ser igual ou inferior ao valor máximo permitido para cada parâmetro analisado, portanto para aqueles que ultrapassaram o valor máximo permitido (VMP) o resultado não foi considerado.

Das cinquenta e oito amostras analisadas apenas quatorze apresentaram valores anômalos, ou seja, valores acima do permitido pelas legislações supracitadas. Assim sendo, a seguir serão apresentadas e discutidas apenas as amostras que tiveram dados não conformes, visto que os demais se encontram dentro dos limites permitidos.

Vale destacar que a malha amostral da Sub-bacia do Rio Piracicaba é de apenas duas amostras, por isso a sua representação gráfica em boxplot será apresentada de forma mais compacta.

4.3.1 Alumínio (Al)

As características físicas do alumínio são a cor prateada, peso leve, estrutura maleável e dúctil, e por fim baixo ponto de fusão. Na água este metal assume diferentes formas e sua ocorrência pode estar relacionada com os parâmetros pH, temperatura e presença de outros elementos químicos (fluoretos e sulfatos). O pH entre 5,5 e 6,0 caracteriza baixa solubilidade deste elemento inorgânico, com isso há maior ocorrência do mesmo de forma livre em águas acidificadas (CETESB 2014). A Tabela 16 apresenta os dados compilados da sub-bacia do Córrego Águas Claras e os pontos anômalos de acordo com os padrões de qualidade de águas superficiais da Portaria 888 do Ministério da Saúde de 4 de maio de 2021 e também a Resolução CONAMA 357 de 17 de março de 2005. O valor máximo permitido (VMP) para o Alumínio é de 0,2 mg/L.

Tabela 16 - Dados compilados do parâmetro alumínio.

Pontos	UNIDADE	Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021/Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005/Resolução CONAMA no 396, de 3 de abril de 2008.	Alumínio
PSSES1	mg/L	0,2	0,027375
PSSR2	mg/L	0,2	0,0216215
PBES3	mg/L	0,2	0,0278767
PBP4	mg/L	0,2	0,0175487
ES5	mg/L	0,2	0,0368099
ESR6	mg/L	0,2	0,0320743
CSTE8	mg/L	0,2	0,0309774
EMS09	mg/L	0,2	0,0250893
CMS10	mg/L	0,2	0,0149001
CMAT12	mg/L	0,2	0,0235461
CGG13	mg/L	0,2	0,0216279
CMQ14	mg/L	0,2	0,011901
CCR15	mg/L	0,2	0,0150417
ETDR16	mg/L	0,2	0,0187841
ETDR17	mg/L	0,2	0,024198
PJS18	mg/L	0,2	0,0258223
PMM19	mg/L	0,2	5,45E-03
PB20	mg/L	0,2	0,0211859
PBL21	mg/L	0,2	0,0132433
PC22	mg/L	0,2	0,0203764

Pontos	UNIDADE	Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021/Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005/Resolução CONAMA no 396, de 3 de abril de 2008.	Alumínio
PC23	mg/L	0,2	0,0652252
CMD24	mg/L	0,2	0,0222799
MCC 23	mg/L	0,2	0,0572068
MHF 25	mg/L	0,2	0,0387969
MHFL 26	mg/L	0,2	0,0295952
MHAF 27	mg/L	0,2	0,1038293
MHA 28	mg/L	0,2	0,038395
ACA 29	mg/L	0,2	0,0990799
ACRM 30	mg/L	0,2	0,2590626
ACP 31	mg/L	0,2	0,2643528
HRR 33	mg/L	0,2	0,0204792
MRC 34	mg/L	0,2	0,0315485
MCM 35	mg/L	0,2	0,0231619
FCC 36	mg/L	0,2	0,0617184
FCZ 37	mg/L	0,2	0,0200914
FCD 38	mg/L	0,2	0,0651706
FCA 39	mg/L	0,2	0,0224411
CBJ 40	mg/L	0,2	0,0156421
CCI 41	mg/L	0,2	0,0113665
CBT 42	mg/L	0,2	0,0138619
CCM 43	mg/L	0,2	0,0115744
CCB 44	mg/L	0,2	0,0187774
SRD 45	mg/L	0,2	0,0178609
SRD 46	mg/L	0,2	0,0152389
BR 47	mg/L	0,2	0,0143349
CC 48	mg/L	0,2	0,0232185
RC 49	mg/L	0,2	0,0137497
CB 50	mg/L	0,2	0,0312231
CB 51	mg/L	0,2	0,0229811
CPV 52	mg/L	0,2	0,0175458
CPV 53	mg/L	0,2	0,0171866
CBO 54	mg/L	0,2	0,0271449
CN 55	mg/L	0,2	0,0192567
CBB 56	mg/L	0,2	0,0219164
CMA 57	mg/L	0,2	0,0215577
CUP 58	mg/L	0,2	0,0161501
CSC 59	mg/L	0,2	0,0612178

Após análise dos resultados laboratoriais planilhados de todas as bacias e sub-bacias conforme APÊNDICE II da planilha geral, foi elaborado um gráfico com boxplots destes domínios hídricos com base na tabela de análise estatística descritiva no do APÊNDICE IV.

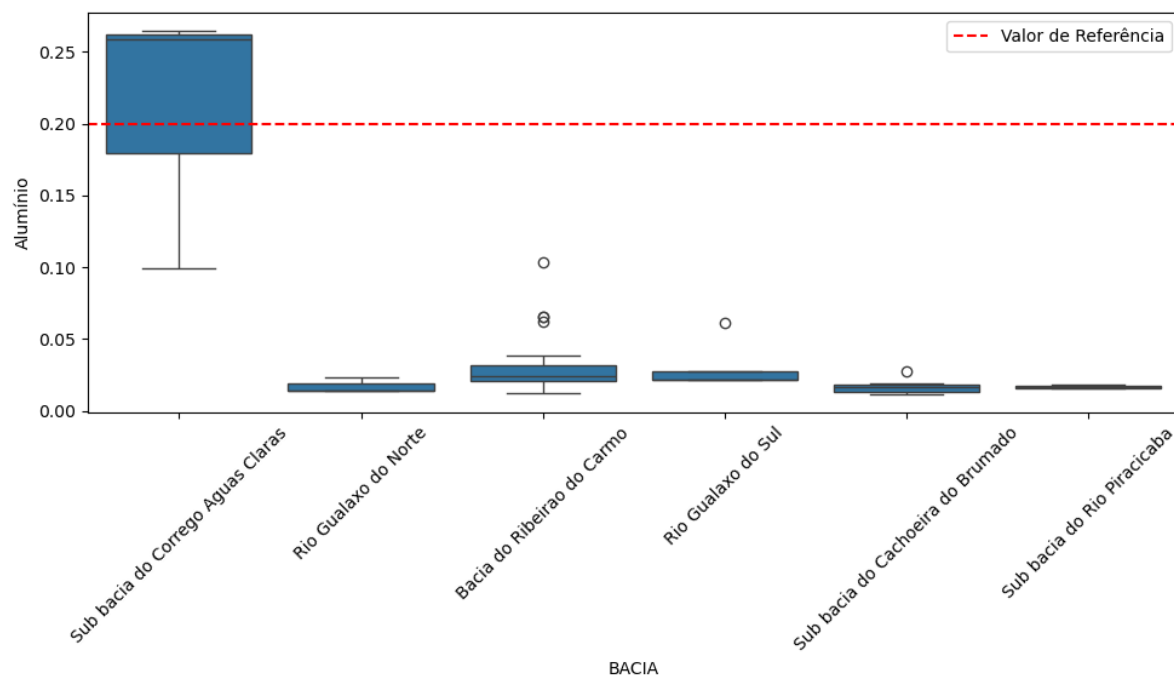


Figura 29 - Gráfico com boxplots por bacia e sub-bacia do elemento Alumínio.

A Figura 29 apresenta os diagramas de caixa por bacia e sub-bacia do elemento inorgânico alumínio. É evidente que para sub-bacia do Córrego Águas Claras o boxplot ultrapassou o valor de referência estabelecido pelas Resolução CONAMA 357/05 nos pontos ACRM 30 e ACP 31. Nota-se também que houveram outliers nas bacias do Ribeirão do Carmo, Rio Gualaxo do Sul e na sub-bacia Cachoeira do Brumado. No entanto, estes outliers mantiveram-se abaixo dos valores de referência.

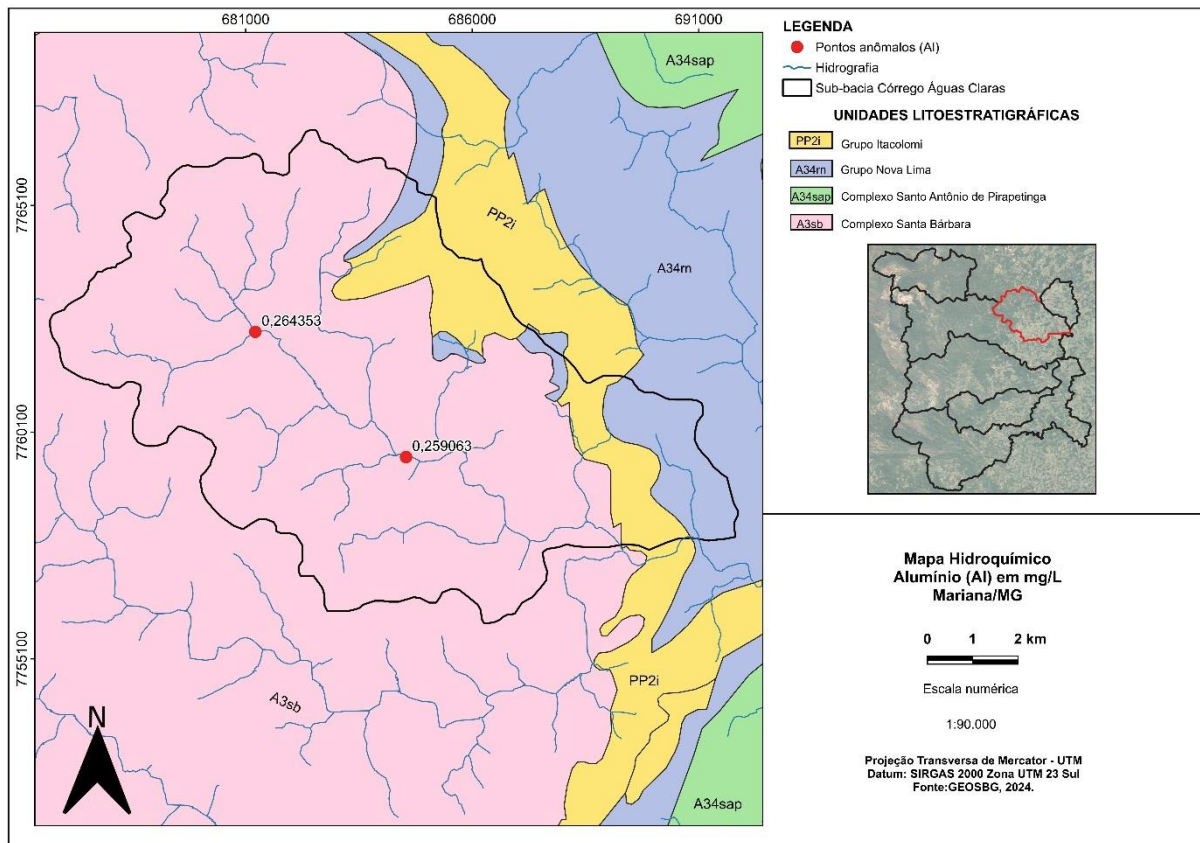


Figura 30 - Mapa hidroquímico do elemento Alumínio (Al) e os pontos anômalos. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais (1:1.000.000) GEOSBG (2023); Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias e Sub-bacias (Souza 2005).

A partir da análise do mapa hidroquímico da Sub-bacia do Córrego Águas Claras (Figura 30) nota-se os pontos ACRM 30 e ACP 31 com as concentrações de alumínio em 0,259063 mg/L e 0,26435278 mg/L, respectivamente. Ressalta-se que apenas estes pontos estão não conformes com a Resolução CONAMA 357/05 com valor máximo permitido (VMP) de 0,2 mg/L. O mapa também apresenta o contexto geológico da sub-bacia e os pontos acima estão alocados na litologia do Complexo Santa Bárbara. Com isso, a principal relação das anomalias de alumínio com aspectos petrográficos, podem estar associadas aos granodioritos e gnaisses tonalíticos visto que o feldspato e as micas, minerais constituintes destas rochas, pertencente ao grupo dos silicatos de alumínio.

Em relação à localização das drenagens, o ponto ACRM 30 está situado a jusante, dentro do distrito de Águas Claras, enquanto a coleta ACP 31 ocorre a jusante, na direção noroeste do distrito, o que sugere um possível encontro entre essas drenagens. Dessa forma, as ações antrópicas no distrito podem estar associadas às contaminações, indicando um fluxo de ACRM 30 para ACP 31.

O alumínio não é um elemento essencial para o ser humano, e a ingestão em concentrações superiores ao valor máximo permitido pode estar associada ao desenvolvimento da doença de Alzheimer. Nesse contexto, é importante monitorar a Captação Ribeirão Mineiro (ACRM 30), situada em um córrego dentro do distrito de Águas Claras, devido à possibilidade de uso da água para o abastecimento da população local.

4.3.2 Antimônio (Sb)

De acordo com Viglio (2016) o elemento inorgânico antimônio possui as seguintes características físicas: coloração branco-acinzentada, brilho metálico, baixa condutividade térmica e elétrica, além de ser encontrado em estado livre na natureza. Este metal é de grande importância para ligas com outros metais que estão constituídos em chapas de solda, tubulações, rolamentos e os seus sulfetos produz os fósforos (CETESB 2022). Vale ressaltar a alta toxicidade deste elemento visto que não possui papel biológico no meio ambiente. Os resultados da análise laboratorial são apresentados na Tabela 17, com destaque para a Bacia Ribeirão do Carmo.

Tabela 17 - Dados compilados do elemento Antimônio.

