

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia

Marcos Geraldo Barbosa Pimenta

**ANÁLISE QUÍMICO AMBIENTAL DA BACIA DO RIO SANTO ANTÔNIO-MG
POR MEIO DA AVALIAÇÃO DE AMOSTRAS DE ÁGUA E SEDIMENTOS**

Nº230

Belo Horizonte
DATA: 14/12/2021

Marcos Geraldo Barbosa Pimenta

**ANÁLISE QUÍMICO AMBIENTAL DA BACIA DO RIO SANTO ANTÔNIO-MG
POR MEIO DA AVALIAÇÃO DE AMOSTRAS DE ÁGUA E SEDIMENTOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de Concentração: Geologia Econômica e Aplicada

Orientador: Prof. Dr. Adolf Heinrich Horn

Coorientador: Prof. Dr. Aníbal da
Fonseca Santiago

Belo Horizonte
2021

P644a
2021

Pimenta, Marcos Geraldo Barbosa.

Análise químico ambiental da Bacia do Rio Santo Antônio-MG por meio da avaliação de amostras de água e sedimentos [manuscrito] / Marcos Geraldo Barbosa Pimenta. – 2021.

150 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Adolf Heinrich Horn.

Coorientador: Aníbal da Fonseca Santiago.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2021.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Bibliografia: f. 128-138.

Inclui apêndices.

1. Santo Antônio, Rio, Bacia (MG) – Contaminação – Teses. 2. Água – Teses. 3. Rochas – Teses. 4. Sedimentos (Geologia) - Teses. I. Horn, Adolf Heinrich. II. Santiago, Aníbal da Fonseca. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 55(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE QUÍMICO AMBIENTAL DA SUB-BACIA DO RIO SANTO ANTÔNIO - MG POR MEIO DA AVALIAÇÃO DE AMOSTRAS DE ÁGUA E SEDIMENTOS.

MARCOS GERALDO BARBOSA PIMENTA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA, pelo Programa de Pós-graduação em Geologia da UFMG.

Aprovada em 14 de dezembro de 2021, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Adolf Heinrich Horn - Orientador
UFMG

Prof. Paulo Henrique Ferreira Galvão
UFMG

Profa. Deyse Almeida dos Reis
Instituto Guaicuy

Belo Horizonte, 14 de dezembro de 2021.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida e por todas as graças que eu pude alcançar durante a minha caminhada.

Agradeço à minha mãe, Márcia, ao meu pai, Sergio, e à minha irmã, Natália, por serem o meu porto seguro e sempre acreditarem nos meus sonhos.

À Júlia pelo carinho, apoio e paciência durante a realização do trabalho.

Agradeço à todos meus familiares e amigos pelo incentivo contínuo. Em especial, agradeço à Tia Amália e ao José Belas pelo suporte durante os estudos em Belo Horizonte.

Ao meu orientador, Professor A. H. Horn, pelo empenho, dedicação e paciência, sendo um exemplo na profissão de ensinar, sempre disposto a transmitir seus conhecimentos.

Ao Professor Hubert M. P. Roeser, pela generosidade e atenção. Sempre o terei como uma referência de profissional e ser humano.

Ao meu coorientador, Professor Aníbal da F. Santiago, pela atenção e por toda a contribuição prestada durante a execução deste projeto.

À Júlia, Maria e Ana Paula por todo o auxílio e companheirismo durante o mestrado.

Aos companheiros dos laboratórios de Saneamento Ambiental PROAMB/UFOP, Ferrovias e Asfalto / Departamento de Engenharia Civil - EM/UFOP, Núcleo de Geoquímica Ambiental (NGqA) do CPMTC/IGC/UFMG, Geoquímica Ambiental do DEGEO/EM/UFOP e de Raios X/DEMIN/UFOP pelo suporte dado na realização das atividades do projeto.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais e a Pró-reitoria de Pós-graduação da UFMG pelo apoio e auxílio prestado.

RESUMO

A bacia do rio Santo Antônio, situada na porção leste do estado de Minas Gerais, é a maior e mais preservada dentre os afluentes da Bacia Hidrográfica do rio Doce. No entanto, a bacia tem sido cada vez mais impactada pela ação antrópica, devido ao aumento populacional e às crescentes atividades de mineração. Este mestrado buscou entender qual é a influência das ações geogênica e antropogênica para a composição química da água da bacia do rio Santo Antônio. Para isso, realizou-se uma campanha de amostragem em setembro de 2019 (período de estiagem) e coletou-se amostras de água e sedimentos em 16 pontos previamente selecionados com o intuito de se levantar parâmetros para esta análise ambiental. Em campo, foram realizadas análises físicas e químicas da água, e em laboratório, realizou-se análises químicas da água e dos sedimentos por ICP-OES, sendo que os resultados foram submetidos a tratamentos estatísticos. Ademais, o estudo dos sedimentos ainda envolveu análises granulométricas e mineralógicas. Sobre os parâmetros físicos e químicos da água, observou-se que o parâmetro “oxigênio dissolvido na água” estava fora dos padrões determinados para a classe 2 da norma CONAMA 357/2005 na cabeceira do rio Santo Antônio, em Conceição do Mato Dentro. Sobre os parâmetros químicos obtidos da água em laboratório, verificou-se que há alta concentração de Fe em pontos específicos do alto e médio Santo Antônio, situados próximos a áreas de mineração, bem como há alta concentração dos elementos Fe e Mn na confluência do rio Santo Antônio com o rio Doce, em virtude da influência do rio principal sobre o seu afluente. As análises granulométricas sugerem que os sedimentos mais grosseiros, predominantes na bacia, sejam um empecilho para a adsorção dos metais potencialmente tóxicos e estes atuem como um importante fator de degradação da matéria orgânica. A análise mineralógica revelou que o substrato geológico da bacia reflete a mineralogia do arcabouço geológico regional. A composição química dos sedimentos indica que há contaminação de As (confluência do rio Santo Antônio), Cd (córrego Jirau, médio rio Santo Antônio e rio Guanhões) e Cr (rio Guanhões e confluência do rio Santo Antônio) na bacia, a partir da comparação com os dados da regulamentação CONAMA 454/2012. O tratamento estatístico permitiu correlacionar os dados químicos da água e dos sedimentos com a litologia local. Dessa forma, verificou-se a correlação positiva entre os seguintes grupos de elementos: Ca-Mg-K-Na, Fe-Mn-Co, Cr-Ni, Cu-Zn e Pb-Ti. O índice de geoacumulação mostrou que vários pontos das drenagens da bacia apresentam boas condições para abrigar vida e abastecer a população com água de boa qualidade.

Palavras-chave: Rio Santo Antônio, Água, Solo, Sedimentos, Rochas, Contaminação.

ABSTRACT

The Santo Antônio river basin, located in the eastern portion of the state of Minas Gerais, is the largest and most preserved among the tributaries of the Doce river basin. However, this has been increasingly impacted by human action, due to population growth and increasing mining activities. This master sought to understand the influence of geogenic and anthropogenic actions on the chemical composition of water in the Santo Antônio river basin. For this, the sampling campaign was carried out in September 2019 (dry period) and water and sediment samples were collected at 16 previously selected points to raise parameters for this environmental analysis. In the field, physical and chemical analyses of water were carried out, and in the laboratory, chemical information of water and sediments were carried out by ICP-OES, and the results were submitted to statistical treatments. Furthermore, the study of sediments still involved granulometric and mineralogical analyses. Regarding the physical and chemical parameters of water, it was observed that the parameter "dissolved oxygen in water" is outside the standards determined for class 2 of the CONAMA 357/2005 standard at the headwaters of the Santo Antônio river, in Conceição do Mato Dentro. Regarding the chemical parameters obtained in laboratory from the water, it was found that there is a high concentration of Fe in specific points of the upper and middle Santo Antônio, close to mining areas, as well as a high concentration of Fe and Mn elements at the confluence between Santo Antônio and Doce river, due to the influence of the main river on its tributary. The granulometric analyzes suggest that the coarsest sediments, predominant in the basin, are an obstacle to the adsorption of potentially toxic metals and these act as an important factor in the degradation of organic matter. The mineralogical analysis revealed that the geological substrate of the basin reflects the mineralogy of the regional geological framework. The chemical composition of the sediments indicates that there is contamination of As (confluence of the Santo Antônio river), Cd (Jirau stream, middle Santo Antônio river and Guanhões river), and Cr (Guanhões river and Santo Antônio river confluence) in the basin, a from the comparison with data from CONAMA regulation 454/2012. The statistical treatment allowed to correlate the chemical data of water and sediments with the local lithology. Thus, there was a positive correlation between the following groups of elements: Ca-Mg-K-Na, Fe-Mn-Co, Cr-Ni, Cu-Zn and Pb-Ti. The geoaccumulation index showed that several points in the basin drainages have good conditions to shelter life and supply the population with good quality water.

Keywords: Santo Antônio River, Geochemistry, Water, Soil, Sediments, Rocks, Contamination.

INTRODUÇÃO	18
1.1. APRESENTAÇÃO DO TEMA.....	18
1.2. JUSTIFICATIVA.....	21
1.3. OBJETIVOS.....	21
1.4. TRABALHOS ANTERIORES DESENVOLVIDOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTO ANTÔNIO	21
1.5. ENQUADRAMENTO DA BACIA DO RIO SANTO ANTÔNIO.....	23
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1. REFERENCIAL TEÓRICO.....	24
2.1.1 Classificação dos elementos e suas propriedades geoquímicos por Goldschmidt	24
2.1.2. Elementos químicos essenciais e não essenciais.....	25
2.1.3. Metais Potencialmente Tóxicos (MPT - PTM).....	25
2.1.4. Comportamento físico-químico de ambientes aquáticos	26
2.1.4.1. Estados químicos dos elementos em um ambiente aquoso.....	26
2.1.4.2. Processos geoquímicos dos elementos em ambientes aquáticos	26
2.1.4.3. Comportamento químico dos elementos em águas de rio.....	27
2.1.4.4. Avaliação e classificação da poluição em corpos d'água	27
2.1.5. Os sedimentos: conceitos e comportamento em ambientes fluviais	29
2.1.5.1. Avaliação e classificação da poluição nos sedimentos	30
2.1.5.2. Índice de geoacumulação	31
2.1.6. Concentração e distribuição de metais em rochas e solos.....	32
2.1.7. Características de alguns elementos químicos em ambientes naturais	33
2.2. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	37
2.2.1. Localização e acessos	37
2.2.2. Clima.....	38
2.2.3. Recursos hídricos e uso da água	40
2.2.4. Relevo	43
2.2.5. Solos.....	44
2.2.6. Suscetibilidade a erosão.....	46
2.2.7. Vegetação.....	47
2.2.8. Uso do solo	48
2.2.9. População e sua distribuição.....	49

2.2.10. Principais atividades da população da bacia do rio Santo Antônio.....	52
2.2.11. Ações antrópicas ocorridas na bacia do rio Santo Antônio.....	54
2.3 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	56
METODOLOGIA	60
3.1. FASE PRÉ-CAMPO / GABINETE	60
3.2. TRABALHO DE CAMPO	61
3.3. FASE PÓS CAMPO/LABORATÓRIO	63
3.3.1. Preparação.....	63
3.4. FASE PÓS CAMPO/GABINETE	65
3.4.1. Análise estatística aplicada a estudos geoquímico-ambientais	65
3.4.2. Tratamento Estatístico	65
3.4.2.1. Tratamento estatístico univariado.....	65
3.2.4.2. Tratamento estatístico bivariado	66
RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1. DADOS FÍSICOS E QUÍMICOS RELACIONADOS AS AMOSTRAS DE ÁGUA	68
4.1.1. Parâmetros físicos e químicos “ <i>in loco</i> ”	68
4.1.1.1. pH	68
4.1.1.2. ORP e Eh	69
4.1.1.3. Temperatura.....	69
4.1.1.4. Saturação de oxigênio / Oxigênio dissolvido.....	69
4.1.2. Composição química das amostras de água.....	70
4.1.2.1. Elementos maiores e traços na água	70
4.1.3. Avaliação estatística dos dados das amostras de água.....	75
4.1.3.1. Resultado do tratamento com a estatística univariada	75
4.1.3.2. Resultado do tratamento com a estatística bivariada	76
4.1.3.2.1 Avaliação da correlação entre os elementos analisados na água	77
4.2. AMOSTRAS DE SEDIMENTOS.....	79
4.2.1 Análise granulométrica	79
4.2.2. Análise mineralógica	81
4.2.3. Análises químicas das amostras de sedimentos	82
4.2.3.1 Elementos maiores nas amostras dos sedimentos.....	82
4.2.3.2 Elementos traços nos sedimentos.....	88
4.2.4. Relação entre as concentrações dos elementos nas amostras de sedimentos	95
4.2.4.1. Avaliação dos resultados do tratamento com a estatística univariada	96