Pontos	UNIDADE	Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021/Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005/Resolução CONAMA no 396, de 3 de abril de 2008.	Antimônio
PSES1	mg/L	0,006	0,0013274
PSSR2	mg/L	0,006	0,0021973
PBES3	mg/L	0,006	0,0014023
PBP4	mg/L	0,006	0,0018288
ES5	mg/L	0,006	0,001763
ESR6	mg/L	0,006	0,0019453
CSTE8	mg/L	0,006	0,001186
EMS09	mg/L	0,006	0,0031579
CMS10	mg/L	0,006	0,0026009
CMAT12	mg/L	0,006	0,0022631
CGG13	mg/L	0,006	0,0022411
CMQ14	mg/L	0,006	0,0026327
CCR15	mg/L	0,006	0,0017622
ETDR16	mg/L	0,006	0,0022291
ETDR17	mg/L	0,006	0,0023358

Pontos	UNIDADE	Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021/Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005/Resolução CONAMA no 396, de 3 de abril de 2008.	Antimônio
PJS18	mg/L	0,005	0,002471
PMM19	mg/L	0,005	0,0023876
PB20	mg/L	0,005	0,0018475
PBL21	mg/L	0,005	0,0075194
PC22	mg/L	0,006	0,0020946
PC23	mg/L	0,006	0,0025217
CMD24	mg/L	0,006	0,0016894
MCC 23	mg/L	0,006	0,003003
MHF 25	mg/L	0,006	0,0029518
MHFL 26	mg/L	0,006	0,003094
MHAF 27	mg/L	0,006	0,0027328
MHA 28	mg/L	0,006	0,0030306
ACA 29	mg/L	0,006	0,002738
ACRM 30	mg/L	0,006	0,0023976
ACP 31	mg/L	0,006	0,0027197
HRR 33	mg/L	0,006	0,0027284
MRC 34	mg/L	0,006	0,0032614
MCM 35	mg/L	0,006	0,0025382
FCC 36	mg/L	0,006	0,0024252
FCZ 37	mg/L	0,006	0,0026487
FCD 38	mg/L	0,006	0,0026136
FCA 39	mg/L	0,006	0,0023809
CBJ 40	mg/L	0,006	0,0027975
CCI 41	mg/L	0,006	0,0027973
CBT 42	mg/L	0,006	0,0040132
CCM 43	mg/L	0,006	0,0024108
CCB 44	mg/L	0,006	0,002479
SRD 45	mg/L	0,006	0,0029479
SRD 46	mg/L	0,006	0,0028649
BR 47	mg/L	0,006	0,0030043
CC 48	mg/L	0,006	0,0027927
RC 49	mg/L	0,006	0,0027272
CB 50	mg/L	0,006	0,0028162
CB 51	mg/L	0,006	0,0025198
CPV 52	mg/L	0,006	0,0026349
CPV 53	mg/L	0,006	0,0027188
CBO 54	mg/L	0,006	0,0027551
CN 55	mg/L	0,006	0,0027115

Pontos	UNIDADE	Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021/Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005/Resolução CONAMA no 396, de 3 de abril de 2008.	Antimônio
CBB 56	mg/L	0,006	0,0028374
CMA 57	mg/L	0,006	0,0025862
CUP 58	mg/L	0,006	0,0026207
CSC 59	mg/L	0,006	0,0022136

Após análise dos resultados das análises laboratoriais planilhados de todas as bacias e sub-bacias conforme APÊNDICE II da planilha geral, foi elaborado um gráfico com boxplots destes domínios hídricos com base na tabela de análise estatística descritiva no do APÊNDICE IV.

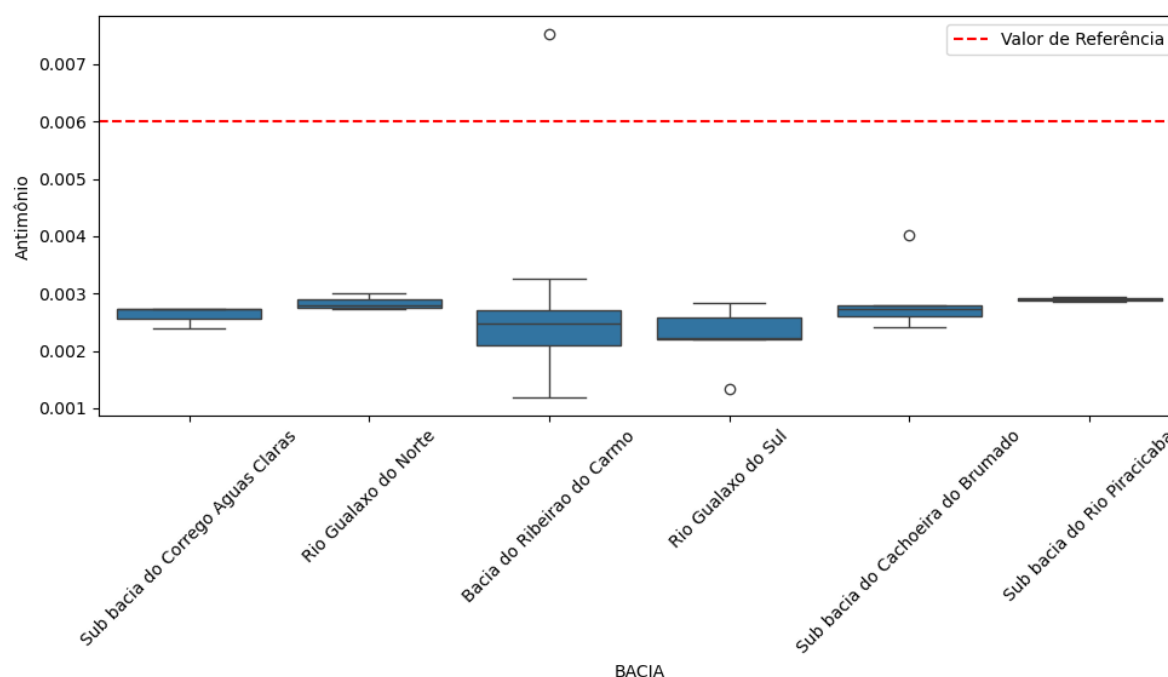


Figura 31 - Gráfico com boxplots por bacia e sub-bacia do elemento Antimônio (Sb) em mg/L.

O gráfico da Figura 31 evidencia que não houve diagrama de caixa acima da Portaria GM/MS 888/21 e a Resolução CONAMA 357/05, apenas um outilier na Bacia Ribeirão do Carmo definido como o ponto PBL21 localizado no distrito de Bento Rodrigues. No entanto, houveram outiliers na Bacia do Rio Gualaxo do Sul e na Sub-bacia Cachoeira do Brumado

abaixo do VMP estabelecido pela legislação. A mediana dos boxplots se mantiveram entre os valores 0,002 e 0,003 mg/L, indicando pouca variabilidade dos dados.

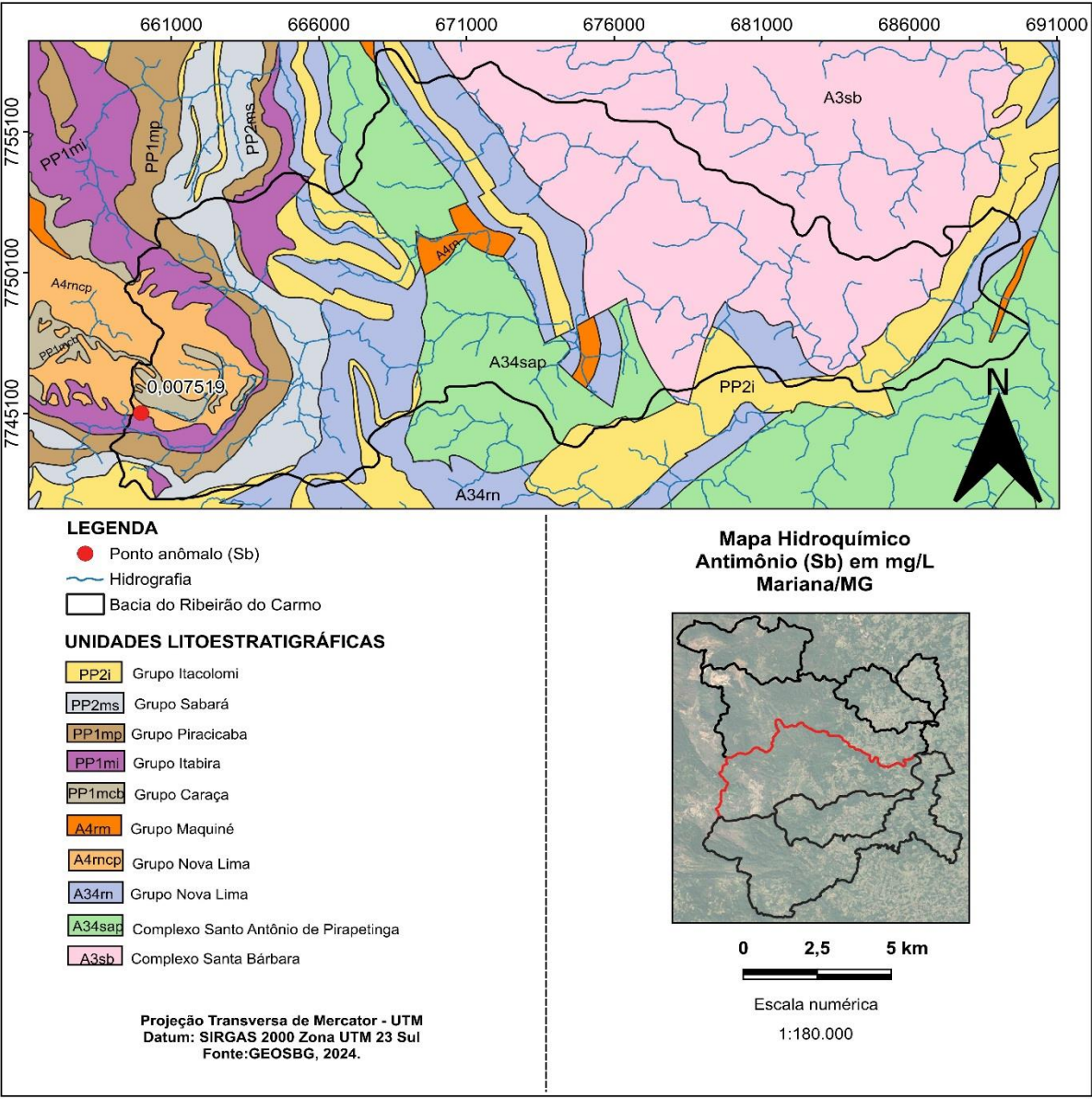


Figura 32 - Mapa hidroquímico do elemento Antimônio (Sb) e o pontos anômalo. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais (1:1.000.000) GEOSBG (2023); Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias e Sub-bacias (Souza 2005).

A interpretação do mapa hidroquímico acima (Figura 32), aponta que o ponto anômalo do elemento antimônio está inserido na porção sudoeste da bacia do Rio do Carmo e o mesmo se encontra na litologia do Grupo Nova Lima do topo, composto por rochas carbonáticas, quartzitos, metaconglomerados e quartzo-mica xisto, com possível ocorrência de fluidos hidrotermais devido a proximidade do periclinal do anticlinal de Mariana. A contaminação deste metal em águas superficiais pode estar relacionada com o escoamento do solo e intemperismo das rochas, pois a CETESB (2022) infere a sua baixa ocorrência no ambiente

hídrico. Ações antropogênicas também podem estar relacionada com esta anomalia, principalmente a poluição dos rios da região com materiais que contém este elemento largamente utilizado em ligas metálicas na indústria de construção civil.

Inserido no distrito de Passagem de Mariana, o Poço Bairro Liberdade (PBL21) está a montante, dentro do distrito. Considerando o histórico de mineração de ouro desta área, o valor anômalo de antimônio pode estar associado também a esta atividade antrópica pretérita.

4.3.3 Ferro (Fe)

O ferro é um dos principais elementos inorgânicos constituintes da litosfera, devido a presença em rochas e minerais das classes dos silicatos, óxidos, sulfetos e carbonatos. Suas características físicas incluem uma coloração branco-prateada, magnetismo, alta resistência à corrosão, boa condutividade térmica e elétrica, além de ser dútil e maleável (Viglio 2016).

Como discutido no subcapítulo 3.3, as unidades litoestratigráficas que formam o quadrilátero ferrífero são notórias por sua composição petrográfica, caracterizada pela presença do elemento inorgânico ferro. A Formação Cauê, com suas formações ferríferas bandadas, pertence ao Grupo Itabira e afloram a noroeste do município de Mariana, onde está localizada a Mina de Germano, da mineradora Samarco. Considerando a ocorrência natural do metal nesta região, será feita uma análise dos dados apresentados nas Tabela 18, além da discussão dos valores não conformes em relação às bacias e sub-bacias e os fatores geológicos deste elemento.

A análise da tabela evidencia que 12 pontos apresentaram valores acima do VMP estabelecido pela Resolução CONAMA 357/05 de 0,3 mg/L. Os pontos com o parâmetro ferro não conforme são: MHF 25, MHFL 26, MHAF 27, FCC 36, FCA 39 na Bacia do Carmo; BR 47 no Gualaxo do Norte; ACA 29, ACRM 30, ACP 31 na Sub-bacia Córrego Águas Claras e por fim os pontos CBJ 40, CBT 42, CCM 43, CCB 44 na Sub-bacia Cachoeira do

Brumado.

Tabela 18 - Dados compilados do parâmetro Ferro (Fe).

Pontos	UNIDADE	Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021/Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005/Resolução CONAMA no 396, de 3 de abril de 2008.	Ferro
PSES1	mg/L	0,3	0,0874921
PSSR2	mg/L	0,3	0,0578556
PBES3	mg/L	0,3	0,0888417
PBP4	mg/L	0,3	0,0172313
ES5	mg/L	0,3	0,0598248
ESR6	mg/L	0,3	0,0585834
CSTE8	mg/L	0,3	0,0374676
EMS09	mg/L	0,3	0,1994979
CMS10	mg/L	0,3	0,1492888
CMAT12	mg/L	0,3	0,0250789
CGG13	mg/L	0,3	0,0335041
CMQ14	mg/L	0,3	0,0704
CCR15	mg/L	0,3	0,0704
ETDR16	mg/L	0,3	0,0704
ETDR17	mg/L	0,3	0,0167147
PJS18	mg/L	0,3	0,0704
PMM19	mg/L	0,3	0,0704
PB20	mg/L	0,3	0,0704
PBL21	mg/L	0,3	0,0704
PC22	mg/L	0,3	0,0704
PC23	mg/L	0,3	0,0457545
CMD24	mg/L	0,3	0,0589544
MCC 23	mg/L	0,3	0,0498609
MHF 25	mg/L	0,3	0,3827394
MHFL 26	mg/L	0,3	0,7618005
MHAF 27	mg/L	0,3	2,0053899
MHA 28	mg/L	0,3	0,2730757
ACA 29	mg/L	0,3	2,0128164
ACRM 30	mg/L	0,3	1,3507349
ACP 31	mg/L	0,3	0,404249
HRR 33	mg/L	0,3	0,0704
MRC 34	mg/L	0,3	0,0094498
MCM 35	mg/L	0,3	0,296614
FCC 36	mg/L	0,3	0,4205451
FCZ 37	mg/L	0,3	0,1168152
FCD 38	mg/L	0,3	0,1626666

Pontos	UNIDADE	Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021/Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005/Resolução CONAMA no 396, de 3 de abril de 2008.	Ferro
FCA 39	mg/L	0,3	0,3514929
CBJ 40	mg/L	0,3	1,2330442
CCI 41	mg/L	0,3	0,0426007
CBT 42	mg/L	0,3	0,2230184
CCM 43	mg/L	0,3	0,5451766
CCB 44	mg/L	0,3	0,4786534
SRD 45	mg/L	0,3	0,0704
SRD 46	mg/L	0,3	0,0704
BR 47	mg/L	0,3	0,5247413
CC 48	mg/L	0,3	0,0609708
RC 49	mg/L	0,3	0,0442429
CB 50	mg/L	0,3	0,0988827
CB 51	mg/L	0,3	0,0244185
CPV 52	mg/L	0,3	0,1181484
CPV 53	mg/L	0,3	0,1142236
CBO 54	mg/L	0,3	0,0154778
CN 55	mg/L	0,3	0,1496377
CBB 56	mg/L	0,3	0,1258206
CMA 57	mg/L	0,3	0,0406515
CUP 58	mg/L	0,3	0,0250101
CSC 59	mg/L	0,3	0,0425496

Após análise dos resultados laboratoriais planilhados de todas as bacias e sub-bacias conforme APÊNDICE II da planilha geral, foi elaborado um gráfico com boxplots destes domínios hídricos com base na tabela de análise estatística descritiva no do APÊNDICE IV.