4.2.4.2. Análise estatística bivariada com a utilização da correlação de Pearson.....	96
4.2.4.2.1. Correlação entre os elementos nas amostras de sedimentos	99
4.2.5. Índice de Geoacumulação	102
4.2.6. COMPARAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS E A LEGISLAÇÃO AMBIENTAL	104
4.2.6.1 COMPARAÇÃO DOS ELEMENTOS ANALISADOS NA ÁGUA COM OS LIMITES ESTABELECIDOS PELA CONAMA 357/2005.....	104
4.2.6.2. COMPARAÇÃO DOS ELEMENTOS ANALISADOS NOS SEDIMENTOS COM OS LIMITES ESTABELECIDOS PELA CONAMA 454/2012	105
ASSESSMENT ON BOTTON SEDIMENTS IN THE SANTO ANTÔNIO RIVER BASIN, TRIBUTARY OF THE DOCE RIVER-MG	107
CONCLUSÕES	126
REFERÊNCIAS	128
APÊNDICES.....	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa com indicação das sub-bacias da Bacia Hidrográfica do rio Doce.....	20
Figura 2: Diagrama da disponibilidade de alguns elementos em relação ao pH em um sistema aquoso.....	26
Figura 3: Localização e vias de acesso à área de estudo.....	38
Figura 4: Temperaturas mínimas e máximas referentes ao ano de 2019 e pluviosidade média das cidades mineiras de Conceição do Mato Dentro-MG e Naque-MG.....	39
Figura 5: Mapa de drenagens da bacia do rio Santo Antônio	40
Figura 6: Mapa de relevo da bacia do rio Santo Antônio.....	43
Figura 7: Mapa de solos da bacia do rio Santo Antônio.	44
Figura 8: Mapa de suscetibilidade erosiva da bacia do rio Santo Antônio..	47
Figura 9: Mapa de vegetação da Bacia Hidrográfica do rio Santo Antônio representado pelos remanescentes florestais dos biomas de mata atlântica e cerrado.	48
Figura 10: Mapa de uso do solo na Bacia Hidrográfica do rio Santo Antônio.	49
Figura 11: Municípios limítrofes à bacia do rio Santo Antônio.....	50
Figura 12: Registros fotográficos do resultado de ações que modificaram a Bacia Hidrográfica do rio Santo Antônio..	55
Figura 13: Unidades litológicas que afloram na área da bacia do rio Santo Antônio.....	56
Figura 14: Fluxograma da metodologia utilizada neste trabalho da avaliação química-ambiental executada na bacia do rio Santo Antônio.....	61
Figura 15: Localização dos pontos de amostragem na bacia do rio Santo Antônio.....	62
Figura 16: Exemplo de diagrama boxplot.....	66
Figura 17: Avaliação numérica da correlação entre duas variáveis.	66
Figura 18: Ponto de amostragem MG03, situado na cidade de Santo Antônio do Rio Abaixo-MG.....	68
Figura 19: Ponto de amostragem MG03, situado na cidade de Conceição do Mato Dentro-MG.	70
Figura 20: Mapa e gráficos que apresentam a evolução das concentrações em (mg/L) dos elementos presentes na água ao longo da bacia do rio Santo Antônio.....	71
Figura 21: Ponto de amostragem MG15, no rio Santo Antônio próximo à confluência com o rio Doce, situado na cidade de Naque-MG.....	72
Figura 22: Diagrama Eh x pH mostrando a interação do elemento Al, Mg, Ca, Fe e Mn diante das variações físicas em um sistema aquoso.	73

Figura 23: Diagrama boxplot referente aos dados logtransformados das análises químicas dos elementos Ca, Mg, Fe e Mn.....	76
Figura 24: Diagramas que mostram a concentração (mg/L) logtransformada dos elementos Mn e Fe (à esquerda) e Ca e Mg (à direita) nas amostras de água da bacia.	77
Figura 25: Representação gráfica da análise granulométrica dos sedimentos na sub-bacia do rio Santo Antônio durante o seu período de estiagem.	80
Figura 26: Composição mineralógica das amostras da bacia do rio Santo Antônio, obtida por difração de raios x.....	81
Figura 27: Mapa e gráficos das concentrações em (mg/kg) dos elementos maiores Al, Ca, Fe e Mg encontrados nos sedimentos na bacia do rio Santo Antônio.	83
Figura 28: Mapa e gráficos das concentrações em (mg/kg) dos elementos maiores Na, K, P e Ti encontrados nos sedimentos na bacia do rio Santo Antônio.	84
Figura 29: Diagrama de Pourboix com as condições da água da bacia. Os diagramas Eh x pH refletem a especiação de K, Na, P e Ti em um sistema aquoso.....	85
Figura 30: Mapa das concentrações em (mg/kg) dos elementos traços As, Cd, Cr, Cu e Co encontrados nos sedimentos na bacia do rio Santo Antônio	89
Figura 31: Mapa das concentrações em (mg/kg) dos elementos traços Mn, Ni, Pb e Zn encontrados nos sedimentos na bacia do rio Santo Antônio.	90
Figura 32: Diagramas Eh x pH mostrando a interação dos elementos As, Cd, Co e Cr diante das variações físicas em um sistema aquoso.	91
Figura 33: Diagrama Eh x pH mostrando a interação do elemento Cu, Ni, Pb e Zn diante das variações físicas em um sistema aquoso.....	92
Figura 34: Diagramas tipo “boxplot” referente aos dados logtransformados das análises químicas dos elementos metálicos maiores Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P e Ti.....	97
Figura 35: Diagramas boxplot referente aos dados logtransformados das análises químicas dos elementos metálicos traços Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb e Zn.....	98
Figura 36: Gráficos logtransformados dos elementos nos sedimentos (mg/kg): à esquerda potássio e magnésio; ao centro cobalto, ferro e manganês; e à direita cromo e níquel.....	100
Figura 37: Gráficos logtransformados dos elementos nos sedimentos: à esquerda chumbo e titânio (mg/kg); à direita cobre e zinco (mg/kg).....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distribuição dos elementos químicos segundo a classificação de GOLDSCHMIDT (1937) com acréscimo dos biófilos.....	24
Tabela 2: Valores de concentração máxima permitidas para os elementos As, Al, Ba, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb e Zn em água (mg/L), de acordo com a CONAMA 357/2005.	29
Tabela 3: Concentrações em cada nível da resolução CONAMA para os elementos As, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg, Ni e Zn.	31
Tabela 4: Classificação dos índices de Geoacumulação	32
Tabela 5: Dados sobre o saneamento básico dos municípios nos limites da bacia do rio Santo Antônio.	42
Tabela 6: População dos municípios da sub-bacia do rio Santo Antônio em números.....	51
Tabela 7: Sequência da evolução industrial na área da bacia do rio Santo Antônio	53
Tabela 8: Composição litológica da área da bacia do rio Santo Antônio	57
Tabela 9: Composição química média das principais litologias da área da bacia do rio Santo Antônio.....	59
Tabela 10: Correlação entre a escala WENTWORTH (1922) e as aberturas das peneiras da Série de Tyler, em Mesh e o diâmetro em mm ²	64
Tabela 11: Representação do número de análises, as porcentagens das amostras acima do LD e o limite de detecção do aparelho (ICP-OES).....	75
Tabela 12: Variáveis e seus valores referentes ao coeficiente de correlação de Pearson para os dados químicos da água no período de estiagem.....	76
Tabela 13: Variáveis e seus valores referentes ao coeficiente de correlação de Pearson para os dados químicos logtransformados da água no período de estiagem da bacia.	77
Tabela 14: Composição química do itabirito, hematita e filito, encontrados na Serra da Serpentina.	78
Tabela 15: Análise quanto ao grau de detecção referente às concentrações de metais em amostras de sedimentos (mg/kg) na bacia do rio Santo Antônio	95
Tabela 16: Matriz dos valores do coeficiente de correlação de Pearson para os dados obtidos no período de estiagem da bacia (sem tratamento prévio).	99
Tabela 17: Matriz dos valores do coeficiente de correlação de Pearson dos dados previamente logtransformados	99
Tabela 18: Valores mínimos para cada um dos elementos analisados como referência para a análise de background para cálculo do Índice de Geoacumulação (Igeo).....	103

Tabela 19: Valores médios do índice de Geoacumulação nas principais drenagens da bacia do rio Santo Antônio.	103
Tabela 20: Valores dos limites máximos da classe 2 dos metais Al, Ca, Fe, Mg e Mn de acordo com a regulamentação CONAMA 357/2005.	104
Tabela 21: Níveis de elementos químicos permitidos pela resolução CONAMA 454/2012.	105

APÊNDICES

Apêndice 1: Descrição dos pontos de amostragem.....	139
Apêndice 2: Parâmetros físicos coletados “ <i>in loco</i> ”.....	140
Apêndice 3: Resultados das análises de água por ICP-OES.....	141
Apêndice 4: Distribuição granulométrica das amostras dos sedimentos da bacia do rio Santo Antônio.....	143
Apêndice 5: Difratoogramas das amostras de sedimentos de fundo da bacia do rio Santo Antônio.....	144
Apêndice 6: Resultados das análises das amostras de sedimentos por ICP-OES.	149

ESTRUTURA DOS CAPÍTULOS DA DISSERTAÇÃO

No **primeiro capítulo** deste trabalho apresenta-se um panorama sobre a água e sua distribuição no território brasileiro. Em seguida, aborda-se aspectos gerais sobre a bacia do rio Santo Antônio e a bacia do rio Doce. Na sequência, são apresentados ao leitor os objetivos deste estudo, a justificativa para a abordagem do tema e uma pequena introdução aos estudos locais já realizados na bacia, tema desta pesquisa.

O **Segundo capítulo** deste trabalho é dividido em três etapas principais:

Na primeira parte do referido capítulo consta uma revisão bibliográfica a respeito da classificação e afinidade dos elementos químicos, bem como a sua toxicidade para o ambiente e os seres vivos. Na sequência, são apresentados conceitos sobre os elementos químicos, o comportamento destes no meio ambiente, sua disponibilidade e interação entre as esferas. Por fim, cita-se os conceitos de solubilidade, mobilidade, disponibilidade que serão discutidos com maior profundidade nos capítulos posteriores.

Na segunda parte do segundo capítulo apresenta-se uma breve descrição com relação à área de estudo por meio de sua caracterização ambiental. Neste espaço são abordados aspectos relevantes para a compreensão ambiental da área, como: clima, precipitação, recursos hídricos, relevo, solos, suscetibilidade erosiva, vegetação, uso do solo, população, atividades praticadas na área de estudo e ações antrópicas que geram impactos ambientais à bacia.

Na terceira e última parte do segundo capítulo discorre-se à respeito do contexto geológico da área da bacia do rio Santo Antônio, sendo apresentado ao leitor as características composicionais das litologias encontradas no entorno das drenagens.

No **terceiro capítulo** é descrita a metodologia aplicada para realização deste estudo, sendo que esta consiste em detalhar a evolução das atividades de gabinete, trabalho de campo e análises laboratoriais, materiais e equipamentos utilizados, e locais de realização das atividades envolvidas para a elaboração do projeto.

O **quarto capítulo** apresenta os dados referentes à avaliação dos parâmetros físicos e químicos da água e dos parâmetros químicos dos sedimentos. Os dados obtidos por meio das análises químicas foram submetidos a tratamentos estatísticos, que permitiram a obtenção de uma série de dados que contribuíram para a melhor compreensão sobre a interação dos elementos na bacia e as rochas do entorno.

Os resultados obtidos nestas etapas foram apresentados na forma de figuras, gráficos e tabelas, sendo estas as bases para as discussões apresentadas na sequência.

Ainda no quarto capítulo são apresentadas as discussões dos dados levantados por meio deste estudo, realizadas em consonância com os dados obtidos em estudos pretéritos sobre a litologia da bacia e que permitiram estabelecer uma evolução cronológica sobre aspectos químico-ambientais da área em questão.

No **quinto capítulo** consta o artigo intitulado '*Assessment on botton sediments in the santo antônio river basin, tributary of the doce river-MG*' submetido à avaliação da revista internacional *Journal of Hazardous Materials*. O artigo apresenta um resumo dos dados coletados nesta pesquisa, mostrando a situação química e ambiental com base em amostras de sedimentos das drenagens da bacia do rio Santo Antônio.

No **sexto capítulo** são apresentadas as conclusões finais deste estudo, sendo esta uma síntese do aprendizado e conhecimento obtidos a respeito da bacia do rio Santo Antônio.

O capítulo intitulado **Referências** apresenta todo o acervo bibliográfico utilizado para a construção desta dissertação, sendo que tais referências estão apresentadas de acordo com as diretrizes estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Nos **Apêndices** deste volume estão disponíveis os dados levantados neste estudo em sua totalidade, sendo estes referentes a tabelas, gráficos e figuras apresentados ao decorrer desta dissertação.

LISTA DE ABREVIATURAS

CPMTC - Centro de Pesquisas Professor Manoel Teixeira da Costa

DECIV – Departamento de Engenharia Civil

DEGEO – Departamento de Geologia

DEMIN – Departamento de Engenharia de Minas

DO (1-6) – Comitê das sub-bacias afluentes do rio Doce no estado de Minas Gerais

EM – Escola de Minas

IGC – Instituto de Geociências

PROAMB – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação do tema

A água é um importante e abundante recurso natural do planeta Terra que é indispensável para a evolução da vida e necessário à manutenção do ambiente, bem como para a sobrevivência das espécies. Cerca de 97,5% de toda água disponível no planeta é salgada (salinidade acima de 3,5%), e está concentrada nos mares e oceanos. Dos aproximados 2,5% restantes, uma pequena parte é água doce (salinidade abaixo de 0,5%) superficial, disponível em lagos, rios e águas subterrâneas, sendo que a humanidade utiliza este recurso para atender suas necessidades vitais e demais atividades (CALIJURI & CUNHA, 2013).

Nos tempos atuais, a utilização dos recursos hídricos não tem sido eficiente e sustentável. O que se tem visto por todo o globo é a poluição da água em larga escala, principalmente se tratando das reservas de água potável, o que tem se tornado um problema para a saúde pública.

A água é um recurso necessário para a alavancagem do desenvolvimento social e econômico da população; por isso, os órgãos públicos envolvidos na fiscalização sanitária em corpos d'água devem se atentar e zelar por sua qualidade, utilização e disposição de resíduos antrópicos (CALIJURI & CUNHA, 2013).

O Brasil contém cerca de 12% de toda água doce disponível no planeta; no entanto, grande parte da população não tem acesso adequado a este recurso devido ao ineficiente sistema de gerenciamento e distribuição, aos quais se incluem fatores geográficos (OSTRENSKY *et al.*, 2007).

O território brasileiro está inserido em oito grandes bacias hidrográficas, sendo elas: 1. Amazonas; 2. Tocantins e Araguaia; 3. Atlântico norte e nordeste; 4. São Francisco; 5. Atlântico leste (Agrupamento de bacias a qual se insere a bacia do rio Doce); 6. Paraná; 7. Paraguai; 8. Uruguai e Atlântico Sul - Sudeste.

O Brasil também se dispõe de uma abundante reserva de água subterrânea concentrada em dois aquíferos de grandes dimensões, o Guarani e o Alter do Chão, sendo que estes mananciais são capazes de abastecer a população brasileira por vários anos.

O Estado de Minas Gerais recebe uma quantidade considerável de chuvas e abriga nascentes de rios das principais bacias do Brasil. As principais bacias hidrográficas no estado de Minas Gerais são: 1. Bacia do rio Grande, 2. Bacia do Paranaíba, 3. Bacia do São Francisco,

4. Bacia do rio Pardo, 5. Bacia do Jequitinhonha, 6. Bacia do Mucuri, 7. Bacia do São Mateus, 8. Bacia do Paraíba do Sul e 9. Bacia do rio Doce.

A Bacia Hidrográfica do rio Doce, uma das importantes reservas hídricas do país, abrange uma área de drenagem de cerca de 86.715 km². A região da referida bacia contempla 228 municípios, sendo 200 municípios compreendidos no Estado de Minas Gerais e 28 municípios nos limites com o Estado do Espírito Santo (CBH DOCE, 2019). Atualmente, cerca de 3,5 milhões de pessoas vivem na área da bacia do rio Doce e 48% dessa população está concentrada próximo às sub-bacias do Piranga e Piracicaba, que concentram os maiores PIBs (Produto Interno Bruto) industriais (CBH DOCE, 2019).

A bacia do rio Doce no Estado de Minas Gerais é composta por seis sub-bacias, conforme mostra a Figura 1: 1. Bacia do rio Piranga, 2. Bacia do rio Piracicaba, 3. Bacia do rio Santo Antônio, 4. Bacia do rio Suaçuí Grande, 5. Bacia do rio Caratinga e 6. Bacia do rio Manhuaçu. No Espírito Santo, três sub-bacias compõem a Bacia Hidrográfica do rio Doce, sendo elas: 1. Guandu, 2. Santa Maria do rio Doce e 3. São José.

A maior parte da vegetação da bacia do rio Doce é remanescente do bioma Mata Atlântica, ameaçada por um intenso desmatamento na região, sendo substituída principalmente por áreas destinadas à prática da agricultura e pecuária. Em menor porcentagem, são encontrados remanescentes de vegetação do bioma Cerrado e a transição entre estes dois biomas. (CBH DOCE, 2019).

O rio Doce está recebendo há vários anos um aumento na quantidade de poluentes relacionados às atividades antrópicas, o que causa uma progressiva degradação. O maior impacto ambiental registrado neste rio foi resultante da interferência humana decorrente do rompimento da barragem de rejeitos da mineradora Samarco S/A, que ocorreu no município de Mariana-MG no dia 5 de novembro de 2015. Aproximadamente 60 milhões de metros cúbicos de rejeitos da mineração de ferro se espalharam ao longo da bacia, causando um dano inestimado ao ecossistema local (MILANEZ & LOSEKANN, 2016).

O projeto de recuperação da qualidade das águas do rio Doce não se limita às águas do rio principal da bacia, mas, também, na melhoria da qualidade da água de seus afluentes. E neste contexto, a atenção pela qualidade das águas da Bacia Hidrográfica do rio Santo Antônio é de relevante importância, pois esta bacia é responsável direta pelo abastecimento de água de aproximadamente 180 mil pessoas que vivem na área coberta por suas drenagens e por atuar como um agente de diluição das águas do rio principal.

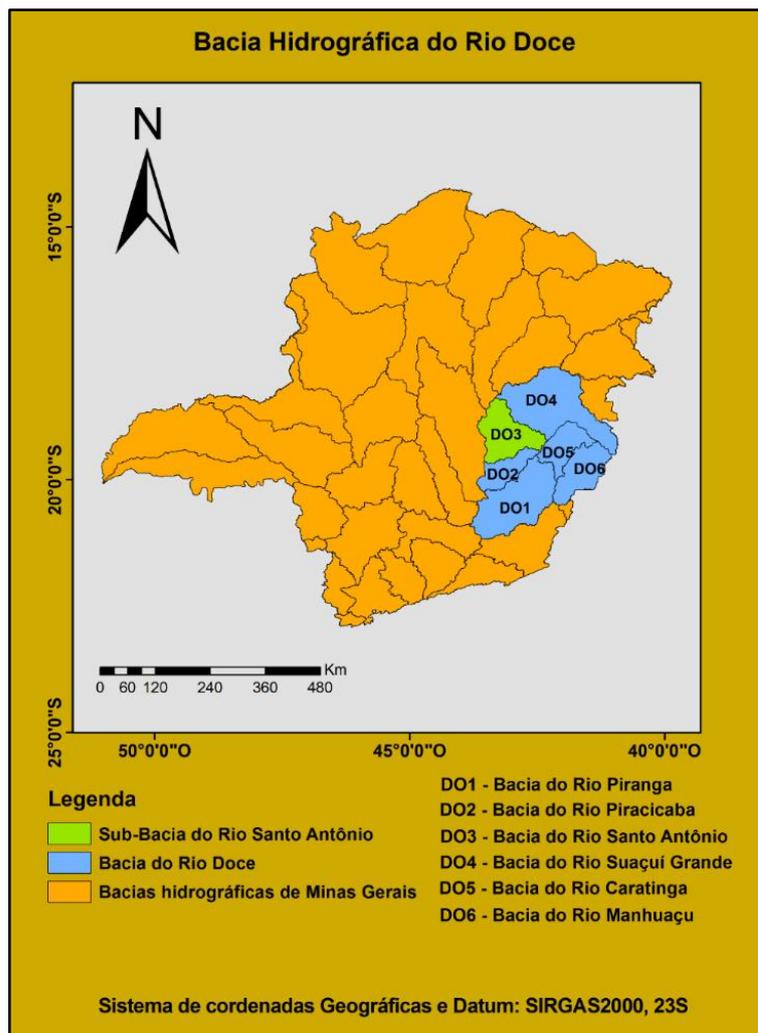


Figura 1: Mapa com indicação das sub-bacias da Bacia Hidrográfica do rio Doce, apresentadas em azul. A Bacia Hidrográfica do rio Santo Antônio (D03) está representada em verde. Fonte: IGAM (2019) modificado.

O aumento populacional, as atividades de mineração e a instalação de hidrelétricas são os principais entraves para se atingir uma melhoria da qualidade da água do rio Santo Antônio. Um dos resultados do impacto da ação antrópica nesta sub-bacia é o desaparecimento de algumas espécies endêmicas da ictiofauna, entre elas o Andirá (*henochilus wheatlandii*), um peixe habituado a viver nas correntezas do rio e que vem gradativamente diminuindo sua população ao longo dos anos.

Em sistemas aquáticos, no caso ambientes fluviais, os sedimentos de fundo atuam como um ambiente de registro da deposição das partículas em um determinado período, sendo este um agente de transporte, liberação e adsorção de metais. Dessa forma, os sedimentos influenciam diretamente sobre a água e a biota, atuando no equilíbrio químico destes ambientes.

A avaliação da composição química dos sedimentos permite realizar quadros comparativos da evolução da dinâmica do ambiente e a realização de projeções sobre as tendências químicas deposicionais em função dos dados apurados.

Os estudos sobre os solos e as rochas também oferecem ferramentas para a obtenção de informações sobre a origem dos metais e sua entrada nos sistemas aquáticos, especialmente na composição química e mineral dos sedimentos e a constituição da água, podendo assim realizar uma discriminação das contribuições naturais ou antrópicas.

1.2. Justificativa

Este trabalho faz parte de uma linha de pesquisa desenvolvida há vários anos pelo Professor Dr. Hubert P. M. Roeser, que visa compreender as características químicas e a dinâmica das sub-bacias que integram a Bacia Hidrográfica do rio Doce para um diagnóstico ambiental e fornecer suporte para seu planejamento ambiental. Os dados e informações neste estudo vão contribuir para este fim e poderão auxiliar ações futuras que visam a recuperação, a remediação e uma posterior manutenção de um ecossistema intensamente degradado. O estudo em questão se justifica devido aos seguintes fatos:

1. Pela importância desta bacia e de seu rio principal para o abastecimento da população local com água potável para consumo, bem como, água industrial para as demais atividades, tais como a indústria e a agricultura.

2. Por contribuir com a preservação e conservação de um dos mais importantes remanescentes biomas aquáticos do rio Doce e do Estado de Minas Gerais a partir dos seus resultados.

1.3. Objetivos

O objetivo geral deste projeto é estudar a situação ambiental da Bacia Hidrográfica do rio Santo Antônio.

Serão coletadas informações sobre a contribuição natural e antrópica para os contaminantes e elementos químicos nos canais pluviais da bacia em questão. Além disso, os dados levantados serão disponibilizados para que se inicie um planejamento ambiental da bacia pautada em contribuir para um gerenciamento eficaz, que vise a utilização dos recursos com mínima influência e a preservação do meio ambiente.

Os dados geológicos, geoquímicos, hidroquímicos, climáticos e estatísticos da bacia serão discutidos e interpretados, com o intuito de se atingir o objetivo geral acima mencionado.

1.4. Trabalhos anteriores desenvolvidos na Bacia Hidrográfica do rio Santo Antônio

Na região da bacia do Santo Antônio foram executadas pesquisas anteriores a este projeto sendo que o maior volume de estudos gerados está relacionado à geologia local, direcionada à caracterização de litologias e estruturas associadas a gênese do Supergrupo Espinhaço, Grupo

Macaúbas e Orógeno Araçuai (*i.e.* DUSSIN, 1985; GROSSI-SAD *et al.*, 1989; GUIMARÃES, 1992; FERNANDES *et al.*, 1994; GROSSI-SAD *et al.*, 1990, 1997; BARROTE *et al.*, 2017). A partir destes trabalhos, importantes dados relacionados à composição química das rochas da área de estudo foram obtidos, contribuindo a discussão deste estudo.

Visando a preservação das espécies de peixes remanescentes da bacia do rio Doce, foram realizados estudos relevantes sobre a ictiofauna da bacia do rio Santo Antônio.

O primeiro estudo aprofundado sobre o assunto foi a tese de doutorado de VIEIRA (2006), que buscou entender a riqueza, distribuição e aspectos biológicos da ictiofauna presente no rio Santo Antônio e seus afluentes, introduzindo uma proposta de preservação e conservação da diversidade de peixes presentes não só no rio Santo Antônio, mas em todo o Estado de Minas Gerais e no bioma da Mata Atlântica.

Em um trabalho posterior, VIEIRA (2009) estudou a distribuição, os impactos ambientais e a conservação da fauna de peixes na bacia do rio Doce, enfatizando a relevância da bacia do rio Santo Antônio, que abriga cerca de 90% das espécies que são encontradas em toda a bacia do rio Doce, e que por este motivo, se torna uma área prioritária para a conservação.

SIQUEIRA (2019) estudou a biologia básica e reprodutiva de peixes na região do alto Santo Antônio, próximo ao município de Ferros, fornecendo subsídios à conservação de espécies endêmicas ameaçadas de extinção na bacia do rio Doce. A partir dos dados obtidos na pesquisa, o autor formalizou uma proposta para elaboração de uma unidade de conservação visando proteger os habitats da bacia que são necessários a manutenção de quatro espécies ameaçadas de extinção.

Ainda sobre as drenagens, atualmente, a bacia do rio Santo Antônio não está enquadrada em nenhuma das classes estabelecidas pela regulamentação CONAMA 357/2005, o que compromete a gestão dos recursos hídricos. Diante desta problemática, REIS *et al.*, (2019) apresentaram uma proposta para enquadramento dos corpos hídricos da sub-bacia do rio Santo Antônio em classes de uso. Os critérios para tal enquadramento foram baseados em: uso e a ocupação do solo, finalidades das outorgas, volumes outorgados, vazão mínima de referência e densidade populacional. Como resultado, os rios Guanhões e Preto do Itambé foram enquadrados nas classes 1 e 2. O rio do Peixe foi classificado como classe 1 e os rios Santo Antônio e do Tanque foram classificados como classe 2.

Uma série de monografias, dissertações de mestrado e teses de doutorado foram desenvolvidas pela Graduação e Pós-Graduação em Geologia e pela Graduação e Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto, sendo que os trabalhos abaixo citados apresentam a trajetória e a evolução do conhecimento sobre a bacia do

rio Doce por meio das pesquisas realizadas pelo grupo: ROESER *et al.*, 2009 - Influência da Geodiversidade da Composição das Águas e Sedimentos do Alto Rio Doce - Um Balanço de 15 anos de Pesquisas Hidrogeoquímicas; ROESER *et al.*, 2011 - A Influência da Litologia Regional na Composição das Águas e Sedimentos da Bacia do Alto Rio Doce; GONTIJO *et al.*, 2014 - Estudo Geoquímico das Águas do Leste do Quadrilátero Ferrífero, Brasil; NASCIMENTO (2016) - Análise Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe, Quadrilátero Ferrífero; FERNANDES (2017) - Qualidade das Águas nos Rios Gualaxo do Norte, Gualaxo do Sul e do Carmo - Afluentes do Alto Rio Doce (Watu): Metais, Metaloides e Índice de Qualidade das Águas Antes e Após o Rompimento da Barragem de Rejeitos Fundão da Samarco/VALE/BHP Billiton, em Mariana, MG; e REIS (2019) - Contaminação Química e Microbiológica em Águas e Sedimentos da Bacia do Rio Gualaxo do Norte, Sub-Bacia do Rio Doce, Submetida a Fatores de Pressão Antrópicos e ao Rompimento da Barragem de Fundão.

Com relação ao grupo de pesquisas citado acima e à bacia do rio Santo Antônio, (GASPAR, 2021), além de analisar aspectos químicos, também discutiu aspectos físicos, biológicos e socioeconômicos que compreendem a dinâmica do manancial em questão. Por meio das análises químicas de água e sedimentos da mencionada autora, obteve-se importantes informações sobre o comportamento dos elementos químicos na água e nos sedimentos diante da sazonalidade anual apresentada pela sub-bacia.

1.5. Enquadramento da Bacia do Rio Santo Antônio

No Brasil, não são todos os corpos d'água que estão enquadrados nas classes estabelecidas pela regulamentação CONAMA 357/2005, o que dificulta a gestão dos recursos hídricos. A sub-bacia do rio Santo Antônio é um dos exemplos de mananciais que não estão registrados junto ao Sistema Nacional do Meio Ambiente - SISNAMA, ou no Sistema Nacional de Recursos Hídricos – SINGREH.