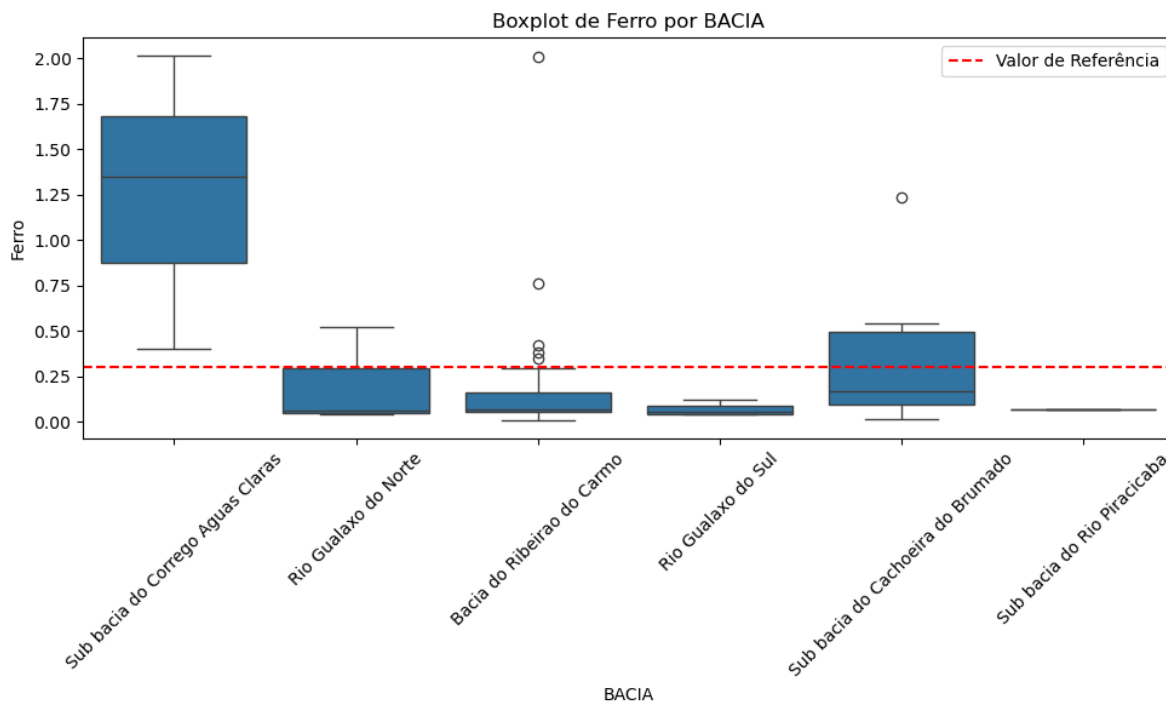


Figura 33 - Gráfico com boxplots por bacia e sub-bacia do elemento Ferro.

O gráfico acima (Figura 33) ilustra os boxplots de cada bacia e sub-bacia do parâmetro não conforme, o ferro. Pode-se ver que o diagrama de caixa de domínios hídricos ultrapassou o referido valor máximo permitido (VMP) da Resolução CONAMA 357/05 e da portaria 888/21 do MS, a Sub-bacia do Córrego Águas Claras, o Rio Gualaxo do Norte e a Sub-bacia Cachoeira do Brumado. Isso indica uma malha amostral significativa não conforme. Para a Bacia do Ribeirão do Carmo houveram 5 valores anômalos e 1 em Cachoeira do Brumado. No entanto a mediana dos dados, estão próximas para todas as bacias (0 a 0,25 mg/L), exceto a do Córrego Águas Claras com valor maior que 1,25 mg/L.

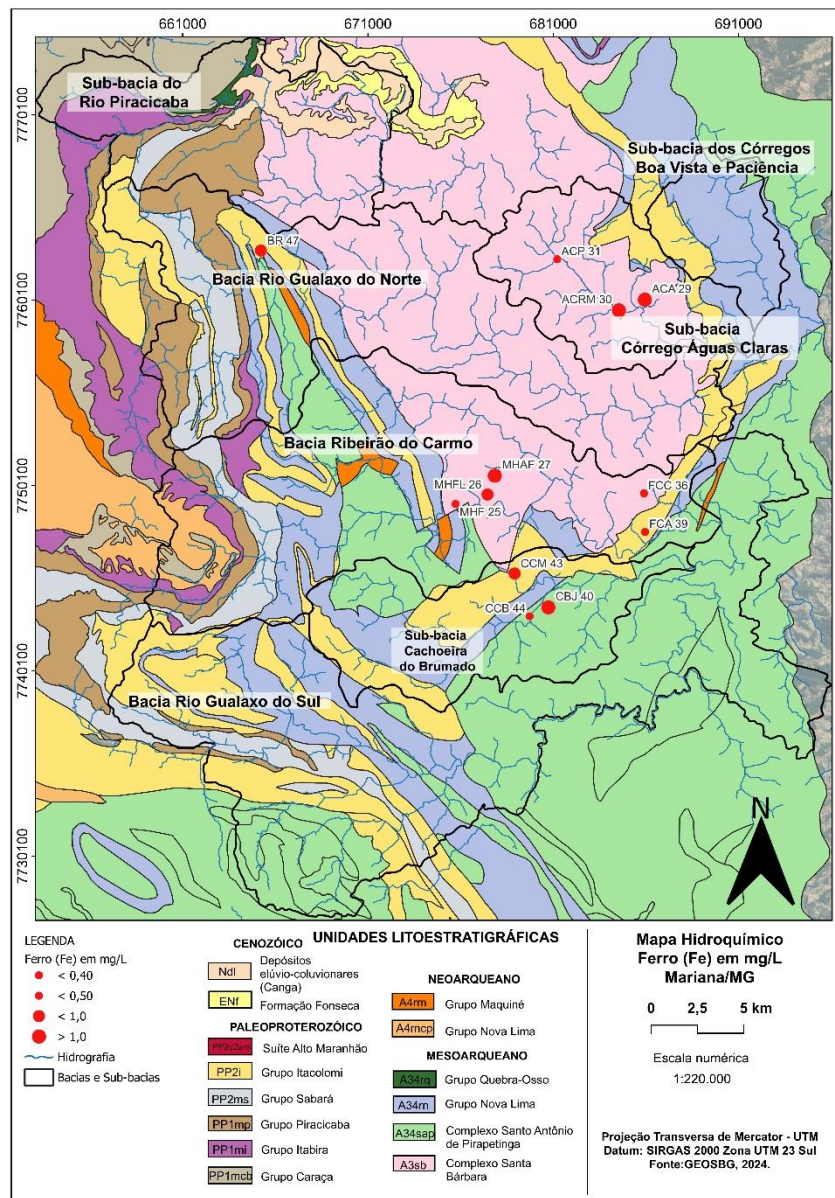


Figura 34 - Mapa hidroquímico do elemento Ferro (Fe) e os pontos anômalos. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais (1:1.000.000) GEOSBG (2023); Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias e Sub-bacias (Souza 2005).

Para o mais completo entendimento das anomalias deste elemento, o mapa hidroquímico acima (Figura 34) localiza os pontos amostrados, as drenagens, a bacia e a litologia. Portanto, nota-se que a maior parte das amostragens não conformes com o valor máximo permitido (VMP) (58,3 %) estão no granodioritos e gnaisses tonalíticos do Complexo Santa Bárbara, com as siglas seguintes: MHF 25, MHFL 26, MHAf 27, FCC 36, ACA 29, ACRM 30, ACP 31. Enquanto que os pontos CBJ 40 e CCB 44 localizam-se nos gnaisses e metabasitos do Complexo Santo Antônio do Pirapetinga. Por fim, o Grupo Itacolomi é a litologia base nos pontos CCM 43, FCA 39 e BR47. Assim, os resultados analíticos deste elemento inorgânico apresentaram anomalias em quatro bacias e sub-bacias, a saber: a Bacia do Rio Gualaxo do Norte, com um ponto; a Sub-bacia do Córrego Águas Claras, com três

amostras com os maiores valores; a Sub-bacia Cachoeira do Brumado, também com três amostras; e, por fim, o domínio hídrico mais afetado em quantidade de amostras anômalas de ferro, a Bacia do Ribeirão do Carmo.

Com base na associação litológica discutida, observa-se que 9 pontos estão localizados em sequências estratigráficas do embasamento, os Complexos. Conforme abordado no capítulo 3.3 de Geologia Local, a rocha anfibolito do Complexo Santa Bárbara é constituída por minerais como biotita (mica de ferro) e clorita de Mg. Assim, as rochas dessa região contêm ferro em sua composição. Em contraste, o quartzito do Grupo Itacolomi não apresenta minerais de ferro em sua composição. Portanto para os pontos anômalos dessa região deve-se discutir outros fatores que influenciam.

O distrito de Águas Claras possui três pontos próximos: ACP 31, localizado a jusante, a noroeste do distrito; ACRM 30, situado a jusante dentro do distrito; e ACA 29, que se encontra a montante do distrito. No caso de Furquim, o ponto FCA 39 está a montante do distrito, enquanto o ponto FCC 36 está a jusante, na área rural. Na Bacia do Ribeirão do Carmo, próximo ao distrito de Monsenhor Horta, os pontos MHF 25, MHFL 26 e MHAf 27 estão a jusante, sendo que o ponto MHFL 26 é o mais próximo ao distrito. Em Cachoeira do Brumado, o ponto CCM 43 está a jusante, a noroeste da área rural, e os pontos CBJ 40 e CCB 44 estão, respectivamente, a montante e a jusante dentro do distrito. Por fim, o ponto BR47 está a montante do distrito de Bento Rodrigues.

Após a localização dos pontos e suas drenagens, é importante destacar que o consumo excessivo de ferro pode ter efeito cardiopático para a saúde humana. Portanto, é necessário monitorar os pontos a montante, como o CBJ 40, que é responsável pelo abastecimento de 45% do distrito de Cachoeira do Brumado (APÊNDICE I). Embora o Art. 38 da Portaria GM/MS 888/21 permita que os níveis de ferro e manganês ultrapassem o valor máximo permitido, as concentrações de ferro e manganês não devem exceder 2,4 e 0,4 mg/L, respectivamente.

4.3.4 Manganês (Mn)

O manganês é um metal fortemente presente na crosta terrestre, pois ocorre associado a uma variedade de elementos como oxigênio, enxofre e cloro (ATDRS 2012). Por não ocorrer livre na natureza existem diversos minerais de manganês, entre os quais se destacam: pirolusita (MnO_2), rodocrosita (MnCO_3), psilomelano $[(\text{Ba}, \text{H}_2\text{O})_2\text{Mn}_5\text{O}_{10}]$, criptomelana ($\text{KMn}_8\text{O}_{16}$), hausmannita (Mn_2O_4) e manganita ($\text{MnO}(\text{OH})$) (Viglio 2016). A seguir tem-se a

Tabela 19 com os resultados analíticos de todos os pontos do presente estudo e o valor máximo permitido (VMP) dos padrões qualidade da água.

Tabela 19 - Dados compilados do elemento Manganês (Mn).

Pontos	UNIDADE	Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021/Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005/Resolução CONAMA no 396, de 3 de abril de 2008.	Manganês
PSES1	mg/L	0,1	0,0149425
PSSR2	mg/L	0,1	0,0041726
PBES3	mg/L	0,1	0,003138
PBP4	mg/L	0,1	0,0125798
ES5	mg/L	0,1	0,0228
ESR6	mg/L	0,1	0,0228
CSTE8	mg/L	0,1	0,0077967
EMS09	mg/L	0,1	0,011504
CMS10	mg/L	0,1	0,0165547
CMAT12	mg/L	0,1	0,0023196
CGG13	mg/L	0,1	0,0029387
CMQ14	mg/L	0,1	0,0228
CCR15	mg/L	0,1	0,0064293
ETDR16	mg/L	0,1	0,0140622
ETDR17	mg/L	0,1	0,0363107
PJS18	mg/L	0,1	0,0442372
PMM19	mg/L	0,1	0,0033549
PB20	mg/L	0,1	0,0228
PBL21	mg/L	0,1	0,0024687
PC22	mg/L	0,1	0,004087
PC23	mg/L	0,1	0,0033942
CMD24	mg/L	0,1	0,0054134
MCC 23	mg/L	0,1	0,0048264
MHF 25	mg/L	0,1	0,0207442
MHFL 26	mg/L	0,1	0,0289116
MHAF 27	mg/L	0,1	0,0270096
MHA 28	mg/L	0,1	0,0040145
ACA 29	mg/L	0,1	0,0898168
ACRM 30	mg/L	0,1	0,0268222
ACP 31	mg/L	0,1	0,0047232
HRR 33	mg/L	0,1	0,0089896
MRC 34	mg/L	0,1	0,0163097
MCM 35	mg/L	0,1	0,0198576

Pontos	UNIDADE	Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021/Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005/Resolução CONAMA no 396, de 3 de abril de 2008.	Manganês
FCC 36	mg/L	0,1	0,0228
FCZ 37	mg/L	0,1	0,0025023
FCD 38	mg/L	0,1	0,0071509
FCA 39	mg/L	0,1	0,0135514
CBJ 40	mg/L	0,1	0,0324419
CCI 41	mg/L	0,1	0,0031712
CBT 42	mg/L	0,1	0,1348563
CCM 43	mg/L	0,1	0,0228
CCB 44	mg/L	0,1	0,0091362
SRD 45	mg/L	0,1	0,0044869
SRD 46	mg/L	0,1	0,0034317
BR 47	mg/L	0,1	0,047847
CC 48	mg/L	0,1	0,0187526
RC 49	mg/L	0,1	0,0054158
CB 50	mg/L	0,1	0,002733
CB 51	mg/L	0,1	0,0228
CPV 52	mg/L	0,1	0,0270177
CPV 53	mg/L	0,1	0,0044599
CBO 54	mg/L	0,1	0,0228
CN 55	mg/L	0,1	0,0067498
CBB 56	mg/L	0,1	0,0246985
CMA 57	mg/L	0,1	0,0040947
CUP 58	mg/L	0,1	0,0045457
CSC 59	mg/L	0,1	0,0228

Após análise dos resultados das análises laboratoriais planilhados de todas as bacias e sub-bacias conforme APÊNDICE II da planilha geral, foi elaborado um gráfico com boxplots destes domínios hídricos com base na tabela de análise estatística descritiva no do APÊNDICE IV.