Para mudar a situação da bacia do rio Santo Antônio, REIS *et al.*, (2019) apresentaram uma proposta baseada na utilização de técnicas de tratamento de informações espaciais para enquadrar as principais drenagens da bacia do rio Santo Antônio nas classes da resolução CONAMA 357/2005. Os parâmetros utilizados nesta pesquisa são: uso e ocupação do solo, finalidades das outorgas, volumes outorgados, vazão mínima de referência e densidade populacional.

No caso de não classificação, a resolução CONAMA 357/2005 determina que as bacias não avaliadas ou com avaliação não aprovada são enquadradas na classe 2.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Referencial Teórico

2.1.1 Classificação dos elementos e suas propriedades geoquímicas por Goldschmidt

O geoquímico norueguês V. M. Goldschmidt (1888–1947) concluiu que os elementos químicos (metais, sulfetos e silicatos) podem ser agrupados de acordo com a sua afinidade. De acordo com MISRA (2012), essa conclusão foi baseada em três tipos de observações:

- Composição química de meteoritos condríticos semelhantes à composição média da Terra primordial;
- Análises de metais, silicatos e sulfuretos produzidos a partir da fundição de minérios de sulfeto para extração de metais;
- Composição de rochas silicatadas, minérios de sulfeto e metais nativos.

A partir das conclusões acima citadas, GOLDSCHMIDT (1937) classificou os elementos em quatro grupos (Tabela 1), baseando-se no comportamento químico-geológico:

Tabela 1: Distribuição dos elementos químicos segundo a classificação de GOLDSCHMIDT (1937) com acréscimo dos biófilos (MISRA, 2012).

Siderófilos	Calcófilos	Litófilos	Atmófilos	Biófilos
Fe ¹ , Co ¹ , Ni ¹ ,	Cu, Ag, Zn, Cd,	Li, Na, K, Rb, Cs, Fr	H, C, N, O, I, Hg	H, C, N, O, P
Ga ¹ , Sn ¹	Hg, Ga, In, Tl,	Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra	He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn	(S), (Cl)
Ge ¹ , (Pb), (As ²), Se, Mo ² , Sb ² , Te, Re,	(Ge), (Sn), Pb,	B, Al, Sc, Y, La		(Na), (K), (Mg), (Ca)
C, P, Ta, (W ³)	As, Sb, Bi, (Mo)	Ga, (In), (Tl)		(Fe), (Mn), (Cu), (Zn)
Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Au	S, Se, Te, Fe	C, Si, Ti, Zr, Hf		(B), (F), (Si), (I)
	(Cr), (Co), (Ni)	(Ge), (Sn), (Pb)		
	(Ru), (Pd), (Pt)	Y, Nb, Ta, P, (As)		
		O, Cr, W, Mn		
		(Fe), (Co), (Ni)		
		H, F, Cl, Br		
		Actínideos		
¹ calcófilo e litófilo na crosta, ² calcófilo na crosta; ³ litófilo na crosta			() afinidade secundária	

- elementos siderófilos, que apresentam afinidade a formar ligas metálicas;
- elementos calcófilos, que tendem a se ligar ao enxofre para formar sulfetos;
- elementos litófilos, que combinam com oxigênio para formar minerais de silicatos e óxidos;
- elementos atmófilos, que comumente são encontrados em fase gasosa.

Um quinto grupo de elementos (os biófilos - C, H, O, N, P, S, Cl, I) foi incorporado à classificação de Goldschmidt, sendo que este grupo é comumente encontrado na estrutura de organismos vivos e exibem afinidade com mais de um grupo, pois a distribuição de qualquer elemento está relacionada com outros fatores, como a temperatura, a pressão e o ambiente químico do sistema (MISRA, 2012).

MISRA (2012) observou que os elementos siderófilos estão concentrados no centro da tabela periódica, os elementos litófilos na esquerda para o centro, os elementos calcófilos e biófilos na parte direita, e os elementos atmófilos na extrema direita.

2.1.2. Elementos químicos essenciais e não essenciais

Os elementos químicos também podem ser classificados de acordo com a sua interação com os seres vivos, sendo eles classificados como essenciais ou não essenciais. Os elementos essenciais são aqueles que em uma concentração mínima são necessários para o funcionamento adequado dos seres vivos (ALLOWAY, 2013).

Os elementos químicos não essenciais, no estado atual do conhecimento, são os que em qualquer concentração são tóxicos ao organismo, levando-o a sua falência funcional (ALLOWAY, 2013).

2.1.3. Metais Potencialmente Tóxicos (MPT - PTM)

Em estudos ambientais, o uso do termo ‘metal pesado’ foi utilizado de forma recorrente na mídia, principalmente quando o tema é o meio ambiente. No entanto, as variadas divergências a respeito do termo fizeram com que tal definição tenha caído em desuso no meio científico.

Atualmente, a academia e várias instituições de controle ambiental, como a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América, a Organização Mundial da Saúde e o Programa de Monitoramento e Avaliação do Ártico, têm classificado como metais potencialmente tóxicos os metais e metalóides que representam risco à saúde humana e às formas de vida. Dentro da definição acima apresentada, os metais que se enquadram nesta definição são: As, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sc, Se, Ti, Tl, V e Zn (SIEGEL, 2002).

2.1.4. Comportamento físico-químico de ambientes aquáticos

2.1.4.1. Estados químicos dos elementos em um ambiente aquoso

Os elementos metálicos ocorrem em um sistema aquoso em diferentes maneiras:

- Em solução (íons, complexos solúveis orgânicos e inorgânicos);
- Como precipitados;
- Por meio do processo de adsorção;
- Incorporados à rede cristalina dos sedimentos ou da biota envolvida.

Esses elementos são adsorvidos ou liberados na interface água/sedimentos sendo que tais processos são capazes de controlar a mobilidade, a geodisponibilidade e a biodisponibilidade em ambientes aquáticos (TESSIER *et. al.*, 1985; SALOMONS *et al.*, 1995).

2.1.4.2. Processos geoquímicos dos elementos em ambientes aquáticos

A disponibilidade dos íons em sistema aquoso é regida por meio de processos de decomposição-ressuspensão, sorção-adsorção e complexação-descomplexação. Os principais parâmetros que controlam os respectivos processos são: pH, potencial de oxidação/redução (Figura 2) e agentes complexantes que se encontram solubilizados em matéria orgânica (SALOMONS, 1998).

A mobilidade, solubilidade e disponibilidade de alguns elementos em corpos d'água pode representar elevada periculosidade para uma comunidade biótica, principalmente para aquelas que estão no topo desta cadeia alimentar, devido à biomagnificação ocasionada por organismos aquáticos (BRAGA, 2005).

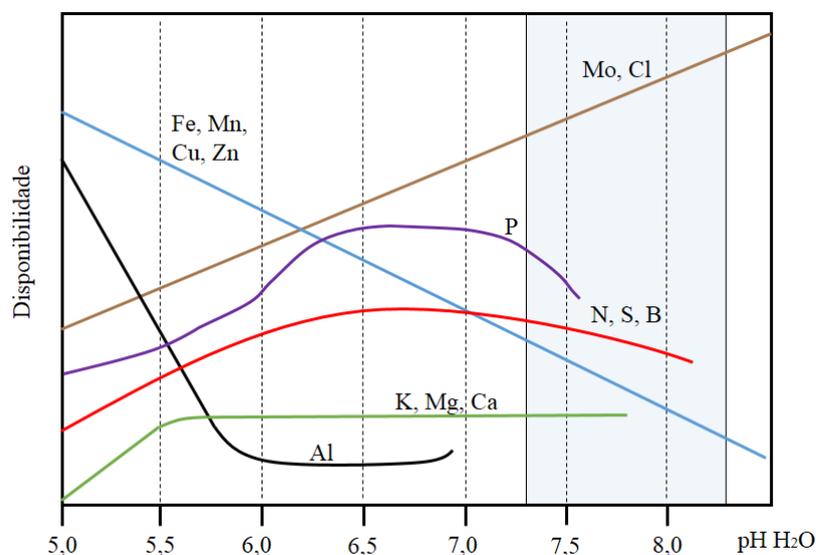


Figura 2: Diagrama da disponibilidade de alguns elementos em relação ao pH em um sistema aquoso (MALAVOLTA, 1979). O intervalo em azul claro indica a faixa de pH e a disponibilidade dos elementos na bacia do rio Santo Antônio.

2.1.4.3. Comportamento químico dos elementos em águas de rio

Em águas de rio, como é o caso do Santo Antônio, a entrada dos elementos no sistema ocorre principalmente por meio do intemperismo das litologias do entorno da drenagem e erosão dos sedimentos de fundo ou do banco do corpo d'água. Com isso, as partículas são transportadas no sentido vertical e horizontal em decorrência do próprio fluxo. Em uma região de menor energia ocorre a deposição das partículas (SALOMONS & FORSTNER, 2012).

Os elementos contidos na interface dos sedimentos interagem com a água e a biota por diferentes processos (solução, precipitação, adsorção e incorporados à rede cristalina dos sedimentos ou da biota), sendo estes controlados pela variação de parâmetros físico-químicos (pH, potencial de oxirredução e agentes complexantes) (SALOMONS & FORSTNER, 2012).

2.1.4.4. Avaliação e classificação da poluição em corpos d'água

Avaliar a qualidade ou o nível de contaminação dos corpos d'água é imprescindível para assegurar o uso satisfatório para o atendimento público, consumo de água potável, irrigação e indústria, bem como para a manutenção do equilíbrio biológico local.

Para assegurar este fim, é necessária a implementação de leis mais severas para controlar a qualidade da água com finalidade para o consumo humano em decorrência de doenças e intoxicações ocasionadas pela ingestão ou contato com águas contaminadas.

Para estabelecer normas de qualidade de água a Organização Mundial de Saúde (OMS) publicou três edições (1958, 1963, 1971) do livro *International standards for drinking water*, que posteriormente foram substituídos pelos livros *Guidelines for drinking-water quality*, que atualmente está em sua quarta edição (1984, 1997, 2004, 2011) (WHO 2011). Nesta publicação, também são estabelecidos padrões químicos e biológicos para a qualidade da água em função de sua utilização pela população.

A *Ontário Ministry of the Environment and Energy* publicou em 1974 o livro *Guidelines and Criteria For Water Quality Management in Ontario* com intuito de desenvolver padrões de qualidade da água para o controle da poluição da água e estabelecimento de valores limites de contaminação (OMEE, 1974).

Nos Estados Unidos, a Lei Federal de Controle da Poluição da Água, de 1948, foi a primeira grande lei a tratar da poluição da água. Em 1972, a USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) implementou programas de controle da poluição, como a definição de padrões de águas residuais para a indústria (EPA, 2020).

Em 1983, foi publicado o '*Water Quality Standards Handbook*' que estabeleceu valores limites de contaminação para as águas, contendo uma compilação das diretrizes do programa

de padrões de qualidade da água, em que a sua mais recente versão foi publicada em 2017 (EPA, 2020).

No Brasil, as leis referentes ao controle da poluição das águas também sofreram grandes modificações ao longo dos anos:

- Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934: estabelecimento do código das águas, sendo esta uma das primeiras medidas de proteção às águas e ao meio ambiente realizadas no país.

- Lançamento da Portaria nº 013 de 15 de janeiro de 1976 e definição do sistema de classificação da qualidade da água para águas doces de acordo com os usos preponderantes em nível federal com a finalidade de balneabilidade e recreação.

- Resolução CONAMA nº 020, de 18 de junho de 1986: estabeleceu a disposição sobre a classificação das águas doces, salobras e salinas do Território Nacional.

- Resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986: estabeleceu as definições, responsabilidades, critérios básicos e diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental na Política Nacional do Meio Ambiente.

- Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997: instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos que mais tarde daria origem a Agência Nacional de Águas, implementada em julho de 2000.

- Resolução CNRH nº 15, de 11 de janeiro de 2001: estabeleceu definições para águas subterrâneas.

- Resolução nº 357, de 17 de março de 2005: substituição da resolução CONAMA nº 020 de 1986 (CONAMA, 1986) pela resolução CONAMA 357/2005, sendo esta mais abrangente e informativa que a anterior, visando a classificação dos corpos d'água e estabelecendo diretrizes ambientais para o seu enquadramento.

A resolução CONAMA 357/2005 classifica as águas doces em diferentes classes de uso e estabelece os valores máximos para a concentração de alguns elementos que na água se encontram dissolvidos (Tabela 2), e também, quais atividades poderão ser realizadas dentro de sua classe. As classes são definidas de acordo com o Artigo 4º da Resolução, sendo estas classificadas em:

- I - classe especial: águas destinadas ao abastecimento para consumo humano com desinfecção, à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas, e à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.

- II - classe 1: águas que podem ser destinadas ao abastecimento para consumo humano após tratamento simplificado, à proteção das comunidades aquáticas, à recreação de contato primário tal como natação, à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que

se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película, e à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.

III - classe 2: águas que podem ser destinadas ao abastecimento para consumo humano após tratamento convencional, à proteção das comunidades aquáticas, à recreação de contato primário tal como natação, à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto, e à aquicultura e à atividade de pesca.

IV - classe 3: águas que podem ser destinadas: ao abastecimento para consumo humano após tratamento convencional ou avançado, à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras, à pesca amadora, à recreação de contato secundário e à dessedentação de animais.

V - classe 4: águas que podem ser destinadas à navegação e à harmonia paisagística.

Salienta-se que o COPAM-MG (Conselho Estadual de Política Ambiental), órgão normativo do Estado de Minas Gerais, segue as mesmas diretrizes estabelecidas pela CONAMA (2005) para classificação da água doce de acordo com a sua utilização, portanto, neste trabalho os dados da regulamentação vigente em todo território brasileiro serão utilizados como referência comparativa.

Tabela 2: Valores de concentração máxima permitidas para os elementos As, Al, Ba, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb e Zn na água (mg/L), de acordo com as classes da resolução CONAMA 357/2005. Nota-se que a classe 4 não apresenta valores máximos para os elementos mencionados. (Fonte: CONAMA, 2005).

mg/L	Al	As	Ba	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Pb	Zn
Classe 1	0,1	0,01	0,7	0,001	0,05	0,009	0,3	0,0002	0,01	0,18
Classe 2	0,1	0,01	0,7	0,001	0,05	0,009	0,3	0,1	0,01	0,18
Classe 3	0,2	0,0	1,0	0,0	0,1	0,0	5,0	0,0	0,0	5,0
Classe 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

2.1.5. Os sedimentos: conceitos e comportamento em ambientes fluviais

O sedimento pode ser definido como um composto gerado por materiais fragmentários oriundos da ação do intemperismo e da erosão de rochas e solos, transportados por agentes supergênicos que se depositam em áreas de mais baixa energia, conhecidas como regiões em subsidência ou bacias (CPRM, 2019). Os sedimentos de fundo – *bottom sediments*, são materiais fragmentários ou químicos que estão depositados nas calhas dos cursos d'água.

À medida que se aumenta a carga de substâncias comprometedoras lançadas nos canais fluviais, a análise química dos sedimentos surge com grande importância para inferir sobre a

qualidade das águas, pois o sedimento desempenha funções fundamentais em um sistema aquático (FORSTNER, 2004).

Os sedimentos de fundo de uma drenagem interagem com a água estabelecendo um equilíbrio químico neste sistema. Dessa forma, os sedimentos podem registrar a composição química da água que fluiu sobre o material depositado ao longo dos anos.

Uma outra importante propriedade dos sedimentos de fundo é que estes podem adsorver ou mobilizar compostos em contato com a água, podendo estes metais serem ou não potenciais contaminantes (FORSTNER, 2004). Tendo isso em vista, deve-se atentar à fração granulométrica dos sedimentos em que os metais estão ligados. De acordo com SALOMONS & FORSTNER (2010; 2012), os sedimentos nas frações granulométricas silte e argila são os principais agentes naturais de transporte de metais em ambientes fluviais. Dessa forma, os sedimentos finos atuam na adsorção dos metais pelo ambiente, armazenando-os, o que pode ser potencialmente perigoso à saúde humana.

2.1.5.1. Avaliação e classificação da poluição nos sedimentos

Os sedimentos depositados no fundo das drenagens são conhecidos como carreadores e possíveis fontes de contaminação em sistemas aquáticos, dependendo das condições físico-químicas do ambiente. Esta contaminação pode se propagar a outros ambientes, como águas subterrâneas, e até mesmo em solos, quando liberada e transportada (FORSTNER, 1989).

Em virtude da grande relevância dos sedimentos para todo o sistema aquático, no início dos anos 1990, surgiram as primeiras discussões a respeito da contaminação dos sedimentos.

Nos Estados Unidos, a Lei de Desenvolvimento de Recursos Hídricos de 1992 abordou pela primeira vez especificamente a questão dos sedimentos contaminados e verificou a existência de sedimentos contaminados em todos os estados do país (THOMPSON & WASSERMANN, 2015).

Em 1993, a *Ontário Ministry of the Environment and Energy* (OMEE, 1993) publicou os “Valores Guia para a Qualidade de Sedimentos”, marco que estabeleceu os níveis máximos ou limites de concentração para alguns metais e semimetais, nutrientes e pesticidas organoclorados nos rios do Canadá.

No Brasil, o processo de regulamentação dos níveis de contaminação dos sedimentos ocorreu de acordo com a cronologia mencionada abaixo:

- A CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) estudou a contaminação em sedimentos de fundo utilizando valores internacionais como referência, como a EPA (CETESB, 1998).

- Em 2004, o CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) publicou a resolução CONAMA 344/2004 (CONAMA, 2004) com valores de referência de sedimentos para materiais dragados com base nos valores levantados por canadenses e norte-americanos (Tabela 3). Estes foram subdivididos em dois níveis, de acordo com seus efeitos à biota. O Nível 1 está relacionado ao limiar abaixo do qual se prevê baixa probabilidade de efeitos adversos à biota. Já o Nível 2 está associado ao limiar acima do qual prevê-se um provável efeito adverso à biota.

- Resolução CONAMA nº 454/2012: Substituição da resolução anterior (CONAMA, 2004). Essa mudança ocasionou na regulamentação de aspectos relevantes relacionados ao licenciamento ambiental de dragagens e ao gerenciamento e disposição de material dragado (FROLICH *et al.*, 2015).

Os valores máximos estabelecidos para metais nos sedimentos sugeridos pela classificação CONAMA (2004) se mantiveram na regulamentação CONAMA (2012). Como dito anteriormente, os valores regulamentados pela legislação brasileira nestas resoluções têm como base valores de referência internacionais; portanto, não refletem com precisão o panorama natural de concentração dos mencionados elementos nos rios do Brasil.

Com relação a este estudo serão utilizados como referência comparativa os dados da CONAMA (2012) para os sedimentos dragados e sua disposição, visto que o COPAM-MG (Conselho Estadual de Política Ambiental), principal normativo em Minas Gerais, segue as mesmas diretrizes estabelecidas pela regulamentação nacional.

Tabela 3: Concentrações em cada nível da resolução CONAMA para os elementos As, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg, Ni e Zn. Determinação em um material a ser dragado em água doce. (Fonte: CONAMA, 2012).

mg/kg	As	Cd	Pb	Cu	Cr	Hg	Ni	Zn
Nível 1	5,9	0,6	35	35,7	37,3	0,17	18	123
Nível 2	17	3,5	91,3	197	90	0,486	35,9	315

2.1.5.2. Índice de geoacumulação

O índice de geoacumulação (I_{geo}) permite avaliar o aumento da concentração de elementos metálicos em sedimentos de fundo (LIMA, 2008) e seu impacto ambiental. Este índice foi desenvolvido por MÜLLER (1969). O cálculo matemático que define o índice de geoacumulação, I_{geo}, é representado pela equação a seguir:

$$I_{geo} = \log_2 C_n / 1.5 \times B_n,$$

em que: C_n = Concentração do elemento traço medido na fração fina (<0.063 mm) da amostra; B_n = Valores para o *background* da área investigada.

Os valores obtidos pela equação acima são enquadrados em classes distintas para a avaliação da intensidade da poluição. A classificação do Índice está disposta na Tabela 4.

Tabela 4: Classificação dos índices de Geoacumulação de acordo com MULLER (1969) *apud* CALMANO & FORSTNER (1996).

CLASSE	I_{geo}	INTENSIDADE DE POLUIÇÃO
0	$I_{geo} < 0$	Não poluído
1	$0 < I_{geo} < 1$	Pouco a moderadamente poluído
2	$1 < I_{geo} < 2$	Moderadamente poluído
3	$2 < I_{geo} < 3$	Moderado a fortemente poluído
4	$3 < I_{geo} < 4$	Fortemente poluído
5	$4 < I_{geo} < 5$	Forte a extremamente poluído
6	$I_{geo} > 5$	Extremamente poluído

Na crosta terrestre, as concentrações médias de *background* (C_b) podem variar de maneira significativa. De acordo com LOSKA & WIECHULA (2003), a substituição da concentração média de *background* (C_b) pela menor concentração encontrada do respectivo elemento químico em um local específico pode apresentar resultados mais representativos para a aplicação do I_{geo} .

2.1.6. Concentração e distribuição de metais em rochas e solos

As rochas são compostas por elementos metálicos e não metálicos, que se cristalizam em profundidade na forma de minerais conforme as condições do local. Estes minerais demonstram metaestabilidade na superfície e índices distintos de solubilidade quando expostos aos processos de intemperização.

O intemperismo é o processo que contribui para que uma rocha se fragmente e dê origem a um saprólito, produto da alteração. No saprólito, instalam-se plantas e pequenos organismos, que dependendo de determinadas condições físicas, químicas, geológicas e biológicas do local, permitem a transformação da rocha em solo, formando camadas, chamadas horizontes (GROTZINGER & JORDAN, 2013).

A distribuição dos metais nos solos ocorre em função das suas fontes e de suas condições de formação. Naturalmente, a transferência dos metais das rochas para o solo ocorre pelos processos de lixiviação, solubilização dos minerais por meio da água, ação de compostos

orgânicos e inorgânicos disponíveis no ambiente e condições relacionadas ao relevo e a morfologia (GROTZINGER & JORDAN, 2013; CALIJURI & CUNHA, 2013).

As atividades antrópicas, como agricultura, mineração, ocupação urbana e industrial, e lançamento de resíduos, podem alterar química e fisicamente a concentração natural dos compostos do solo, causando um aumento significativo da concentração, causando alteração da dinâmica e da qualidade dos ecossistemas (PAYE *et al.*, 2010; CALIJURI & CUNHA, 2013).

2.1.7. Características de alguns elementos químicos em ambientes naturais

O **alumínio** (Al) é o terceiro elemento químico mais abundante na crosta terrestre, primeiro entre os metais. O alumínio é liberado ao ambiente principalmente por processos naturais; no entanto, vários fatores influenciam sua mobilidade e o subsequente transporte no ambiente. As principais fontes naturais de alumínio são os silicatos, óxidos e hidróxidos de alumínio, como a gibbsita, caulinita, córindon e andaluzita (REIMANN & CARITAT, 1998; SANTOS, 2008). A mobilidade do alumínio é muito baixa, principalmente em ambientes em que o pH é superior a 5,5, sendo o pH o principal parâmetro limitante à mobilidade do elemento (REIMANN & CARITAT, 1998). As concentrações de Al dissolvido em águas com pH próximo ao neutro, geralmente, estão entre 0,001 e 0,05 mg/L, podendo aumentar para 0,5 a 1 mg/L em águas mais ácidas ou ricas em matéria orgânica (CETESB, 2017).

O **arsênio** (As) ocorre na natureza em baixas concentrações, estando comumente associado aos sulfetos. A principal fonte de arsênio natural é o mineral arsenopirita. A disponibilização de As ocorre em ambientes oxidantes, sendo ela muito baixa em ambientes redutores. O íon arsênio também é facilmente removido em águas naturais, por adsorção em argilas e hidróxido de Fe/Mn. As maiores concentrações de arsênio podem ser encontradas no ambiente natural, bem como relacionadas às fontes antrópicas dada a sua utilização na fabricação de inseticidas, herbicidas e conservantes de madeira (REIMANN & CARITAT, 1998; SANTOS, 2008; GILBERTI, 2012). No rio Doce, receptor das águas do rio Santo Antônio, o elemento se encontra em suas drenagens por meio de dois processos distintos: 1. Intemperismo natural dos minerais com As, oriundo das rochas da cabeceira do manancial; 2. Por meio da ação antrópica, decorrente da extração de Au nos depósitos de Pirita/Arsenopirita, sendo que este processo foi responsável pela contaminação dos solos e dos sedimentos da bacia ao longo de mais de três séculos de exploração, tendo continuidade nos dias atuais diante da movimentação dos sedimentos em pilhas de rejeitos de grandes mineradoras (COSTA, 2007; REIS, 2019).

O **cádmio** (Cd) é um elemento que ocorre na natureza na forma de sulfeto de cádmio (CdS - greenockita) e carbonato de cádmio (CdCO₃). Em ambientes naturais, o cádmio apresenta mobilidade média em ambientes oxidantes e baixa em ambientes redutores. Já em pH baixo, o cádmio é um elemento que apresenta alta solubilidade. O cádmio é nocivo à saúde humana, visto que se acumula no organismo e ocasiona uma série de distúrbios, como o aumento de pressão arterial, retardamento do crescimento, anemia e morte (REIMANN & CARITAT, 1998; SANTOS, 2008).

O **cálcio** (Ca) é um elemento abundante em rochas e águas naturais. Nas rochas calcárias, o Ca está presente em minerais como a calcita, aragonita e dolomita. Em rochas ígneas, este é encontrado, por exemplo, em minerais como o plagioclásio e a apatita (SANTOS, 2008). Nas águas naturais, o íon cálcio ocorre mais comumente na forma de bicarbonato, raramente como carbonato. Além do mais, o Ca apresenta como principais características: mobilidade elevada; é facilmente adsorvido, por isso comumente é incorporado à matéria orgânica; diminui o pH da água; altas concentrações do elemento inibem a presença de ferro na água (REIMANN & CARITAT, 1998).

O **cromo** (Cr) ocorre na natureza em baixas concentrações e substitui o alumínio na estrutura de alguns minerais, como o berilo e o córindon (SANTOS, 2008). As principais fontes de Cr naturais são a cromita e a crocoita. Em ambientes supergênicos, o cromo apresenta baixa mobilidade, seja ele oxidante, redutor, ácido, neutro ou alcalino. O cromo III é mais comum em ambiente naturais, sendo este necessário ao metabolismo humano, enquanto o cromo VI é oriundo da ação antrópica, amplamente produzido na indústria, sendo este íon mais móvel e mais nocivo à saúde humana com efeitos carcinógenos (REIMANN & CARITAT, 1998; MUNIZ & OLIVEIRA-FILHO, 2006).

O **cobalto** (Co) é um elemento siderófilo, e em menor grau calcófilo, pois tem grande afinidade com depósitos de sulfetos. É encontrado mais comumente na natureza na estrutura de minerais como a pirrotita e a cobaltita (HOROWITZ, 1968). O cobalto apresenta mobilidade média em ambientes oxidantes, elevada em meio ácido, muito baixa em ambientes neutros a alcalinos e redutores. As suas principais barreiras geoquímicas devem-se à presença de sulfuretos, à sua adsorção em meio a fração granulométrica fina e à variação de pH. O Co é um elemento essencial, sendo um componente importante para estrutura da vitamina B12. Por sua vez, o elemento torna-se potencialmente carcinógeno aos seres humanos em doses superiores a 25 mg/dia (HOROWITZ, 1968; REIMANN & CARITAT, 1998).