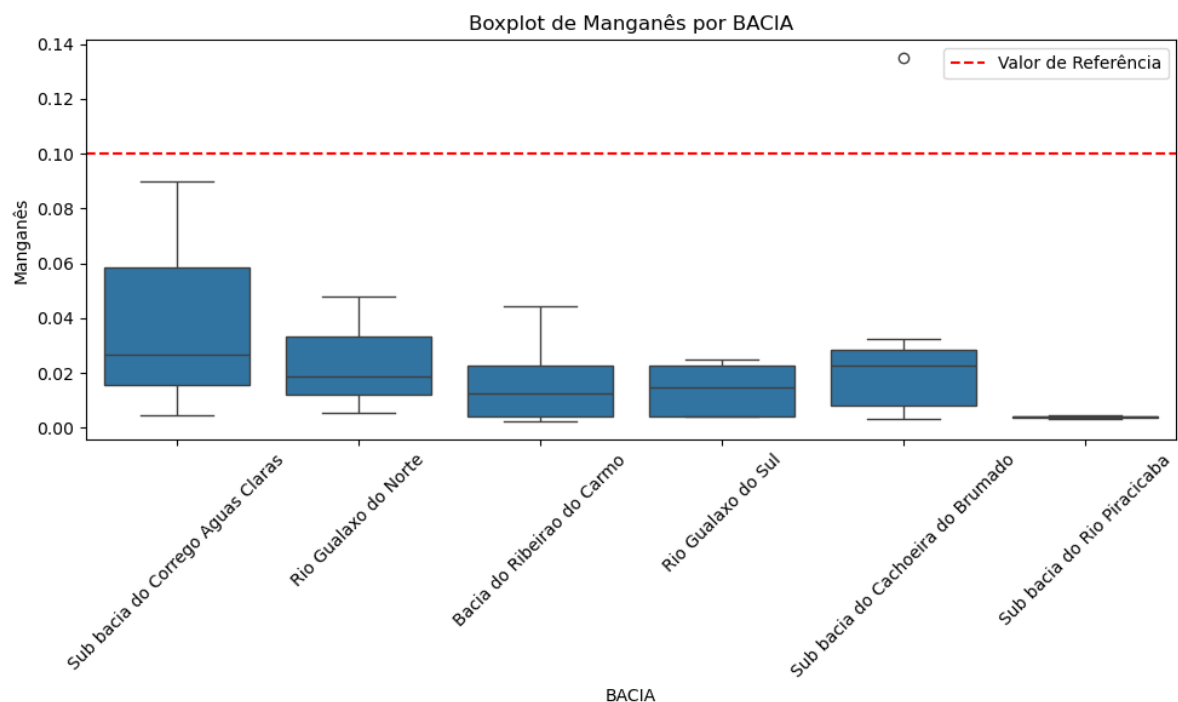


Figura 35 - Gráfico com boxplots por bacia e sub-bacia do elemento Manganês.

Com os gráficos boxplots separados por bacia e sub-bacia acima (Figura 35) e a análise dos dados apresentados, tem-se que a mediana dos diagramas de caixa mantiveram-se entre 0,01 a 0,03 mg/L, aproximadamente. Portanto, houve pouca variabilidade dos resultados laboratoriais entre os domínios hídricos. Apenas para a sub-bacia do Córrego Águas Claras, no qual o Q3 (percentil 75) apresentou valores de 0,06 mg/L. A sub-bacia de Cachoeira do Brumado apresenta o outlier do ponto CBT42, alocado a jusante do distrito de mesmo nome.

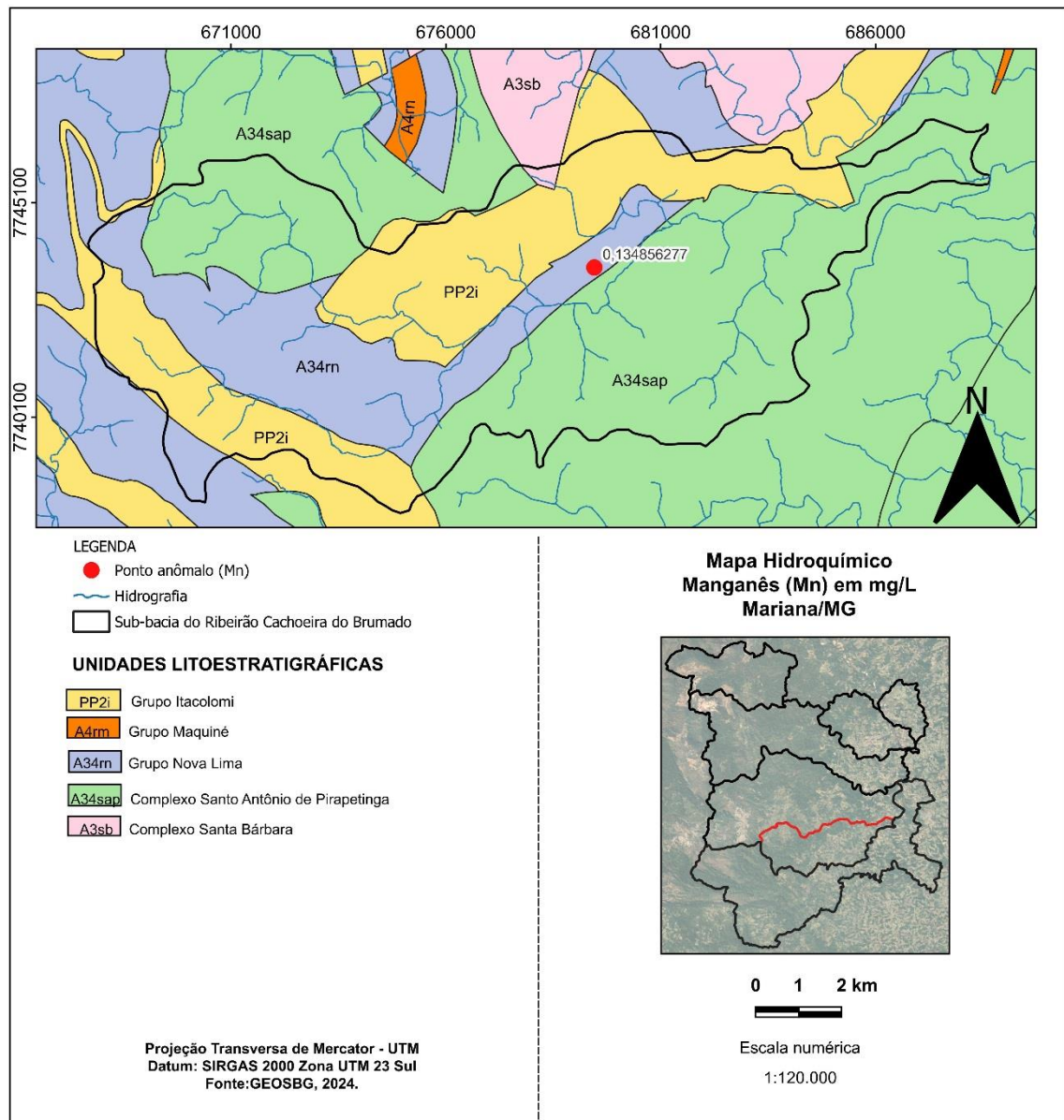


Figura 36 - Mapa hidroquímico do elemento Manganês (Mn) e o ponto anômalo. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais (1:1.000.000) GEOSBG (2023); Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias e Sub-bacias (Souza 2005).

O mapa hidroquímico (Figura 36) mostra que o ponto CBT42 está alocado no Grupo Nova Lima basal, onde afloram as seguintes rochas: Metabasito, Metabasalto, Talco-Xisto, Gnaiss, Serpentinó, Ultramafito. Para Roy (2006) o Grupo Nova Lima é composto por rochas vulcânicas e metassedimentares, incluindo xistos carbonosos, que podem conter o manganês, originado pelo metamorfismo dos carbonatos de manganês. Portanto, é possível que a anomalia seja oriunda da rocha.

O ponto CBT42 está localizado a jusante no distrito de Cachoeira do Brumado, o que implica que a contaminação também pode estar relacionada a atividades antrópicas na área urbana. A ingestão contínua de manganês pode causar disfunções neurológicas como o mal de

parkinson, por isso é importante que a população local fique atenta às áreas contaminadas próximas.

4.3.5 Discussão geral das análises laboratoriais

A partir da análise dos pontos anômalos dos elementos Alumínio (Al), Antimônio (Sb), Ferro (Fe) e Manganês (Mn), foi estabelecida uma relação com a litologia local e a localização das drenagens. Foram discutidas as possíveis causas da contaminação desses elementos nos distritos e áreas rurais do município de Mariana. Como resultado, 14 pontos apresentaram valores que ultrapassaram o limite máximo permitido (VMP) de acordo com os padrões de qualidade estabelecidos pela Portaria 888 GM/MS, de 4 de maio de 2021, e pela Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005 (Figura 37 e Figura 38). Para complementar esta discussão foi importante a consulta dos APÊNDICES I e II.

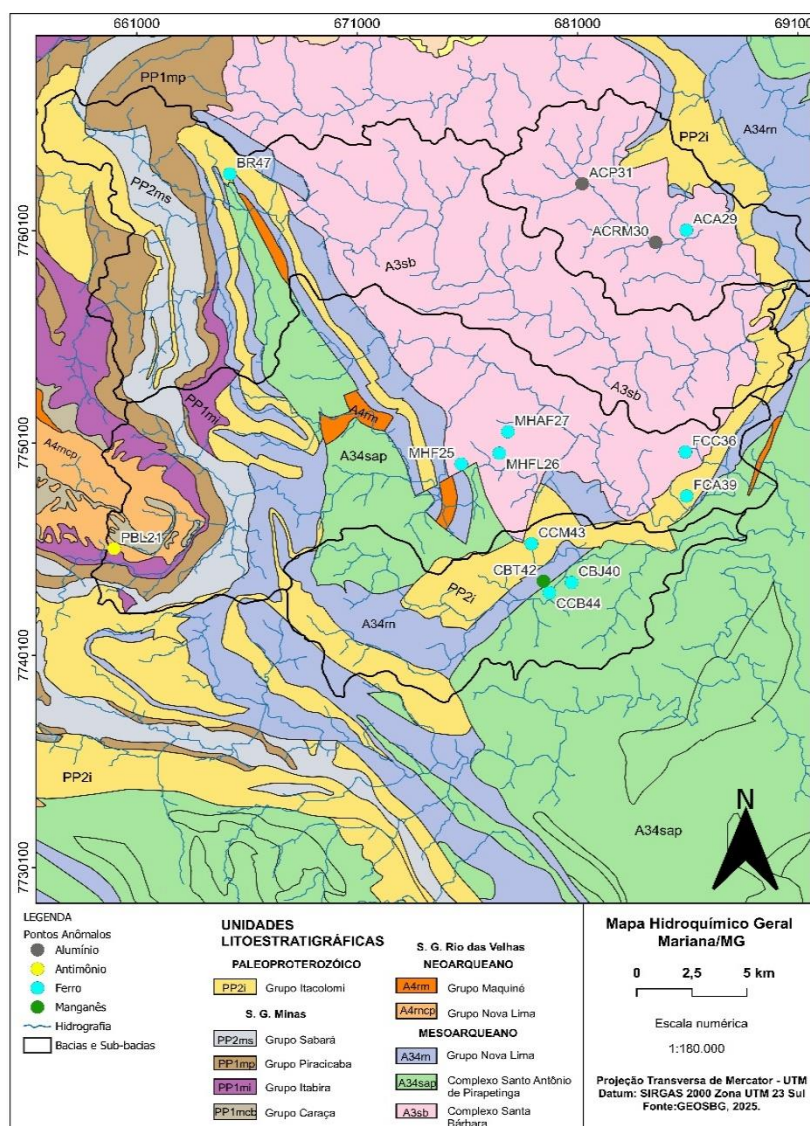


Figura 37 - Mapa hidroquímico geral dos elementos Alumínio (Al), Antimônio (Sb), Ferro (Fe) e Manganês (Mn) e o ponto anômalo. Fonte: Mapa geológico de Minas Gerais (1:1.000.000) GEOSBG (2023); Hidrografia (FABDEM 2023); Bacias e Sub-bacias (Souza 2005).

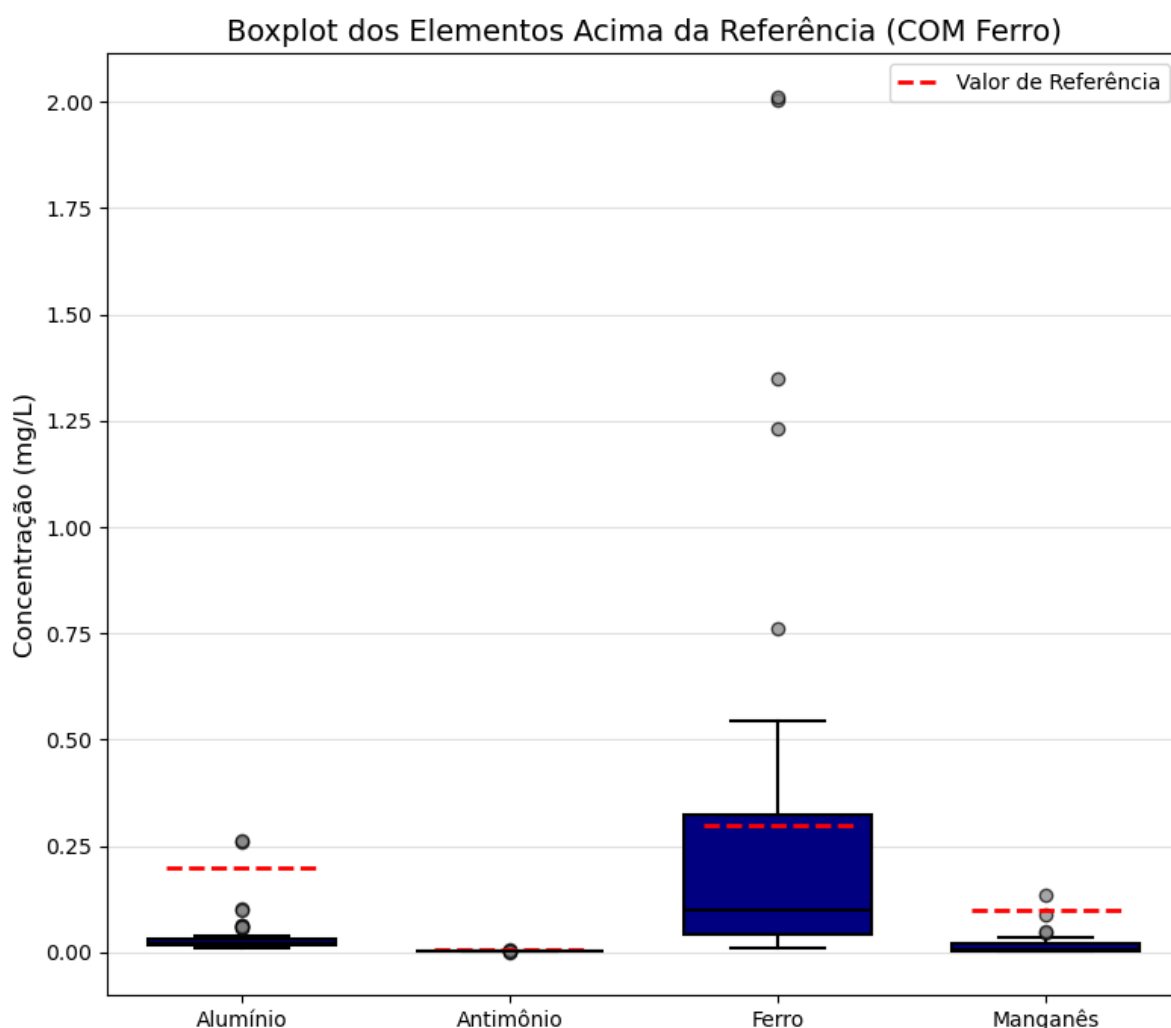


Figura 38 - Gráfico com os boxplots dos elementos Alumínio, Antimônio, Ferro e Manganês.