O **cobre** (Cu) é encontrado em ambientes naturais devido ao intemperismo de minerais como a calcopirita, azurita, covelita e malaquita. O cobre apresenta mobilidade alta em

ambientes ácidos com alto teor de matéria orgânica, média em ambientes oxidantes e muito baixa em ambientes alcalinos a neutros. A mobilidade de cobre está intimamente ligada ao carbono orgânico, estando estável em condições de pH próximo a 5 e 6 (REIMANN & CARITAT, 1998). Apesar do Cu ser eliminado pelo organismo humano após sua ingestão, altas concentrações do elemento podem levar o indivíduo a desenvolver severas doenças, como a hemocromatose (SANTOS, 2008).

O **ferro** (Fe) é muito comum em águas naturais e geralmente é encontrado em teores inferiores a 0,3 mg/L. Alguns exemplos de minerais que contém ferro em sua estrutura são a hematita, a magnetita, a pirita, o piroxênio, biotita e a olivina (SANTOS, 2008). A mobilidade do Fe é muito baixa em ambientes oxidantes, mas aumenta em ambientes ácidos, neutros a alcalinos e redutores. A oxidação, o aumento de pH e sua precipitação em óxidos e hidróxidos de ferro são os principais limitantes à mobilidade do elemento em ambientes naturais (REIMANN & CARITAT, 1998). No Quadrilátero Ferrífero o ferro ocorre principalmente na forma óxidos e hidróxidos em rochas ferríferas bandadas com quartzo, e subordinadamente com a fácies carbonatada (ROESER & ROESER, 2010). Na área de estudo estes depósitos são encontrados principalmente na Serra da Serpentina e na Serra da Escadinha, na Fácies Itabirítica (GROSSI-SAD *et al.*, 1997).

O **potássio** (K) é um elemento litófilo, muito solúvel e apresenta baixa mobilidade em condições oxidantes, redutoras, ácidas e neutras a alcalinas (REIMANN & CARITAT, 1998). O K compõe geralmente 4,5% das rochas graníticas e 0,5% dos diabásios. As principais fontes naturais de potássio são os minerais carnalita e silvita (NASCIMENTO & LOUREIRO, 2004).

O **magnésio** (Mg) tem propriedades semelhantes ao cálcio, no entanto, apresenta maior solubilidade e maior dificuldade para precipitar, ocorrendo mais comumente na forma de bicarbonato. O Mg, a exemplo do Ca, é um elemento comum em rochas carbonatadas e ocorre principalmente em minerais como a magnesita, clorita, hornblenda, biotita, olivina, granada e allanita (SANTOS, 2008).

O **manganês** (Mn) é um dos metais mais abundantes na crosta terrestre e apresenta afinidade química com elemento ferro, sendo este menos abundante nas rochas, explicando a diferença entre ambos em águas naturais (SANTOS, 2008). Em águas naturais o íon manganês geralmente contém concentração inferior a 0,2 mg/L. O Mn está presente na lista de substâncias perigosas da EPA – *United States Environmental Protection Agency*. Altas concentrações desse íon em sistemas aquáticos podem levar à morte de peixes, plantas aquáticas e animais (EPA, 1998; SANTOS, 2008)

O **sódio** (Na) é um elemento com ampla distribuição na crosta terrestre. Sua disponibilidade em águas naturais está relacionada com a abundância em vários litotipos de rocha e sua baixa estabilidade nos minerais. O Na é o principal elemento responsável pelo aumento da salinidade em ambientes aquáticos. Sua concentração em água doce pode variar entre 1 e 150 mg/L (SANTOS, 2008). Do ponto de vista geoquímico, sua mobilidade é considerada alta em condições oxidantes, ácidas e neutras a alcalinas e redutoras (REIMANN & CARITAT, 1998).

O **níquel** (Ni) ocorre quase sempre associado ao cobalto e ao cromo, podendo substituir manganês e ferro em minerais, como é o caso da serpentina (POMBO *et al.*, 1989). Outros exemplos de minerais compostos por níquel são a garnierita, a pentlandita e a niquelita (REIMANN & CARITAT, 1998). O níquel apresenta mobilidade média sob condições oxidantes, alta em ambiente ácido, muito baixa em ambientes neutros a alcalinos e redutores. O Ni é insolúvel em pH acima de 6,7 e é facilmente adsorvido em meio a argilas (REIMANN & CARITAT, 1998). O níquel quando disponível no ambiente em excesso, é tóxico a plantas e animais (POMBO *et al.*, 1989).

O **fósforo** (P) é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre. Em águas naturais, ele se encontra disponível na forma de fosfatos, em material orgânico dissolvido, particulado e total dissolvido. A presença natural de P nas rochas é atribuída principalmente aos minerais apatita, monazita e xenotímio. Outros minerais que apresentam P em sua composição são: a olivina, as granadas, os piroxênios, os anfíbólios, as micas e os feldspatos. Sua mobilidade é considerada baixa em ambientes oxidantes, ácidos e neutros a alcalinos e redutores. Uma das barreiras geoquímicas do elemento é a disponibilidade de Ca, sendo este um limitante a concentração do elemento na água (REIMANN & CARITAT, 1998; SANTOS, 2008).

O **chumbo** (Pb) é um elemento encontrado em rochas ígneas, xistos e granitos, ocorrendo principalmente na forma do mineral galena. A mobilidade do chumbo é considerada baixa sob condições oxidantes, ácidas e neutras a alcalinas, e muito baixa em condições redutoras. Os principais limitantes à mobilidade do chumbo estão relacionados à presença de sulfatos e carbonatos; à adsorção pelos óxidos de Fe-Mn e à matéria orgânica insolúvel; e ao pH (REIMANN & CARITAT, 1998). Altos teores de Pb no organismo humano causam sua intoxicação, danos cerebrais e podem levá-lo à morte (SANTOS, 2008).

O **titânio** (Ti) é o nono elemento mais abundante na crosta terrestre, ocorrendo na forma de depósitos primários e secundários. Nos depósitos primários, o Ti ocorre geralmente associado ao Fe. Já nos depósitos secundários, este elemento ocorre em pláceres, em que o mineral dominante é o quartzo. O Ti é um elemento que apresenta mobilidade muito baixa em

condições oxidantes, redutoras, ácidas e neutras a alcalinas. Os principais minerais de Ti são a ilmenita, rutilo, zirconita e monazita (REIMANN & CARITAT, 1998; BALTAR *et al.*, 2005).

O **zinco** (Zn) é um elemento químico distribuído na crosta terrestre, compondo a estrutura de minerais como a esfalerita, a blenda e a calamina (SANTOS, 2008). O zinco é considerado essencial para os seres humanos, ao contrário dos outros elementos da mesma coluna na tabela periódica, como é o caso do cádmio e o mercúrio, estes potencialmente perigosos (REIMANN & CARITAT, 1998). O zinco apresenta mobilidade alta em ambientes oxidantes e ácidos, e muito baixa em ambientes neutros a alcalinos e redutores. Os principais limitantes à mobilidade do zinco em ambientes naturais são: 1. O pH, o zinco é mais disponível em condições de pH neutro; e 2. A adsorção em meio às frações granulométricas finas, aos óxidos de ferro e manganês e à matéria orgânica (REIMANN & CARITAT, 1998).

2.2. Descrição da Área de Estudo

2.2.1. Localização e acessos

A área da bacia do rio Santo Antônio está localizada na porção leste do Estado de Minas Gerais. A cabeceira do rio principal da bacia, o rio Santo Antônio, encontra-se nas proximidades da cidade de Conceição do Mato Dentro-MG, e sua confluência com o rio Doce se localiza nos arredores da cidade de Naque-MG (Figura 3). Tendo como referência a cidade de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais, o acesso à área de estudo ocorre da seguinte maneira:

Desloca-se pela MG-010 e percorre-se esta rodovia até as proximidades da cidade de Conceição do Mato Dentro, já situada na área de estudo. A área da bacia é cortada por outras rodovias estaduais e federais, sendo que as principais conexões aos pontos de amostragem são: BR-120, BR-259, BR-381, MG-129, MG-232, MG-758, MG-779, MG-789 e MG-790.



Figura 3: Localização e vias de acesso à área de estudo (em verde). O trajeto de Belo Horizonte até Conceição do Mato Dentro é indicado pela linha amarelada (MG-010). Belo Horizonte está indicada em vermelho e as outras rodovias em marrom. (Fonte: DNIT, 2019).

2.2.2. Clima

De acordo com a Classificação de Köppen, o clima predominante na região da bacia do rio Santo Antônio é o Cwa, caracterizado por chuvas abundantes durante o verão e clima seco durante o inverno (VIEIRA, 2006).

O INMET (2019) levantou dados a respeito da temperatura média e a pluviosidade de todo o território brasileiro no ano de 2018. De acordo com estes dados, a temperatura média na região da bacia estudada no referido ano foi de aproximadamente 22°C e o índice de precipitação total variou entre 1600 a 1800 mm.

Historicamente, o período de chuvas na área de estudo concentra-se entre os meses de novembro a março, com uma precipitação total mensal ≥ 500 mm. O período seco na região ocorre entre os meses de maio a setembro (VIEIRA, 2006).

Na Figura 4, são apresentadas a temperatura e a precipitação de duas das mais importantes cidades situadas na bacia do rio Santo Antônio: Conceição do Mato Dentro (cabeceira do rio) e Naque (desembocadura do rio) (CLIMATEMPO, 2020).

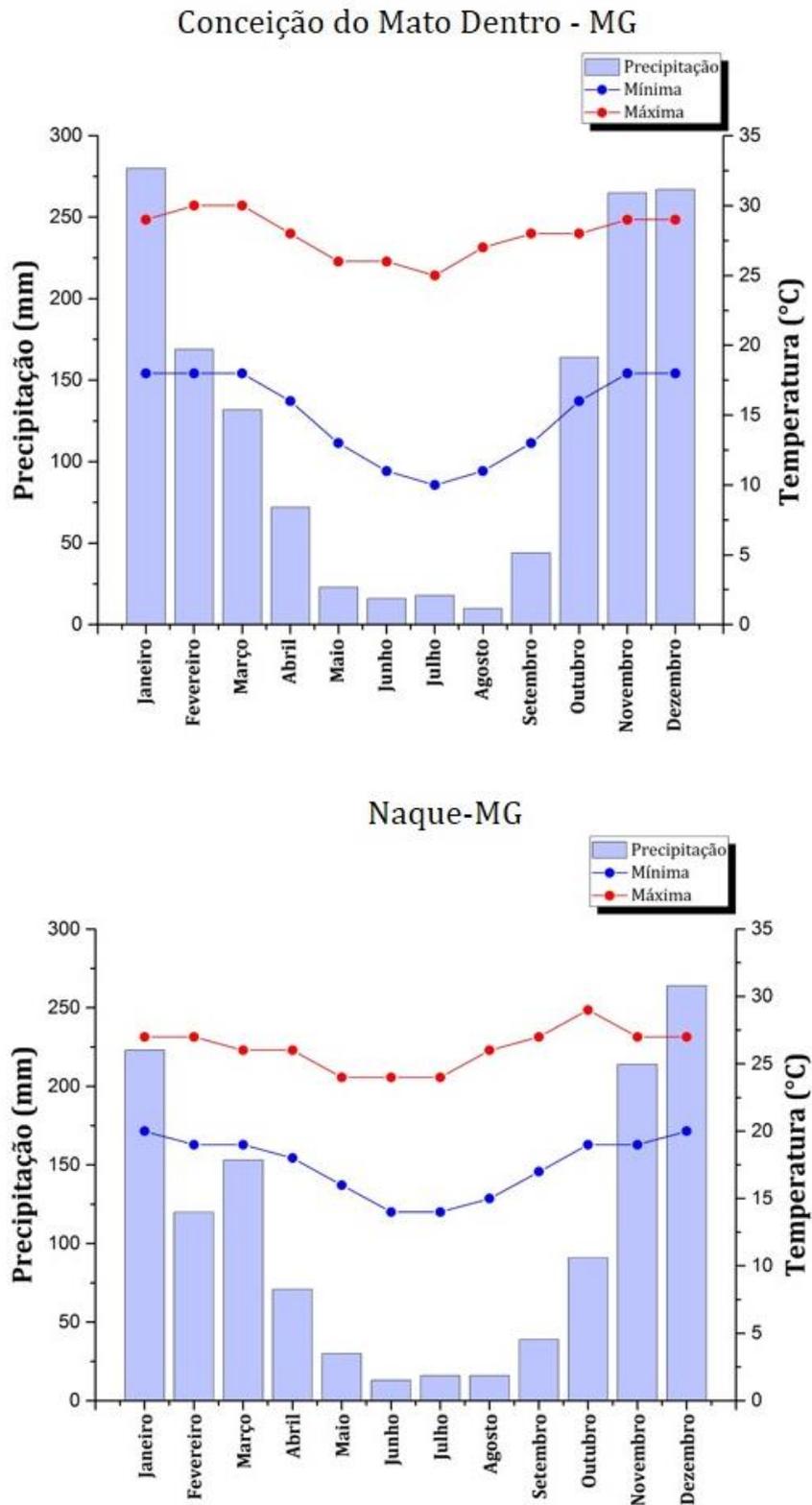


Figura 4: Temperaturas mínimas (linhas azuis) e máximas (linhas vermelhas) referentes ao ano de 2019 e pluviosidade média que considera o período entre 1989 e 2019 das cidades mineiras de Conceição do Mato Dentro-MG e Naque-MG (barras azuis), de acordo com (CLIMATEMPO, 2020).

2.2.3. Recursos hídricos e uso da água

A bacia do rio Santo Antônio é composta por canais fluviais de grande e pequeno porte e drenagens auxiliares. A bacia ocupa uma área de drenagem superficial de aproximadamente 10.429,26 km², representando 15,12% da área da bacia do rio Doce (IGAM, 2020).

O principal rio da bacia é o rio Santo Antônio, que contém 287 km de extensão desde sua cabeceira até sua confluência com o rio Doce. Os principais afluentes do rio Santo Antônio são: os rios Guanhões e do Peixe, sendo estes afluentes em sua margem esquerda; e rios do Tanque, Preto e Preto do Itambé, sendo estes afluentes em sua margem direita (Figura 5) (CBH SANTO ANTÔNIO, 2019).