Os pontos ACRM 30 e ACP 31, localizados no distrito de Águas Claras, apresentaram anomalias de alumínio e ferro. Ambos estão a jusante, sendo que a amostra ACRM 30 foi coletada dentro do distrito, o que exige atenção para a contaminação dentro da área pois de acordo com a descrição de campo a água do local possui coloração marrom e odor de esgoto, acesso para gado e descarte de esgoto vindo de casas próximas. Na área urbana, o ponto ACA 29, situado em uma área de recarga a montante que abastece a comunidade, também apresenta contaminação por ferro. A litologia da região, composta pelo Complexo Santa Bárbara, pode justificar as anomalias de ferro e alumínio, devido à ocorrência natural desses elementos nas rochas. No entanto, para o ponto ACP 31, situado em uma captação no córrego a jusante na área rural, é importante considerar a influência de fatores antrópicos na contaminação.

No distrito de Passagem de Mariana, o ponto PBL 21 é um poço, localizado a montante, próximo ao reservatório da mineração Sampaio, apresenta concentrações de antimônio (Sb) superiores aos limites estabelecidos pela legislação vigente. A litologia da

região é composta por rochas metassedimentares clásticas do Grupo Nova Lima, no topo. Essa contaminação pode também estar relacionada à atividade aurífera pretérita na área, visto a proximidade do poço à mineração Sampaio.

Monsenhor Horta é um distrito de Mariana, situado na Bacia do Ribeirão Carmo. No estudo atual, foram identificados três pontos com níveis de ferro (Fe) fora dos parâmetros estabelecidos. O ponto MHF 25 é um córrego a montante, que se encontra em bom estado de conservação. O ponto MHFL 26, uma nascente a montante dentro do distrito, que abastece a Rua Santo Antônio, apresenta estado de conservação prejudicado devido ao desmatamento. O ponto MHAF 27, um córrego a montante, mais afastado da área urbana, está bem preservado, mas possui uma área de recarga no topo do morro, que está desmatada. A litologia das amostras é composta pelo Complexo Santa Bárbara, que inclui rochas como o anfibólito, com ocorrência natural de ferro. Portanto, estas anomalias de ferro nas águas podem estar associadas a condição natural da geologia local e por aumento de sólidos em suspensão e colóides provenientes de processos erosivos à montante por intervenção antrópica indireta.

Os pontos FCC 36 e FCA 39 estão localizados a leste, na região ao redor do distrito de Furquim, ainda dentro da Bacia do Ribeirão do Carmo. Ambos apresentaram valores de ferro superiores aos limites estabelecidos pela legislação vigente. O ponto FCC 36 corresponde a um córrego a montante, cuja zona de recarga foi afetada, embora essa drenagem abasteça a maior parte do município. O ponto FCA 39 é um córrego a jusante, localizado dentro do distrito, que está pouco preservado e com baixa vazão. As litologias da região são, respectivamente, o Complexo Santa Bárbara para a amostra FCC 36 e o Grupo Itacolomi para a amostra FCA 39. Nesse contexto, é possível considerar a influência de fatores antrópicos, levando em conta o nível de preservação das áreas amostradas e a litologia local, como os anfibólitos do Complexo Santa Bárbara, que naturalmente contêm ferro em sua composição.

Em Cachoeira do Brumado, distrito situado na sub-bacia de mesmo nome, foram identificados quatro pontos com anomalias nos elementos ferro e manganês. São eles: o ponto CBJ 40, a montante do distrito, em bom estado de conservação e responsável por cerca de 45% do abastecimento local; o ponto CBT 42, um córrego a jusante, que apresenta esgoto nas proximidades e um loteamento a montante; o ponto CCM 43, um córrego a jusante com nascente distante e mata ciliar preservada; e, por fim, o ponto CCB 44, uma cachoeira a jusante, utilizada apenas para banho, próxima ao distrito. Todos os pontos apresentam contaminação por ferro, exceto o CBT 42, que apresenta anomalia por manganês. As características geológicas locais podem ser responsáveis por essas anomalias, além da

presença de esgotos próximos e da poluição das águas, como pode ocorrer na cachoeira. É importante destacar o ponto CBJ 40, que apresenta o maior valor de ferro (1,2330442 mg/L) e é responsável por uma grande parte do abastecimento na comunidade.

Na importante bacia do Rio Gualaxo do Norte foi encontrada, no distrito de Bento Rodrigues, a contaminação por ferro, a montante, fonte em bom estado de preservação que abastece toda a área do distrito. A composição litológica sugere a presença de quartzito, no entanto é importante considerar a proximidade com a Mina de ferro de Germano.

5 CONCLUSÃO

Com base nos objetivos iniciais deste trabalho, compreende-se que estes foram alcançados, uma vez que foram realizados tratamentos e análises detalhadas dos dados hidroquímicos obtidos nas 58 amostras coletadas em diferentes pontos do município de Mariana e os seus distritos. Com base nos critérios da Portaria GM/MS nº 888/2021 e da Resolução CONAMA nº 357/2005, foi possível identificar os parâmetros inorgânicos menores e traço (metais), cujas concentrações superaram os Valores Máximos Permitidos (VMP), permitindo a compreensão das fontes de contaminação ou alterações na qualidade da água. Além disso, foram gerados mapas hidroquímicos que representaram de forma precisa e espacial a distribuição dos parâmetros analisados, destacando as áreas com alterações significativas. Esses mapas serviram como uma ferramenta eficaz para interpretar a relação entre as características hidroquímicas das águas, a geologia local e as atividades antrópicas, em especial a mineração e a contaminação por falta de saneamento básico das áreas urbanas.

Para aos parâmetros analisados em campo, os pontos PMM19, PB20 e PBL21, localizados na bacia do Ribeirão do Carmo, observou-se uma recorrente anomalia nos parâmetros de condutividade elétrica, resistividade e TDS, com valores anômalos que sugerem a influência de fontes de poluição, possivelmente associadas à atividade urbana e à mineração na região. Com alteração nos mesmos parâmetros, o ponto CBT42 também apresenta elevados valores de condutividade elétrica e TDS, e possui esgoto perto. A proximidade dessas amostras a áreas urbanizadas e atividades industriais, como o reservatório da mineração Sampaio, reforça a hipótese de contaminação antrópica. Além disso, a ocorrência de valores de pH inferiores a 6 nas bacias do Rio Gualaxo do Norte e do Ribeirão do Carmo, especialmente em pontos como RC49, CC48, BR47, FG07, e MRR33, indica a presença de drenagens ácidas, possivelmente devido à composição litológica das áreas, que inclui rochas ferríferas típicas do Quadrilátero Ferrífero, além da influência das atividades de mineração.

A análise dos dados laboratoriais revelou anomalias nos parâmetros de ferro, alumínio, antimônio e manganês em 14 pontos (ACA29, ACRM30, ACP31, PBL21, MHF 25, MHFL 26, MHAF 27, FCC 36, FCA 39, CBJ 40, CBT 42, CCM 43, CCB 44, BR47, CBT42) do município de Mariana e seus distritos, confirmando a presença de contaminação nos recursos hídricos da região. A relação entre as anomalias e a litologia local, em maior parte aquela do Complexo Santa Bárbara e o Grupo Nova Lima, foi evidente, uma vez que a presença natural

de metais como ferro e alumínio destas rochas pode ter contribuído para os elevados valores observados em alguns pontos. No entanto, a atividade humana, especialmente as práticas antrópicas relacionadas à mineração e ao descarte de esgoto, também desempenha um papel crucial na contaminação destas drenagens. Pontos localizados próximos a áreas urbanas, como os distritos de Águas Claras e Passagem de Mariana, mostraram sinais claros de poluição, com a presença de esgoto e outros resíduos, o que sugere a necessidade de monitoramento contínuo e medidas corretivas para proteger a qualidade da água. Alguns dos pontos analisados são responsáveis pelo abastecimento parcial ou total das áreas urbanas, como o CBT42 e o BR47. Com isso, um destaque importante nessas localidades deve ser feito visando a preservação de áreas de recarga e o controle da poluição nesses locais.

A mineração, especialmente, se revelou um fator significativo nas contaminações observadas, como no caso do ponto PBL 21, localizado próximo ao reservatório da mineração Sampaio, e nas imediações da Mina de Ferro de Germano, que pode ter contribuído para a contaminação por ferro no distrito de Bento Rodrigues. Além disso, a proximidade de captações com áreas de esgoto destaca a necessidade de um planejamento urbano mais eficaz na cidade de Mariana e na parte urbana dos seus distritos.

Ao correlacionar os resultados de campo e os das análises laboratoriais, tem-se que os pontos BR47, CBT42, PBL21 apareceram nas duas análises, confirmando os dados de campo como a condutividade elétrica e a concentração de íons metálicos no meio aquoso, também corrobora para a veracidade de ambos os dados visto que houve a detecção de parâmetros nos dois tipos de análises.

Vale ressaltar que o presente estudo é baseado nos dados obtidos em uma única campanha, realizada no final do período seco e início do período chuvoso, nos dias 16/10/2015 e 07/11/2015. Dessa forma, para um monitoramento completo das águas superficiais e subterrâneas, recomenda-se a realização de uma nova campanha, além da necessidade de atualização dos dados apresentados do ano de 2015. Por isso, estudos hídricos e análises hidroquímicas ainda são necessárias para maior detalhamento e monitoramento desta região acometida pela atividade mineradora.

Em suma, as anomalias observadas refletem um cenário de contaminação tanto natural quanto induzida por atividades humanas, principalmente a mineração e falta de saneamento básico. Portanto, é fundamental que ações de gestão ambiental e de recursos hídricos sejam adotadas pelo município e pelas empresas que ocupam este território. Isso inclui a preservação das áreas de recarga e nascentes, o controle da poluição oriunda das atividades

humanas, especialmente a mineração, e a melhoria das infraestruturas de saneamento básico. O monitoramento contínuo e a fiscalização das atividades humanas pelos órgãos ambientais e de vigilância em saúde, aliada a medidas corretivas, são essenciais para reduzir os impactos ambientais e garantir a potabilidade da água para as comunidades de Mariana. Para tanto, a divulgação inicial do presente trabalho pode elucidar a população local, principalmente aquela acometida pelos resultados apresentados.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Indicadores de qualidade. Índice de qualidade das águas (IQA)**. Brasília: ANA, 2004.
- AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY (ATSDR). 2012. **Toxicological profile for Manganese**. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.
- ALKMIM, F. F., MARSHAK, S. 1998. **Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil**: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, **90**:29–58.
- BALTAZAR, O. F.; RAPOSO, F. O. **Programa de Levantamentos Geológicos do Brasil, Folha Mariana – SF.23-X-B-I. Estado de Minas Gerais**. Escala 1:100.000. Brasília: DNPM/CPRM, 1993.
- BARBOSA, Igor Silva. **Análise dos parâmetros físico-químicos e metais presentes nas nascentes do rio meia ponte**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Produção Sustentável) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2015.
- BEKKER A., SIAL A.N., KARHU J.A., FERREIRA V.P., NOCE C.M., KAUFMAN A.J., ROMANO A W, PIMENTE, M.M. 2003. **Chemostratigraphy of carbonates from the Minas Supergroup, Quadrilátero Ferrífero (Iron Quadrangle), Brazil**: a stratigraphic record of early proterozoic atmospheric, biogeochemical and climatic change. *Am. J. Sci.*, **303**:865-904.
- BRASIL, 2021. Ministério de Saúde. Portaria GM/MS nº 888, 4 de maio de 2021. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**.
- BRASIL, 2005. CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº357, d 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes**.
- BÖLVIKEN, B., KULLERUD, G., & LOUCKS, R. R. (1990). **Geochemical and metallogenic provinces**: A discussion initiated by results from geochemical mapping across northern Fennoscandia. *Journal of Geochemical Exploration*, **39**(1-2), 49-90.
- PIRH, 2010. Consórcio Ecoplan-Lume. Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e planos de ações para as unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos no âmbito da Bacia do Rio Doce.

BRASIL, 2000. CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 274, 29 de novembro de 2000. **Define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras.**

CAPITANI, E.M. De. 2006, Epidemiologia e geologia médica. *In*: SILVA, C.R. (Ed.). **Geologia médica no Brasil: efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana, animal e meio ambiente.** Rio de Janeiro: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 220 p.

CETESB, COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Apêndice D: Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade** - 2014.

CETESB, COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (São Paulo). **Ficha de informação toxicológica: FIT.** 2022.

CORTECCI, G. 2006. **Geologia e saúde.** *In*: CORTECCI, G. Geomedicina. Departamento de Ciências da Terra e Geológico-Ambiental, Universidade de Bolonha. Tradução de Wilson Scarpelli.

DORR II J. V., GAIR J. E., POMERENE J. B., RYNEARSON G. A. 1957. **Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero, Brasil.** Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão de Fomento da Produção Mineral, Avulso, 81. 31 p.

DORR II, J.V.N. 1969. **Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil.** Washington, US Geol. Surv. 110 p. (Prof. Pap. 641-A).

ENDO, Issamu et al. **Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos.** Tradução. Belo Horizonte, MG: 3i Editora, 2020. p. 70-113. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/ce698998-978f-41fd-b9fe-d6cf749cda33/3086757.pdf>.

FILELLA, M., BELZILE, N. and CHEN, Y.W. (2002) **Antimony in the Environment A Review Focused on Natural Waters II.** Relevant Solution Chemistry.

GARRET, R. G. 2013. Natural distribution and abundance of elements. *In*: SELINUS, O. (Ed.). **Essentials of Medical Geology. Dordrecht: Springer Netherlands**, p. 35-57.

LADEIRA, E.A. 1980. **Metallogenesis of Gold at the Morro Velho Mine and in the Nova Lima District, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil.** London. 272 p. (PhD Thesis, University of Western Ontario).

LANA C., ALKMIM F. F., ARMSTRONG R., Scholz R., ROMANO R., NALINI JR. H. A. 2013. **The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil.** Precambrian Research, 231: 157-

NOCE, C. M; PINHEIROS, S. O; LADEIRA, E. A; FRANÇA, C. R; KATTAH, S. A **seqüência vulcanossedimentar do Grupo Nova Lima na região de Piedade do Paraopeba, borda oeste do quadrilátero ferrífero, Minas Gerais.** Revista Brasileira de Geociências, Belo Horizonte, ano 1992, v. 22, p. 175-183, junho 1992.

NOCE, C.M., 1995. **Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.** Ph.D. Tese, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

MENDES, L. A. **Avaliação da exposição da população de Passagem de Mariana (MG) aos elementos-traço, com ênfase ao arsênio.** 2012. Dissertação (Engenharia Civil) - Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2012.

MESQUITA FILHO, J. **Substituição de estabilizantes a base de chumbo pelo de cálcio-zinco no processo produtivo de tubos de pvc rígido.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2005.

MOTA, R. **Geofísica aplicada às águas subterrâneas: casos de estudo de contaminação de águas subterrâneas e evoluções temporais da resistividade eléctrica, 2009.** Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal,

PARRON, Lucilia Maria. Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água [recurso eletrônico] / Lucilia Maria Parron; Daphne Heloisa de Freitas Muniz; Claudia Mara Pereira. - Dados eletrônicos. - Colombo: Embrapa Florestas, 2011.

PIRH, 2010. Consórcio ecoplan-lume. Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio doce e planos de ações para as unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos no âmbito da Bacia do Rio Doce.

RAZZOTO, E. S. 2009. **Estudos da migração de antimônio em águas minerais envasadas empregando métodos voltamétricos.** Dissertação, Departamento de Química, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 83 p

RODRIGUES, A. S. de L., & NALINI JÚNIOR, H. A. (2009). **Valores de background geoquímico e suas implicações em estudos ambientais.** Rem: Revista Escola de Minas, 62(2), 155–165.

ROY, S. (2006). **Sedimentary manganese metallogenesis in response to the evolution of the Earth system.** Earth-Science Reviews, 77(4), 273–305.

SICHEL, S.E. 1983. **Geologia das rochas Pré-Cambrianas da região de Barão de Cocais e geoquímica preliminar dos komatiitos do Supergrupo Rio das Velhas,**

Quadrilátero Ferrífero, MG. MSc. *Thesis*. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 232 p.

SILVA, B. et al. **Minicurso de Estatística Básica:** Introdução ao software R. Programa de Educação Tutorial: Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009. (menção de página: p. 33)

SILVA, C.R. 2006. Geologia médica no Brasil. In: SILVA, C.R. (Ed.). **Geologia médica no Brasil:** efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana, animal e meio ambiente. Rio de Janeiro: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 220p

SILVA, F. C. Da. 2007. **Análise integrada de usos de água superficial e subterrânea em macro-escala numa bacia hidrográfica: o caso do alto rio Paranaíba.** Dissertação, Instituto de pesquisas hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 132 p.

SELINUS, O. 2006. Geologia médica. In: SILVA, C.R. (Ed.). **Geologia médica no Brasil:** efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana, animal e meio ambiente. Rio de Janeiro: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 220p.

SOUZA, L. A., SOBREIRA, F. G., FILHO, J. F.P. 2005. **Cartografia e diagnóstico geoambiental aplicados ao ordenamento territorial do município de Mariana – MG.** Revista Brasileira de Cartografia, **57**:189-203.

SOUZA, L. A. **Diagnóstico do meio físico como contribuição ao ordenamento territorial do município de mariana (MG).** 2004. Dissertação (Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.

VON SPERLING, M. **Associação entre a legislação brasileira de qualidade da água (Resolução CONAMA n. 20/86 de 18 de Junho de 1986) e a seleção de processos de tratamento de esgotos.** Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 3, n. 1 - n. 2, p. 67-73, jan./mar. - abr./jun., 1998.

VIGLIO, E. P. **Atlas geoquímico da bacia do rio Doce:** Minas Gerais e Espírito Santo / Eduardo Paim Viglio [e] Fernanda Gonçalves da Cunha. – Rio de Janeiro: CPRM, 2016. 245 p.

WATERWATCH AUSTRALIA, 2005. **Waterwatch Australia national technical manual:** module 6 -groundwater monitoring, Department of the Environment and Heritage, Canberra, ACT

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Lead in drinking-water: background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality.** Geneva: World Health Organization, 2011.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Cadmium (Environmental Health Criteria 134)**. Geneva: World Health Organization, 1992.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Barium and barium compounds**. Concise international chemical assessment document 33. Geneva: World Health Organization, 2001.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Environmental health criteria 165: **Inorganic lead**. Em: IPCS (International Programme on Chemical Safety). Geneva: World Health Organization, 1995.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Aluminium in drinking-water**: background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality. Geneva: World Health Organization, 2003.

ZUCCHETTI M. e BALTAZAR F. O. **Projeto Rio das Velhas; texto explicativo do mapa geológico integrado** – escala 1:100.000 - Belo Horizonte: DNPM/CPRM, 1998, reimpressão 2000.

APÊNDICE(S)

APÊNDICE I – Tabela de descrição de todos os pontos.

SIGLA_PONTO	LOCALIDADE	TIPO	DATA	OBSERVAÇÃO
PSES1	PASSAGEM	CAPTAÇÃO	16/10/2015	APP bem preservada com vegetação arbustiva no topo de encosta. Necessita de cercas e placas. Vale encaixado com exuberante estado de preservação. Água destinada a ETA SUL.
PSSR2	PASSAGEM	CAPTAÇÃO	16/10/2015	Vegetação Arbórea queimada em topo de encosta. Presença de banhistas e animais (gado e cavalo) na área. A captação fornece a ETA Santa Rita que abastece o bairro Cabanas.
PBES3	PASSAGEM	CAPTAÇÃO	16/10/2015	APP preservada com vegetação arbórea em topo de encosta. Córrego encaixado entre rochas. Captação segue para ETA Sul (Centro, São Gonçalo, Prainha e Nossa Senhora do Carmo).
PBP4	PASSAGEM	CAPTAÇÃO	16/10/2015	Captação com vegetação arbustiva (bambú, gramíneas, samambaias) em base de encosta em bom estado de conservação. Presença de banhistas no entorno da captação. Abastece a ETA SUL.
ES5	PASSAGEM	ESTAÇÃO	16/10/2015	Estação de tratamento cuja água é utilizada no abastecimento para Passagem (Vila São Vicente, Rua Yolanda Guimarães) e Mariana (Bairro São Gonçalo, Sto Antônio, Av NSr do Carmo, Centro)
ESR6	MARIANA	ESTAÇÃO	16/10/2015	Estação de tratamento que abastece o Bairro Cabanas, Santa Rita, Vale Verde e a comunidade de Santa Clara.
FG07	PASSAGEM	MINA	17/10/2015	Mina em área urbanizada e antropizada, fonte utilizada para abastecimento e consumo.
CSTE08	MARIANA	CÓRREGO	17/10/2015	Captação em córrego em meia encosta, difícil acesso subindo a encosta íngreme, entorno bem preservado, com vegetação arbustiva, nota-se presença de girinos.
EMS09	MARIANA	ESTAÇÃO	17/10/2015	Estação de tratamento do SAEE, provinda da fonte de captação CMS10 (captação mata seminário), água clorada. Abastece o bairro chácara, manda água para o reservatório São Pedro.
CMS10	MARIANA	CÓRREGO	17/10/2015	Captação em córrego no fundo de vale próximo à estação de tratamento (EMS09) sob a APA Seminário, possui cerca delimitando a captação, em meio a vegetação arbustiva, vigilância sanitária detectou foco de esquistossomose no córrego.

SIGLA_PONTO	LOCALIDADE	TIPO	DATA	OBSERVAÇÃO
CMAT12	MARIANA	CÓRREGO	17/10/2015	Captação em córrego a montante da estação de tratamento (EMAT11) a qual ela abastece. Area ao entorno bem preservada situada um fundo de vale, a drenagem corta perpendicularmente as camadas de rochas (filito).
CGG13	MARIANA	CÓRREGO	17/10/2015	Captação em córrego em meia encosta, de fácil acesso livre para acesso de pessoas, situado bem próximo a comunidade do Gogo. A drenagem concorda com o mergulho das camadas rochosa, basicamente quartzitos e formações ferríferas. A água capitada atende as regiões: Gogo, Rosario, parte da Samitri. Vegetação arbórea.
CMQ14	MARIANA	CÓRREGO	17/10/2015	Captação em nascente de córrego próximo a mineração da Vale. Acesso restrito sem trânsito de pessoas. Area entorno bem preservada com vegetação arbórea e arbustiva. Encontrou-se sacos plásticos no solo para contenção de deslizamentos. A água capitada atende a Vila Maquine, Morada do sul, jardim dos inconfidentes e jardim Santana.
CCR15	MARIANA	CÓRREGO	17/10/2015	Captação em córrego em fundo de vale fácil acesso, possui cerca, mas o acesso é livre. A captação recebe água de vários afluentes dos córregos dos cristais. Atualmente, fica um responsável por uma bomba que capta água remanescente do córrego para suprir a falta de água. Abastece as comunidades: Colina, Estrala do Sul.
ETDR16	MARIANA	MINA	21/10/2015	Captação em mata preservada, de fácil acesso e em bom estado de conservação. Abastece os bairros Colina, São Sebastião, Vila Aparecida (Loteamento de Cássio), Estrela do Sul e parte do Centro.
ETDR17	MARIANA	MINA	21/10/2015	Mina em região de mata preservada, nascentes pontuais, área de recarga aparentemente preservada, cloração feita a jusante do ponto (no ponto EDTR16)
PJS18	MARIANA	POÇO	21/10/2015	Poço localizado no bairro Jardim Santana. Abastece os bairros Jardim Santana, Jardim inconfidentes e São Cristóvão. Região de área de pastagem, topo de encosta. Área de preservação do parque do GoGo.
PMM19	MARIANA	POÇO	21/10/2015	Poço localizado em área urbanizada, próximo a córrego poluído e com odor forte. Água bombeada vai para os Reservatórios São Pedro e atende o bairro Dom Oscar. Vide fotos para informações do poço

SIGLA_PONTO	LOCALIDADE	TIPO	DATA	OBSERVAÇÃO
PB20	MARIANA	POÇO	21/10/2015	Poço localizado às margens da rodovia, próximo ao posto Raul. Atendimento à área do reservatório do bairro São Pedro. Córrego passando abaixo do poço, área com urbanização próxima.
PBL21	MARIANA	POÇO	21/10/2015	O poço localizado próximo ao reservatório da mineração Sampaio, é responsável pelo abastecimento do bairro Liberdade. Encontra-se em bom estado de conservação em uma área urbanizada e com resquícios de vegetação arbustiva.
PC22	MARIANA	CÓRREGO	21/10/2015	Captação em córrego no Pico da Cartuxa, de fácil acesso, e em excelente estado de conservação, com vegetação arbórea e arbustiva. Presença de girinos e baratas d'água. Água vai para o córrego dos Inocentes e abastece o bairro da Cartuxa.
PC23	MARIANA	CÓRREGO	21/10/2015	Captação no Pico da Cartuxa, de fácil acesso por trilha e em péssimo estado de conservação. O local é cercado e foi observado a presença de fezes de animais e lixo. A água vai para o córrego dos inocentes e abastece o bairro da Cartuxa.
CMD24	MARIANA	CÓRREGO	21/10/2015	Captação em área bem preservada devido à distância, de difícil acesso por trilha, com vegetação arbustiva e arbórea. A água vai para o reservatório Cruzeiro do Sul e abastece o bairro Cruzeiro do Sul.
MHF25	MONSENHOR HORTA	CÓRREGO	23/10/2015	Captação apresentando cerca de péssima qualidade, porém com bom estado de conservação e vegetação arbórea. Abastece apenas a Rua Jose Ferreira, entretanto não todas as residências.
MHFL26	MONSENHOR HORTA	NASCENTE	23/10/2015	Captação em nascente, péssimo estado de conservação e área ao entorno desmatada, plantação de eucaliptos na área de recarga. Fontes de água proximais vieram a se extinguir-se. Local da captação é um pasto com um brejo. Abastece a Rua Santo Antônio.
MHAF27	MONSENHOR HORTA	CÓRREGO	23/10/2015	Barragem com captação canalizada. Area cercada bem conservada, com área de recarga (topo do morro) desmatada. A vazão vem diminuindo no decorrer de 2 anos (2º o proprietário do terreno). Presença de fauna.

SIGLA_PONTO	LOCALIDADE	TIPO	DATA	OBSERVAÇÃO
MHA28	MONSENHOR HORTA	NASCENTE	23/10/2015	Captação em nascente (brejo) com presença de gramínea e fitoplâncton. Cerca em péssimo estado (quebrada). Area de recarga desmatada para uso de pastagem.
ACA29	ÁGUAS CLARAS	CÓRREGO	23/10/2015	Captação alimentada por duas nascentes. Area mal preservada com ilhas de mata ciliar e área de recarga desmatada (pastagem). Vazão baixa. Única fonte de abastecimento de toda comunidade.
ACRM30	ÁGUAS CLARAS	CÓRREGO	23/10/2015	Captação em ribeirão mineiro encontra-se em péssimas condições, coloração marrom e odor de esgoto, possui acesso para gado, descartam esgoto vindo de casas próximas. Água imprópria para o consumo humano. Sugere captar água em nascente do ponto ACP31.
ACP31	ÁGUAS CLARAS	CÓRREGO	23/10/2015	Captação feita em córrego do Pau Mulato encontra em meia encosta apresenta vegetação arbustiva, córrego próximo a estrada. Possível fonte de captação para ETA que está sendo construída.
MRR33	MARIANA	RESERVATÓRIO	24/10/2015	Reservatório encontra-se em bom estado de conservação localizado no bairro rosário, área antropizada com muitas residências ao redor. O acesso ao reservatório é restrito todo cercado. Não foi possível coletar amostra diretamente do reservatório pois estava em nível muito baixo, a amostra de água fora coletada em um cano "ladrão".
MRC34	MARIANA	RESERVATÓRIO	24/10/2015	Reservatório encontra-se no bairro Colina em ruim de estado de conservação, área bem antropizada em meio a varia residência. Acesso restrito. Reservatório com nível baixo de água, observou-se caminhões pipas abastecendo de outra fonte: Del Rei. A amostra foi coletada da mina Del Rei.
MCM35	MARIANA	CACHOEIRA	24/10/2015	Captação cachoeira do Matadouro em ruim estado de conservação próximo ao bairro acesos livre de pessoas e animais. Encontrou-se muito lixo no leito no poço da cachoeira. Nota-se a presença de peixes.