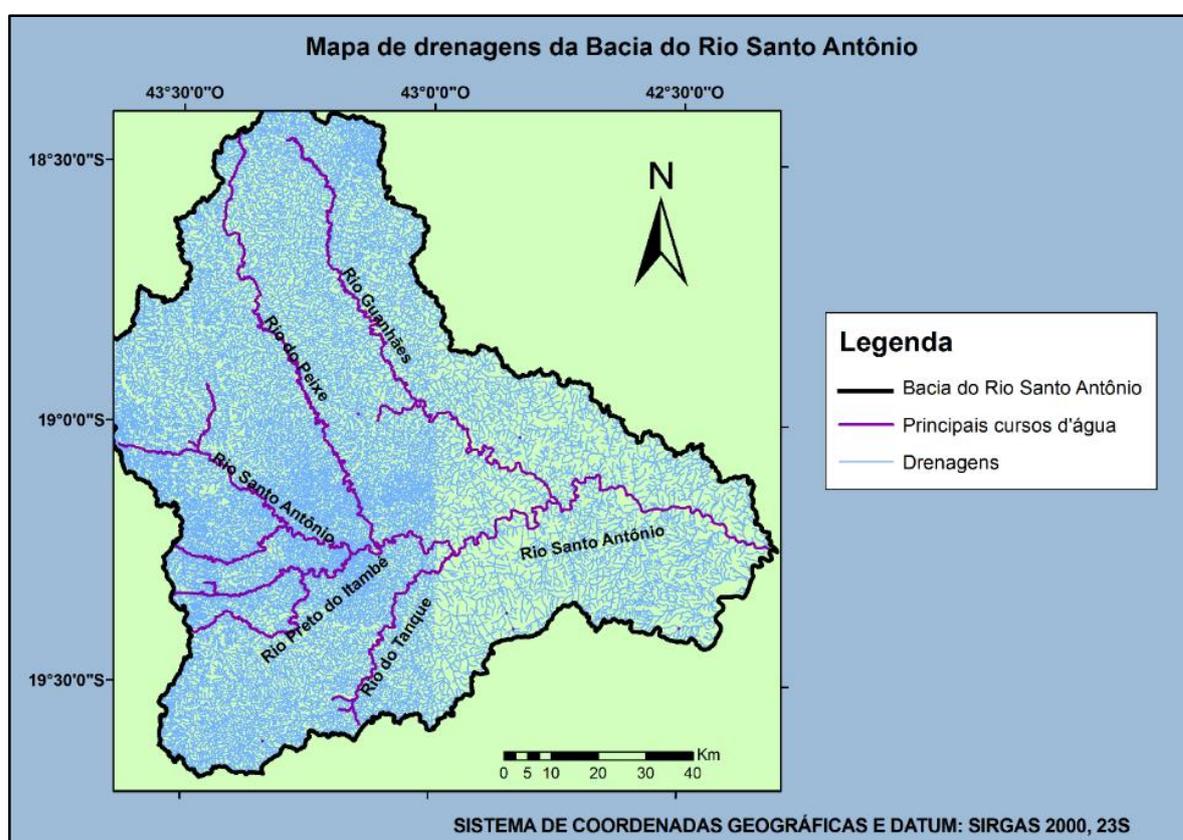


Figura 5: Mapa de drenagens da bacia do rio Santo Antônio com destaque para os principais cursos d'água, assinalados em roxo. (Fonte: IDE-SISEMA/MG, 2019).

No ano 2018, a estação fluviométrica Conceição do Mato Dentro, situada na cabeceira, registrou vazão máxima de 90,6 m³/s no mês de fevereiro (período chuvoso), vazão mínima de 0,813 m³/s no mês de agosto (período seco) e vazão média anual de 5,28 m³/s (ANA, 2020).

No mesmo ano, a estação fluviométrica Naque Velho próximo à confluência do rio Santo Antônio registrou vazão máxima de 1218,78 m³/s no mês de dezembro (período chuvoso), vazão mínima de 25,4 m³/s no mês de agosto (período seco) e vazão média anual de 102,39 m³/s (ANA, 2020).

A água da bacia do rio Santo Antônio é utilizada no atendimento de uma série de atividades que envolvem a sua população ribeirinha, sendo elas: abastecimento público de água, diluição do esgoto doméstico e industrial, atividades minerárias, agropecuária, geração de energia e pesca.

- **Abastecimento público de água:** um dos mais importantes usos da água dos mananciais da referida bacia é direcionado ao abastecimento público, que consiste em fornecer à população água potável para consumo, bem como utilização do recurso nas atividades industriais.

- **Diluição do esgoto doméstico e industrial:** infelizmente, boa parte dos municípios da bacia do rio Santo Antônio não estão amparados por sistemas recolhimento de águas residuárias. Com isso, o esgoto doméstico e industrial é descartado sem qualquer tipo de tratamento nos corpos d'água. Esta prática é responsável pela alteração do ambiente aquático no local de descarte devido ao consumo de oxigênio pela matéria orgânica, e também, pelo aparecimento de doenças atribuídas a atividade microbológica. A Tabela 5 contém informações sobre o saneamento básico oferecido à população urbana dos municípios da bacia do rio Santo Antônio. Os dados são referentes ao ano de 2013, de acordo com ANA (2018), e são expressos em % de população urbana atendida.

- **Atividades minerárias:** A exploração, o beneficiamento e o transporte de minério de ferro são exemplos de atividades dentro do contexto da mineração que exigem uma quantidade significativa de água dos mananciais. Além do mais, a mineração é uma atividade que produz uma significativa quantidade de sedimentos e estes chegam até os canais fluviais, o que pode ocasionar o assoreamento do leito das drenagens, mudança da dinâmica e das características físicas e químicas do canal, afetando diretamente o ecossistema natural. A liberação para utilização dos recursos hídricos pelas mineradoras é concedida por meio de outorgas emitidas pelos órgãos legisladores ambientais.

- **Agropecuária:** A agricultura e a pecuária são atividades muito importantes para geração de renda da população ribeirinha do Santo Antônio. Vários metros cúbicos de água são utilizados para irrigação das lavouras de cana de açúcar, café e milho - principais alimentos produzidos na região - e para dessedentação do gado, visto que a pastagem vem crescendo significativamente na área de estudo nos últimos anos.

Tabela 5: Dados sobre o saneamento básico dos municípios nos limites da bacia do rio Santo Antônio. (Fonte: ANA, 2018).

Municípios	Esgoto coletado e tratado (% da população atendida)	Esgoto coletado e não tratado (% da população atendida)	Esgoto não coletado e não tratado (% da população atendida)	Fossa séptica (% da população atendida)
Açucena	0,00%	73,30%	25,30%	1,40%
Alvorada de Minas	0,00%	63,80%	33,70%	2,50%
Antônio Dias	0,00%	87,20%	8,70%	4,10%
Belo Oriente	0,00%	85,80%	11,30%	2,90%
Braúnas	0,00%	88,80%	10,80%	0,40%
Carmésia	94,50%	0,00%	4,20%	1,30%
Conceição do Mato Dentro	41,60%	39,40%	17,30%	1,70%
Congonhas do Norte	0,00%	36,40%	55,70%	7,90%
Dom Joaquim	0,00%	76,60%	21,30%	2,10%
Dores de Guanhães	0,00%	53,60%	46,40%	0,00%
Ferros	0,00%	45,20%	54,20%	0,60%
Guanhães	7,90%	71,10%	20,30%	0,70%
Itabira	39,50%	50,50%	9,00%	1,00%
Itambé do Mato Dentro	89,40%	6,40%	4,20%	0,00%
Joanésia	0,00%	39,80%	59,40%	0,80%
Materlândia	0,00%	81,30%	18,20%	0,50%
Mesquita	0,00%	85,10%	14,90%	0,00%
Morro do Pilar	0,00%	54,60%	45,10%	0,30%
Naque	0,00%	83,70%	16,00%	0,30%
Passabém	0,00%	64,20%	35,50%	0,30%
Sabinópolis	0,00%	74,50%	21,70%	3,80%
Santa Maria de Itabira	0,00%	82,50%	17,10%	0,40%
Santana do Paraíso	0,00%	76,70%	20,00%	3,30%
Santo Antônio do Itambé	0,00%	49,70%	46,40%	3,90%
Santo Antônio do Rio Abaixo	0,00%	18,00%	81,70%	0,30%
São Sebastião do Rio Preto	0,00%	73,30%	25,30%	1,40%
Senhora do Porto	0,00%	63,80%	33,70%	2,50%
Serra Azul de Minas	0,00%	87,20%	8,70%	4,10%
Serro	0,00%	85,80%	11,30%	2,90%

• **Geração de energia:** Na área de estudo há sete hidrelétricas que controlam a vazão de água dos canais fluviais da região. No rio Guanhães, as hidroelétricas são: Jacaré, Senhora do Porto, Dolores de Guanhães (centrais hidrelétricas de pequeno porte) e a Barragem de Guanhães (centrais hidrelétricas de grande porte). No rio do Tanque está a usina hidrelétrica de Dona Rita, localizada na cidade de Santa Maria de Itabira, aportando duas unidades geradoras que produzem cerca de 2,41 MW de potência declarada e que iniciaram suas atividades em 1952 com reservatórios classificados como fio d'água. Nos rios Santo Antônio e Guanhães, está instalada a usina hidrelétrica de Salto Grande, localizada em Braúnas. Esta usina contém quatro unidades geradoras que iniciaram suas operações no ano de 1956. Elas produzem cerca de 102 MW de potência declarada e seus reservatórios contém volume útil de $47 \times 10^6 \text{ m}^3$ (no rio

Guanhães) e $7,15 \times 10^6 \text{ m}^3$ (no rio Santo Antônio). No rio Santo Antônio também está instalada a usina hidrelétrica de Porto Estrela, em Joanésia e Açucena, sendo que as duas unidades geradoras iniciaram suas atividades em 2001. Elas produzem cerca de 112 MW declarada e seus reservatórios contêm volume útil de aproximadamente $33,12 \times 10^6 \text{ m}^3$ (CEMIG, 2020).

- **Pesca:** A pesca é uma atividade primordial para a vida de muitos moradores ao longo do rio Santo Antônio. Algumas espécies endêmicas da bacia do rio Doce são encontradas somente em alguns trechos de seu afluente. A mudança na qualidade das águas da sub-bacia já começa a impactar a população de peixes e o consumo de pescado na região.

2.2.4. Relevo

O relevo da área da bacia do rio Santo Antônio é controlado pela litologia local, causando uma variedade altimétrica significativa (Figura 6).

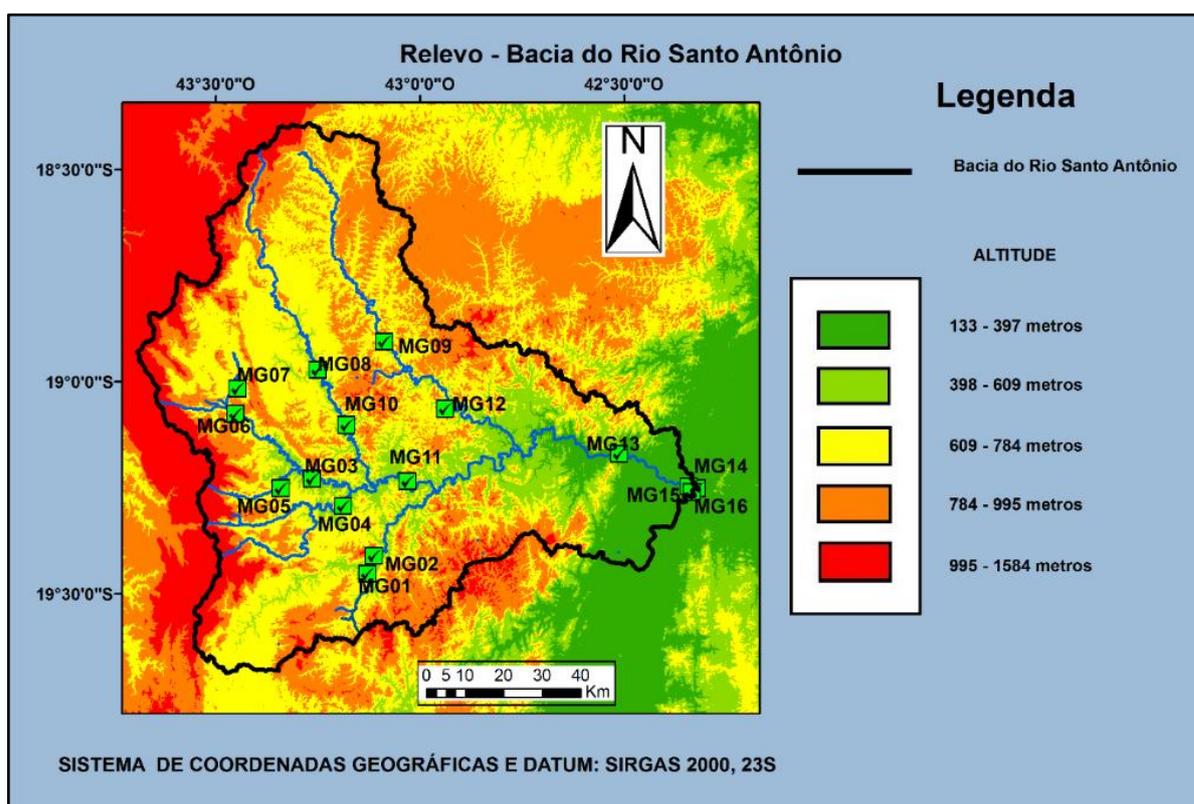


Figura 6: Mapa de relevo da bacia do rio Santo Antônio com indicação dos pontos de amostragem. (Fontes: INSTITUTO PRÍSTINO, 2019; EMBRAPA, 2020).

A porção oeste da bacia é uma região montanhosa formada por serras de unidades quartzíticas do Supergrupo Espinhaço que chegam a altitudes superiores a 1000 metros (IDESISEMA, 2019; EMBRAPA, 2020).

Na porção central da área de estudo predominam planaltos em que a altitude varia entre 600 a 1000 metros (IDESISEMA, 2019; EMBRAPA, 2020).