SIGLA_PONTO	LOCALIDADE	TIPO	DATA	OBSERVAÇÃO
FCC36	FURQUIM	CÓRREGO	30/10/2015	Captação feita em topo de encosta, água com sedimento em suspensão, eucaliptos circundam toda a área (zona de recarga afetada), presença de musgo e óleo no local, barragem em estado precário, área de pastagem pouco a jusante da nascente, baixa vazão, sem cerca no local. A água abastece grande parte do distrito, mas tem faltado água para as regiões mais altas e mais distantes.
FCZ37	FURQUIM	CÓRREGO	30/10/2015	Área com entorno bem preservada, com espécies nativas e ameaçadas de extinção, mata ciliar preservada, abastece a praça da matriz do vilarejo
FCD38	FURQUIM	-	30/10/2015	A nascente está no meio de um bambuzal e é canalizada para um reservatório que não possui tampa. Abastece a rua monsenhor Horta, área de pastagem, gado com acesso
FCA39	FURQUIM	CÓRREGO	30/10/2015	Área bastante degradada, pastagens, vestígios de desmatamento, topo de encosta preservado com mata ciliar, vazão muito baixa, área cercada, abastece rua do arraial novo
CBJ40	CACHOEIRA DO BRUMADO	CÓRREGO	30/10/2015	Água transparente, porém, com sedimentos em suspensão. Topo de encosta com área de pastagem (recarga) e desmatado, cerca nas proximidades do córrego, mas não possui no topo de encosta. Água abastece aproximadamente 45% do distrito.
CCI41	CACHOEIRA DO BRUMADO	CÓRREGO	30/10/2015	Acesso à captação muito difícil, coleta feita a cerca de 1200m da nascente em caixa tampada. Pouca vegetação nativa, casas no entorno, área não cercada
CBT42	CACHOEIRA DO BRUMADO	CÓRREGO	30/10/2015	Nascente na esteatita, área cercada, pouca vegetação, loteamento a montante (Bela Vila), esgoto próximo ao local.
CCM43	CACHOEIRA DO BRUMADO	CÓRREGO	30/10/2015	Area com vestígios de queimada ao entorno, gramíneas e arbustos no local, região cercada, área distante da nascente com mata ciliar preservada, mesmo cerca aberta, sinais de animais próximos. Da nascente até o reservatório leva-se uns 1800m.
CCB44	CACHOEIRA DO BRUMADO	CACHOEIRA	30/10/2015	Fonte utilizada somente para banho, de coloração amarelada e odor característico de material e decomposição. Localizada em uma área cercada, com casas ao entorno, acesso de animais domésticos, além da vegetação gramínea e topo de encosta com eucaliptos e bambus.

SIGLA_PONTO	LOCALIDADE	TIPO	DATA	OBSERVAÇÃO
SRD45	SANTA RITA DURÃO	RESERVATÓRIO	04/11/2015	Reservatório localizado em uma área cercada e bem preservada, vegetação arbustiva e de fácil acesso por uma estrada de chão, acima do cemitério. Água vinda de rebaixamento de mina (VALE), já tratada e que abastece o município de Santa Rita Durão.
SRD46	SANTA RITA DURÃO	RESERVATÓRIO	04/11/2015	Área de pastagem, bem próxima a comunidade e apesar de cercada, observa-se fezes animais. O reservatório está localizado próximo a mina, levando água do ponto SRD 46 ao ponto SRD45, e abastece o bairro Gloria. Além disso, encontra-se com problemas na bomba d'agua, o que ocasiona o desperdício de água.
BR47	BENTO RODRIGUES	CÓRREGO	04/11/2015	Captação (olho d'agua) em ruim estado de conservação, vegetação arbustiva bem preservada, porem a área não é cercada e tem presença de animais. Amostra de água coletada com coloração translúcida, inodoro, observa-se girinos e baratas d'agua, e o acesso é por uma trilha próxima a estrada que passa acima do córrego Ouro Fino, em uma área onde a geologia é basicamente quartzito. A fonte abastece todo o distrito de Bento Rodrigues.
CC48	CAMARGOS	RESERVATÓRIO	04/11/2015	Captação em topo da encosta (olho d'agua), de difícil acesso por estrada de terra bastante degradada. Vegetação arbórea bem preservada no fundo de vale, com uma plantação de eucalipto a montante. O reservatório encontra-se com muita alga, com odor característico, girinos e baratas d'agua, e amostra de coloração translúcida. O acesso não é cercado.
RC49	CAMARGOS	RESERVATORIO	04/11/2015	Reservatório localizado no alto da comunidade, em meia encosta, próximo a casas e em uma área de pastagem não cercada, com eucaliptos no entorno. A água vem da captação CC48 e é armazenada para posterior distribuição na comunidade de Camargos.
CB50	BANDEIRANTES	CÓRREGO	06/11/2015	Captação em bom estado de conservação, com presença de baratas d'agua, localizado em meio a vegetação arbórea com eucaliptos no entorno e área de pastagem logo acima. Atende todo o distrito de Bandeirantes.
CB51	BANDEIRANTES	CÓRREGO	06/11/2015	Localizada em meio a vegetação arbórea e arbustiva preservada, a captação leva água direto para o reservatório a jusante junto com a captação CB50. Observa-se na nascente baratas d'agua e a montante uma plantação de eucaliptos. Area cercada.

SIGLA_PONTO	LOCALIDADE	TIPO	DATA	OBSERVAÇÃO
CPV52	PADRE VIEGAS	CÓRREGO	06/11/2015	Captação em meia encosta com bom estado de preservação em propriedade particular (Mauro). Vegetação arbustiva com presença de xistos bem intemperado e veio de quartzo. Presença de peixes, girinos, sarapó, bagre. A captação segue para uma ETA que parou de ser construída. No local da ETA a água recebe cloração (ponto CPV53)
CPV53	PADRE VIEGAS	RESERVATORIO	06/11/2015	Reservatório dentro da propriedade do Vicente que recebe cloração através de um filtro de pastilhas que posteriormente é encanada e distribuída para a população de Padre Viegas.
CBO54	PADRE VIEGAS	CÓRREGO	06/11/2015	Captação em meia encosta com excelente estado de conservação. Vegetação arbórea. Á água é captada em meio a uma gruta cercada por itabirito.
CN55	PADRE VIEGAS	CÓRREGO	06/11/2015	Captação em área de pasto exposta, assim como a área de recarga. Vegetação arbustiva com ocorrência de blocos de itabirito e presença de bandeamentos feríferos. Água não clorada com sedimento em suspensão.
CBB56	BARRO BRANCO	CÓRREGO	07/11/2015	Captação em córrego com boa preservação no entorno, porém a cerca de 5m a montante ocorre extensa área de pastagem com fazendas. A captação manda água para o reservatório que abastece todo o município de Barro Branco sem receber cloração. A vedação do mesmo estava em estado crítico, sendo comum a ocorrência de animais mortos dentro dele, segundo morador.
CMA57	MAINART	CÓRREGO	07/11/2015	Captação em base de encosta com bom estado de conservação, porem ao entorno ocorre área de pastagem. Ocorre presença de fauna aquática (cambevas). Cerca de 99% da água é captada. Presença de quartzito em contato com Itabirito.
CSC59	SERRA	CÓRREGO	07/11/2015	Captação em meia encosta com bom estado de conservação dentro da propriedade do Senhor Henrique. Vegetação nativa circundada por eucalipto e pastagem nas margens a jusante. Única fonte de captação da comunidade de Serra. Curso d'água em meio a blocos rolados. Ocorrência de veio de quartzo. A rocha ígnea aflorante apresenta matriz fina, minerais mágicos

APÊNDICE II – Tabela Geral dos Resultados

Parâmetros	Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021/Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005/Resolução CONAMA no 396, de 3 de abril de 2008.	unidade	PSES1	PSSR2	PBES3	PBP4	ES5	ESR6	CSTE8	EMS09	CMS10	EMAT11
Alumínio	0,2	mg/L	0,027375	0,0216215	0,0278767	0,0175487	0,0368099	0,0320743	0,0309774	0,0250893	0,0149001	0,0164857
Antimônio	0,006	mg/L	0,0013274	0,0021973	0,0014023	0,00182877	0,001763	0,0019453	0,001186	0,0031579	0,0026009	0,0032892
Arsênio	0,01	mg/L	0,0002579	0,0001807	0,0001621	5,5481E-05	0,0001575	0,0001908	6,661E-05	0,0002075	0,0001685	8,158E-05
Bário	0,7	mg/L	0,0021238	0,0024165	0,0036987	0,00391808	0,0025636	0,0022958	0,0029182	0,0080799	0,0110794	0,0078311
Berílio	0,04	mg/L	4,237E-06	4,454E-06	5,047E-06	1,0358E-05	4,182E-06	4,535E-06	5,557E-06	3,705E-06	2,833E-06	3,234E-06
Cádmio	0,001	mg/L	2,287E-05	9,545E-06	6,692E-06	6,0012E-06	1,224E-05	5,966E-06	1,245E-05	1,107E-05	5,366E-06	5,843E-06
Chumbo	0,01	mg/L	1,138E-05	-	1,185E-05	-	3,079E-06	6,244E-05	3,952E-05	6,004E-06	-	2,955E-05
Cobalto	0,05	mg/L	0,0018082	0,0015379	0,0015714	0,00160815	0,001627	0,0015522	0,001977	0,0013646	0,001566	0,0015772
Cobre	0,009	mg/L	9,352E-05	3,098E-05	-	-	8,053E-05	7,625E-05	3,511E-05	0,0001703	-	0,0008631
Cromo	0,05	mg/L	0,0021605	0,0018119	0,0018799	0,00189662	0,0019757	0,0018551	0,0023374	0,0016953	0,0018178	0,001886
Ferro	0,3	mg/L	0,0874921	0,0578556	0,0888417	0,01723132	0,0598248	0,0585834	0,0374676	0,1994979	0,1492888	0,032088
Manganês	0,1	mg/L	0,0149425	0,0041726	0,003138	0,0125798	0,0228	0,0228	0,0077967	0,011504	0,0165547	0,0228
Níquel	0,07	mg/L	0,000485	0,0002725	0,000303	0,00063465	0,0002643	0,0002413	0,0004555	0,0003567	0,0005345	0,0004248
Prata	0,01	mg/L	-	-	-	-	1,348E-05	5,073E-06	-	5,027E-06	-	2,531E-06
Selênio	0,04	mg/L	0,0004674	0,0003435	6,058E-05	0,00011067	0,0002622	0,0007063	0,0005487	0,0002663	0,0003506	0,0001444
Urânio	0,03	mg/L	5,808E-06	4,898E-06	4,939E-06	4,8187E-06	1,57E-05	5,669E-06	3,45E-06	1,349E-05	2,557E-06	4,482E-06
Vanádio	0,1	mg/L	5,312E-05	4,179E-05	4,536E-05	3,651E-05	0,0001098	6,768E-05	4,367E-05	0,000119	7,345E-05	5,23E-05
Zinco	5	mg/L	0,0020838	0,0003142	0,0006486	0,00078616	0,0015889	0,0006128	0,0027615	0,006482	0,0019242	0,0024548

*(-): Limites de quantificação (LQ) maior que os padrões de qualidade (Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021 e Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005).

Parâmetros	Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021/Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005/Resolução CONAMA no 396, de 3 de abril de 2008.	unidade	CMAT12	CGG13	CMQ14	CCR15	ETDR16	ETDR17
Alumínio	0,2	mg/L	0,0235461	0,0216279	0,011901	0,01504167	0,0187841	0,024198
Antimônio	0,006	mg/L	0,0022631	0,0022411	0,0026327	0,00176215	0,0022291	0,0023358
Arsênio	0,01	mg/L	2,953E-05	0,0024545	2,506E-05	2,4898E-05	1,206E-05	1,043E-05
Bário	0,7	mg/L	0,0073032	0,0035463	0,0027596	0,00393024	0,0038928	0,0055824
Berílio	0,04	mg/L	5,461E-06	2,421E-06	1,685E-05	2,3291E-05	4,335E-05	2,975E-05
Cádmio	0,001	mg/L	6,977E-06	7,841E-06	6,093E-06	7,9958E-06	0,0002773	0,0003645
Chumbo	0,01	mg/L	-	-	-	-	-	-
Cobalto	0,05	mg/L	0,0014805	0,0016711	0,0015505	0,00153645	0,0014567	0,0016051
Cobre	0,009	mg/L	1,628E-05	-	-	-	0,0001269	-
Cromo	0,05	mg/L	0,0018115	0,0024239	0,0018544	0,00181168	0,0017003	0,0018993
Ferro	0,3	mg/L	0,0250789	0,0335041	0,0704	0,0704	0,0704	0,0167147
Manganês	0,1	mg/L	0,0023196	0,0029387	0,0228	0,0064293	0,0140622	0,0363107
Níquel	0,07	mg/L	0,0006842	0,0004353	0,0004313	0,000438	0,0005988	0,0006208
Prata	0,01	mg/L	-	-	-	-	1,038E-05	1,57E-07
Selênio	0,04	mg/L	0,0001783	0,0002528	0,0003681	0,00022471	-	0,0001581
Urânio	0,03	mg/L	5,768E-06	1,071E-06	1,41E-05	8,3968E-06	1,182E-05	1,31E-05
Vanádio	0,1	mg/L	0,0001019	8,202E-05	1,906E-05	2,4424E-05	3,488E-05	2,391E-05
Zinco	5	mg/L	0,0041411	0,0045549	0,0106757	0,01533658	0,0084018	0,004875

*(-): Limites de quantificação (LQ) maior que os padrões de qualidade (Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021 e Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005).

Parâmetros	Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021/Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005/Resolução CONAMA no 396, de 3 de abril de 2008.	unidade	PC22	PC23	CMD24	MCC 23	MHF 25	MHFL 26	MHAF 27	MHA 28	ACA 29	ACRM 30
Alumínio	0,2	mg/L	0,0203764	0,0652252	0,0222799	0,05720684	0,0387969	0,0295952	0,1038293	0,038395	0,0990799	0,2590626
Antimônio	0,006	mg/L	0,0020946	0,0025217	0,0016894	0,00300298	0,0029518	0,003094	0,0027328	0,0030306	0,002738	0,0023976
Arsênio	0,01	mg/L	0,0001135	0,0001079	0,0001891	0,0001021	9,319E-05	0,0002151	0,0004175	0,0001092	0,0002007	0,0001401
Bário	0,7	mg/L	0,0036342	0,0028367	0,0048643	0,00272554	0,0223878	0,0130425	0,0105161	0,0149362	0,0200232	0,0293086
Berílio	0,04	mg/L	2,549E-06	8,698E-06	3,689E-06	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04
Cádmio	0,001	mg/L	8,105E-05	7,548E-05	6,783E-05	-	2,176E-05	-	2,028E-05	-	2,979E-05	3,293E-05
Chumbo	0,01	mg/L	-	1,331E-05	-	-	-	-	7,008E-05	2,187E-05	-	0,000548
Cobalto	0,05	mg/L	0,0016699	0,0024653	0,001692	0,00400707	0,0039272	0,0038997	0,0039216	0,0030861	0,0033926	0,0030966
Cobre	0,009	mg/L	1,718E-05	6,68E-05	7,142E-05	0,00040149	0,0006946	0,0002879	0,0002664	0,0002272	0,0008705	0,0010962
Cromo	0,05	mg/L	0,0023891	0,0030242	0,0021775	0,0023292	0,0029552	0,0021499	0,0023736	0,0017612	0,0017195	0,0022259
Ferro	0,3	mg/L	0,0704	0,0457545	0,0589544	0,0498609	0,3827394	0,7618005	2,0053899	0,2730757	2,0128164	1,3507349
Manganês	0,1	mg/L	0,004087	0,0033942	0,0054134	0,00482636	0,0207442	0,0289116	0,0270096	0,0040145	0,0898168	0,0268222
Níquel	0,07	mg/L	0,0003795	0,0005072	0,0004566	0,00054448	0,001167	0,0002696	0,0003655	0,0002208	0,0002847	0,0003987
Prata	0,01	mg/L	1,47E-07	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Selênio	0,04	mg/L	0,0002364	0,0002277	0,0003034	-	-	-	-	-	-	-
Urânio	0,03	mg/L	2,433E-06	1,387E-05	5,074E-06	1,8177E-05	6,74E-06	-	1,098E-05	3,725E-06	3,602E-06	1,739E-05
Vanádio	0,1	mg/L	0,0005212	0,0001598	0,000259	9,3843E-05	0,0002884	1,191E-05	0,0001562	3,573E-05	0,0001116	0,000416
Zinco	5	mg/L	0,0010051	0,0012582	0,0021682	0,00732613	0,0060123	0,0104498	0,0067601	0,0086136	0,0300771	0,0117355

*(-): Limites de quantificação (LQ) maior que os padrões de qualidade (Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021 e Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005)

Parâmetros	Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021/Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005/Resolução CONAMA no 396, de 3 de abril de 2008.	unidade	ACP 31	HRR 33	MRC 34	MCM 35	FCC 36	FCZ 37	FCD 38	FCA 39	CBJ 40	CCI 41
Alumínio	0,2	mg/L	0,2643528	0,0204792	0,0315485	0,0231619	0,0617184	0,0200914	0,0651706	0,0224411	0,0156421	0,0113665
Antimônio	0,006	mg/L	0,0027197	0,0027284	0,0032614	0,00253818	0,0024252	0,0026487	0,0026136	0,0023809	0,0027975	0,0027973
Arsênio	0,01	mg/L	9,616E-05	-	-	0,00028108	0,0001134	-	4,821E-05	5,027E-05	8,897E-05	5,299E-05
Bário	0,7	mg/L	0,0216217	0,0035726	0,0029307	0,0054814	0,0191551	0,0174614	0,0298793	0,0259036	0,0221544	0,0446256
Berílio	0,04	mg/L	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04
Cádmio	0,001	mg/L	-	8,721E-06	1,885E-05	-	-	-	-	1,304E-05	-	-
Chumbo	0,01	mg/L	9,022E-05	6,758E-05	-	-	-	-	-	-	-	-
Cobalto	0,05	mg/L	0,00397	0,0036356	0,0046242	0,0040391	0,0039442	0,0034655	0,0033417	0,0029881	0,0036102	0,0033065
Cobre	0,009	mg/L	0,0008353	0,0032182	0,0001878	0,00022752	7,875E-05	0,0001552	0,000264	0,0005187	0,0001042	0,0008998
Cromo	0,05	mg/L	0,002468	0,0020272	0,0026894	0,00239757	0,0023122	0,002436	0,0026521	0,0020523	0,0019027	0,0024588
Ferro	0,3	mg/L	0,404249	0,0704	0,0094498	0,29661395	0,4205451	0,1168152	0,1626666	0,3514929	1,2330442	0,0426007
Manganês	0,1	mg/L	0,0047232	0,0089896	0,0163097	0,01985761	0,0228	0,0025023	0,0071509	0,0135514	0,0324419	0,0031712
Níquel	0,07	mg/L	0,0004429	0,0005928	0,0006327	0,00040729	0,0002141	0,0004028	0,0004464	0,000328	0,0006001	0,0014068
Prata	0,01	mg/L	-	-	-	-	-	2,997E-05	-	-	-	-
Selênio	0,04	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Urânio	0,03	mg/L	1,778E-05	1,476E-05	1,005E-05	8,1709E-06	2,615E-06	4,211E-06	5,992E-06	4,067E-06	-	-
Vanádio	0,1	mg/L	0,0001557	9,60E-03	9,60E-03	4,8491E-05	0,0001459	0,0001006	0,0004282	0,0001774	2,225E-05	8,582E-05
Zinco	5	mg/L	0,0040099	0,0084447	0,0317553	0,00901845	0,0041637	0,0092546	0,0034836	0,0070075	0,005929	0,0075968

*(-): Limites de quantificação (LQ) maior que os padrões de qualidade (Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021 e Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005).

Parâmetros	Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021/Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005/Resolução CONAMA no 396, de 3 de abril de 2008.	unidade	CBT 42	CCM 43	CCB 44	SRD 45	SRD 46	BR 47	CC 48	RC 49	CB 50	CB 51
Alumínio	0,2	mg/L	0,0138619	0,0115744	0,0187774	0,01786094	0,0152389	0,0143349	0,0232185	0,0137497	0,0312231	0,0229811
Antimônio	0,006	mg/L	0,0040132	0,0024108	0,002479	0,00294789	0,0028649	0,0030043	0,0027927	0,0027272	0,0028162	0,0025198
Arsênio	0,01	mg/L	4,371E-05	0,0001123	0,0002115	-	-	0,0001733	5,67E-05	6,834E-05	7,697E-05	4,839E-05
Bário	0,7	mg/L	0,0289743	0,0043914	0,0094445	0,00181351	0,0018061	0,0101216	0,0373613	0,0430191	0,0042094	0,0048454
Berílio	0,04	mg/L	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	3,204E-05	2,97E-04	2,97E-04
Cádmio	0,001	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	1,064E-05	-	-
Chumbo	0,01	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cobalto	0,05	mg/L	0,0060151	8,686E-06	0,0028383	0,00329349	0,0036296	0,0037677	0,0032892	0,0026416	0,0038699	0,0031031
Cobre	0,009	mg/L	0,0002133	0,0001156	0,0003178	0,00178987	0,0027063	0,0002598	0,0005443	0,0003429	0,0002258	0,0003412
Cromo	0,05	mg/L	0,0024943	-	0,0017365	0,00187893	0,0020659	0,0019871	0,0018061	0,0014609	0,0022902	0,001797
Ferro	0,3	mg/L	0,2230184	0,5451766	0,4786534	0,0704	0,0704	0,5247413	0,0609708	0,0442429	0,0988827	0,0244185
Manganês	0,1	mg/L	0,1348563	0,0228	0,0091362	0,00448695	0,0034317	0,047847	0,0187526	0,0054158	0,002733	0,0228
Níquel	0,07	mg/L	0,0165651	8,905E-05	0,0006975	0,00038472	0,0003969	0,0007493	0,0004163	0,000369	0,0004563	0,0004665
Prata	0,01	mg/L	-	-	-	0,0003973	6,065E-05	-	-	-	-	-
Selênio	0,04	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Urânio	0,03	mg/L	-	-	4,1E-06	-	-	4,711E-06	0,0001559	8,969E-05	6,399E-06	2,233E-05
Vanádio	0,1	mg/L	9,60E-03	4,13E-05	6,935E-05	9,60E-03	9,60E-03	9,60E-03	9,60E-03	9,60E-03	9,60E-03	3,016E-05
Zinco	5	mg/L	0,0060497	3,11E-03	0,0021666	0,02433416	0,030889	0,0069646	0,0083547	0,0048073	0,0023837	0,0024147

*(-): Limites de quantificação (LQ) maior que os padrões de qualidade (Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021 e Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005).

Parâmetros	Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021/Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005/Resolução CONAMA no 396, de 3 de abril de 2008.	unidade	CPV 52	CPV 53	CBO 54	CN 55	CBB 56	CMA 57	CUP 58	CSC 59
Alumínio	0,2	mg/L	0,0175458	0,0171866	0,0271449	0,01925669	0,0219164	0,0215577	0,0161501	0,0612178
Antimônio	0,006	mg/L	0,0026349	0,0027188	0,0027551	0,00271153	0,0028374	0,0025862	0,0026207	0,0022136
Arsênio	0,01	mg/L	0,0002133	0,000207	6,437E-05	0,00010441	0,0001472	9,729E-05	-	4,754E-05
Bário	0,7	mg/L	0,0152018	0,0146952	0,0113538	0,00954037	0,008248	0,0295849	0,0124153	0,0154801
Berílio	0,04	mg/L	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04	2,97E-04
Cádmio	0,001	mg/L	-	-	4,527E-06	-	-	-	-	-
Chumbo	0,01	mg/L	-	0,000267	-	-	-	-	-	-
Cobalto	0,05	mg/L	0,0038179	0,0037329	0,0040208	0,00322574	0,0039776	0,0036958	0,0028343	0,0037529
Cobre	0,009	mg/L	0,0005206	0,0023647	0,0002736	0,00030198	0,0003207	0,0002883	7,003E-05	0,0003343
Cromo	0,05	mg/L	0,0029932	0,0031378	0,005379	0,00260603	0,0024421	0,0028521	0,001731	0,002266
Ferro	0,3	mg/L	0,1181484	0,1142236	0,0154778	0,14963773	0,1258206	0,0406515	0,0250101	0,0425496
Manganês	0,1	mg/L	0,0270177	0,0044599	0,0228	0,00674976	0,0246985	0,0040947	0,0045457	0,0228
Níquel	0,07	mg/L	0,0017917	0,0011309	0,0026199	0,00167772	0,0007651	0,0004566	0,0002318	0,0003078
Prata	0,01	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	-
Selênio	0,04	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	-
Urânio	0,03	mg/L	5,055E-06	3,278E-06	2,349E-06	6,1173E-06	-	2,283E-06	-	8,371E-06
Vanádio	0,1	mg/L	0,0001347	0,0001534	0,0002124	6,1494E-05	9,60E-03	0,001002	9,60E-03	0,0002047
Zinco	5	mg/L	0,006994	0,003788	0,0029989	0,00277011	0,0051775	0,014187	3,11E-03	0,0054471

*(-): Limites de quantificação (LQ) maiores que os padrões de qualidade (Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021 e Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005)

Parâmetros	Resolução CONAMA no 396, de 3 de abril de 2008.	unidade	PJS18	PMM19	PB20	PBL21
Alumínio	0,2	mg/L	0,0258223	5,45E-03	0,0211859	0,01324329
Antimônio	0,005	mg/L	0,002471	0,0023876	0,0018475	0,00751938
Arsênio	0,01	mg/L	1,8E-05	0,0001531	0,0005176	0,00225014
Bário	0,7	mg/L	0,007767	0,002716	0,0164708	0,07495723
Berílio	0,004	mg/L	5,188E-05	8,713E-06	6,129E-06	6,2234E-05
Cádmio	0,005	mg/L	0,0003973	0,0002606	0,0001208	8,2767E-05
Chumbo	0,01	mg/L	2,876E-05	0,0001168	-	0,00018932
Cobalto	0,05	mg/L	0,0020092	0,0011149	0,0015754	0,00147202
Cobre	2	mg/L	0,0010279	0,0022598	-	0,00053845
Cromo	0,05	mg/L	0,0019708	0,0021936	0,0025977	0,00177413
Ferro	0,3	mg/L	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704
Manganês	0,1	mg/L	0,0442372	0,0033549	0,0228	0,00246875
Níquel	0,07	mg/L	0,0013029	0,0003801	0,0003332	0,00042173
Prata	0,1	mg/L	5,657E-06	6,655E-07	-	-
Selênio	0,01	mg/L	0,0002379	0,0006069	0,0003277	0,00044378
Urânio	0,03	mg/L	8,617E-06	0,0002183	9,567E-05	0,00016048
Vanádio	0,05	mg/L	3,223E-05	0,0002983	0,001739	2,971E-05
Zinco	5	mg/L	0,006103	0,0041877	0,0022172	0,00145795

*(-): Limites de quantificação (LQ) maiores que os padrões de qualidade (Resolução CONAMA n 396, de 3 de abril de 2008).

APÊNDICE III – Estatística geral dos parâmetros de campo.

ESTATÍSTICA								
Parâmetros	25%	50%	75%	MÁXIMA	MÍNIMA	MEDIANA	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
COND (μS/cm)	8,260	19,270	35,080	157,400	3,830	19,580	29,236	32,707
Resistividade (μΩ)	23,515	43,295	101,050	263,500	15,280	49,360	70,551	56,296
pH	6,070	6,790	7,260	8,010	4,560	6,800	6,664	0,787
TDS (ppm)	6,230	12,710	23,470	397,000	2,530	12,900	26,014	54,597
Temperatura (°C)	21,100	22,000	23,600	31,100	19,300	22,000	22,613	2,304

APÊNDICE IV – Estatística geral dos resultados das análises laboratoriais.

Parâmetros	Portaria 888 GM/MS de 4 de maio de 2021/Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005. (VMP)	média	desvio padrão	min	25%	50%	75%	max
Alumínio	0,2	0,036504	0,047423	0,011367	0,017546	0,02228	0,031223	0,264353
Antimônio	0,006	0,002607	0,000827	0,001186	0,002281	0,002617	0,002797	0,007519
Arsênio	0,01	0,000214	0,000443	0,00001	0,000056	0,000109	0,00019	0,002455
Bário	0,7	0,013024	0,01355	0,001806	0,00365	0,008164	0,017214	0,074957
Berílio	0,04	0,000015	0,000017	0,000002	0,000004	0,000006	0,000023	0,000062
Cádmio	0,001	0,000063	0,000107	0,000005	0,000008	0,000013	0,00007	0,000397
Chumbo	0,01	0,000054	0,000114	-	-	0,000011	0,000062	0,000548
Cobalto	0,05	0,00278	0,00116	0,000009	0,001606	0,003091	0,003748	0,006015
Cobre	0,009	0,000468	0,000693	-	0,000073	0,000244	0,00052	0,003218
Cromo	0,05	-	4,419E-05	1,071E-06	4,211E-06	6,117E-06	1,387E-05	0,0002183
Ferro	0,3	0,286674	0,465981	0,00945	0,042575	0,098883	0,324053	2,012816
Manganês	0,1	0,016766	0,023654	0,00232	0,004093	0,007474	0,020079	0,134856
Níquel	0,07	0,000849	0,002145	0,000089	0,000366	0,00044	0,000616	0,016565
Selênio	0,04	0,000297	0,000171	-	0,000202	0,000262	0,000359	0,000706
Urânio	0,03	0,000022	0,000045	0,000001	0,000004	0,000006	0,000014	0,000218
Vanádio	0,1	0,000174	0,00029	0,000012	0,000042	0,000086	0,000158	0,001739
Zinco	5	0,006918	0,00715	0,000314	0,002407	0,005026	0,008366	0,031755

APÊNDICE V – Gráficos boxplots dos metais analisados.