Na porção leste da área, próximo à confluência do rio Santo Antônio com o rio Doce, se encontram as planícies da região, em que a altitude média varia entre 200 a 400 metros (IDESISEMA, 2019; EMBRAPA, 2020).

2.2.5. Solos

São três as principais unidades de solo na bacia do rio Santo Antônio: os Latossolos Vermelhos, os Latossolos Vermelho-Amarelos e os Podzólicos Vermelho-Amarelos. Na área de estudo também ocorrem Latossolos Amarelos, Latossolos Roxos, Cambissolos e Neossolos Litólicos, em menor representatividade (Figura 7) (AMARAL *et al.*, 2004).

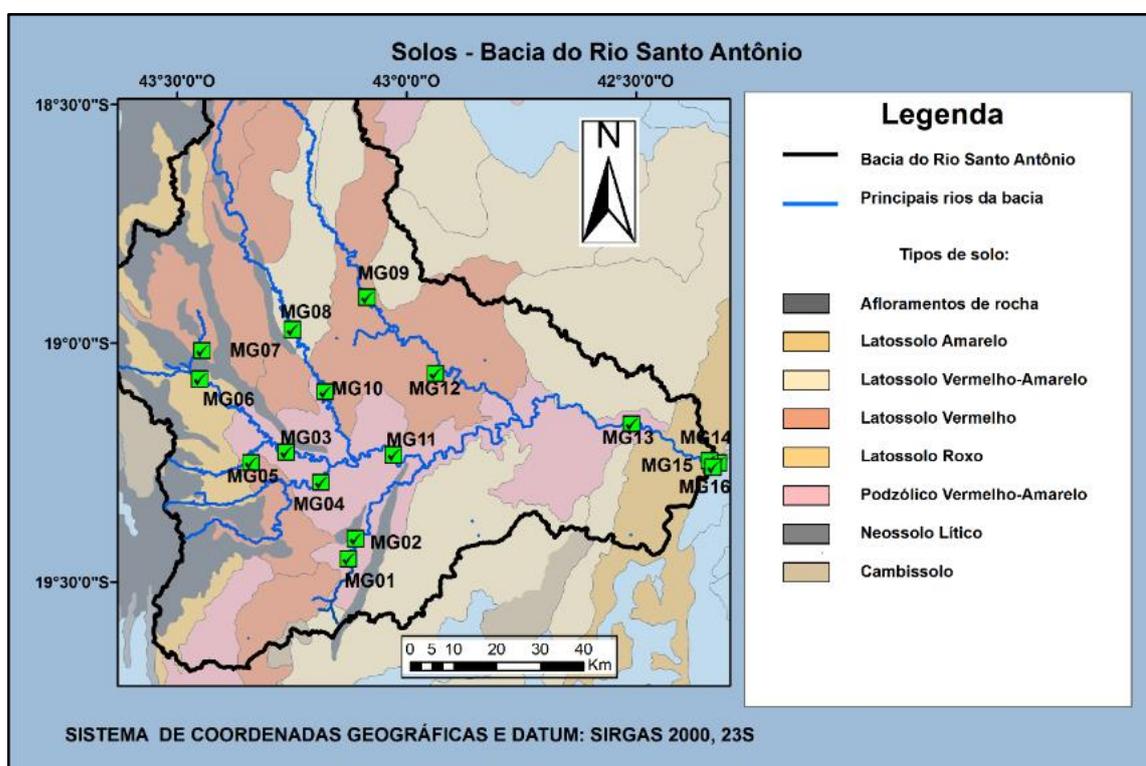


Figura 7: Mapa de solos da bacia do rio Santo Antônio. Os pontos de amostragem são indicados em verde. (Fontes: AMARAL *et al.*, 2004; IDE-SISEMA, 2019; INSTITUTO PRÍSTINO, 2019).

O Latossolo Vermelho é o tipo de solo mais abundante na bacia. Estes solos são caracterizados por serem profundos, acentuadamente drenados, decrescentemente álicos, distróficos e eutróficos. O Latossolo Vermelho apresenta o horizonte A moderado e horizonte B com a textura variando entre arenosa a argilosa. Este solo é predominante encontrado em relevo plano e ondulado (AMARAL *et al.*, 2004).

Os Latossolos Vermelho-Amarelos são solos profundos e normalmente bem drenados. Quanto à fertilidade natural do solo, predomina os solos álicos perante aos solos distróficos e eutróficos. O horizonte A varia de moderado a fraco. O horizonte B apresenta textura argilosa

a areia média. Estes solos são encontrados em relevo plano a fortemente ondulado (AMARAL *et al.*, 2004).

Os Podzólicos Vermelho-Amarelos, também chamados de Argilossolos Vermelho-Amarelados, são solos que podem ser pouco ou muito profundos, moderadamente a muito drenados. Quanto à fertilidade natural do solo, a variação apresentada é dada em ordem decrescente: distróficos, eutróficos e álicos. O horizonte A é moderado e este exibe textura média a argilosa, ocorrendo em relevo fortemente ondulado a ondulado (AMARAL *et al.*, 2004). Este tipo de solo é encontrado principalmente nas margens do rio Santo Antônio.

Os Latossolos Amarelos se diferenciam dos outros tipos de Latossolos por serem mais coesos e pela ausência expressiva de argila no horizonte B. Estes solos apresentam nos horizontes A e B estrutura baseada em blocos, pouco desenvolvidos. A consistência do solo seco varia de muito dura a ligeiramente dura. Quando úmido, o solo revela consistência friável a firme. Estes tipos de solos são álicos, com horizonte A moderado e textura argilosa, ocorrendo em relevos planos a suavemente ondulados (AMARAL *et al.*, 2004).

Os Neossolos Litólicos se caracterizam por apresentarem fragmentos de rocha em sua composição, majoritariamente na fração cascalho e concreções relacionadas com a natureza destes materiais. Estes solos ocorrem predominantemente em relevo fortemente ondulado a montanhoso, em locais com afloramento rochoso. O horizonte A moderado predomina neste tipo de solo, seguido do horizonte A fraco. Quanto à fertilidade natural do solo, os solos são predominantemente álicos. A quantidade de argila é variável, predominando a textura arenosa (AMARAL *et al.*, 2004).

Os Latossolos Roxos são solos com o horizonte B bem desenvolvido e são oriundos de rochas básicas. Geralmente este tipo de solo é distrófico devido à saturação em alumínio ser praticamente nula, porém localmente são encontrados solos eutróficos. O horizonte A moderado apresenta teores de carbono que variam de 1,40 a 2,21%, sendo comum o horizonte A proeminente. A textura do horizonte B é geralmente muito argilosa a argilosa. Este tipo de solo ocorre em relevo plano a suavemente ondulado (AMARAL *et al.*, 2004).

Os Cambissolos são solos mal a acentuadamente drenados, apresentando predominantemente cascalhos em sua estrutura. Devido a este fato, os cambissolos geralmente são pouco espessos. Quanto à fertilidade natural do solo, a variação é dada na ordem decrescente: os solos álicos predominam perante aos solos distróficos e os últimos predominam em relação aos solos eutróficos. O horizonte A é moderado e apresenta textura argilosa. Estes solos são encontrados em relevo ondulado a fortemente ondulado (AMARAL *et al.*, 2004).

2.2.6. Suscetibilidade a erosão (incluindo os parâmetros: geomorfologia, solos e pluviosidade)

O Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce – PIRH (2010) criou um mapa de suscetibilidade erosiva a partir de dados de geomorfologia, solos e pluviosidade obtidos em (CETEC, 1989; ELETROBRÁS, 1991) para informar a resistência dos terrenos da bacia aos processos erosivos (Figura 8). A classificação da suscetibilidade erosiva na bacia do rio Santo Antônio foi baseada na intensidade do processo erosivo: muito forte, forte, média, baixa ou nula (PIRH, 2010).

A **intensidade muito forte** é causada pela associação de no mínimo três dos fatores condicionantes acima citados que influenciam diretamente o processo erosivo.

A **intensidade forte** é definida pela influência de apenas um fator condicionante.

A **intensidade média** é atribuída quando o processo erosivo ocorre de forma disseminada na área e o fator condicionante não pode ser indicado com precisão.

O fator de **intensidade baixo** ou **nulo** é atribuído quando nenhuma das três condicionantes influenciam diretamente o processo erosivo da bacia. Esta situação ocorre nas planícies fluviais da foz do rio Doce (CETEC, 1989; ELETROBRÁS, 1991; PIRH, 2010).

Na bacia do rio Santo Antônio dominam as classes de suscetibilidade erosiva média (cerca de 44% da área da bacia e as porções do alto curso do rio Santo Antônio e a faixa que abrange o rio Guanhões até a confluência com o rio Santo Antônio) e forte (cerca de 56% da área da bacia e o restante da unidade que não foi mencionada na classe média). No mapa da Figura 9, a distribuição das classes é indicada.

O fator condicionante que mais influencia na bacia são as chuvas mais intensas que ocorrem no curso médio do rio Santo Antônio e no rio do Tanque (PIRH, 2010).

Os solos ao longo da porção leste da Serra do Espinhaço, no médio e alto curso do rio do Tanque, bem como no baixo curso do rio Santo Antônio, são pouco resistentes ao processo intempérico, que se manifesta em grande parte na carga sedimentar. Nas cabeceiras dos principais afluentes que drenam a bacia, ocorre atividade minerária, o que aumenta a produção de sedimentos (PIRH, 2010).

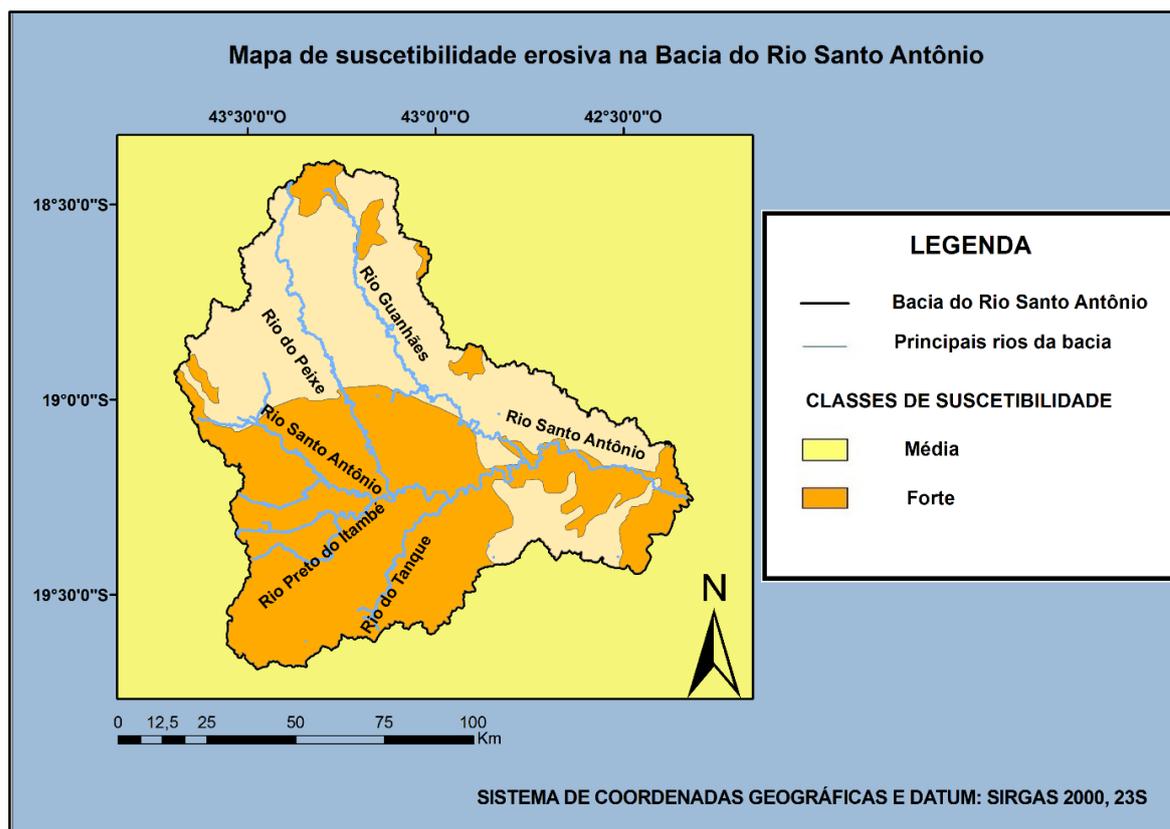


Figura 8: Mapa de suscetibilidade erosiva da bacia do rio Santo Antônio. (Fontes: PIRH, 2010; INSTITUTO PRÍSTINO, 2019).

2.2.7. Vegetação

As florestas remanescentes da Mata-Atlântica é o bioma predominante na bacia do rio Santo Antônio, compondo cerca de 98% da vegetação local, sendo que estas se concentram principalmente nas margens dos cursos d'água (VIEIRA, 2006; INSTITUTO PRISTINO, 2019). Destaca-se nas áreas topograficamente elevadas da porção oeste da bacia, em meio a cadeia do Espinhaço, a vegetação remanescente do bioma Cerrado (INSTITUTO PRISTINO, 2019). O mapa da Figura 9 apresenta a vegetação remanescente da bacia do rio Santo Antônio.

Na bacia, existem treze Unidades de Conservação, classificadas da seguinte maneira: oito unidades são destinadas para utilização sustentável sendo estas Áreas de Proteção Ambiental Municipal (Açucena, Belo Oriente, Renascença, Serra do Intendente, Serra Talhada, Gameleira, Rio Picão e Santana do Paraíso); quatro delas são Unidades de Proteção Integral (Rio Corrente, Pico do Itambé, Mata do Limoeiro e Serra do Cipó) e uma unidade é área reservada à população Indígena (Aldeia Indígena Pataxó) (PIRH, 2010).

É importante ressaltar que existem áreas de reflorestamento dentro da bacia do rio Santo Antônio que estão concentradas na região do Vale do Aço, perto da indústria de fabricação de papel e celulose (VIEIRA, 2006).

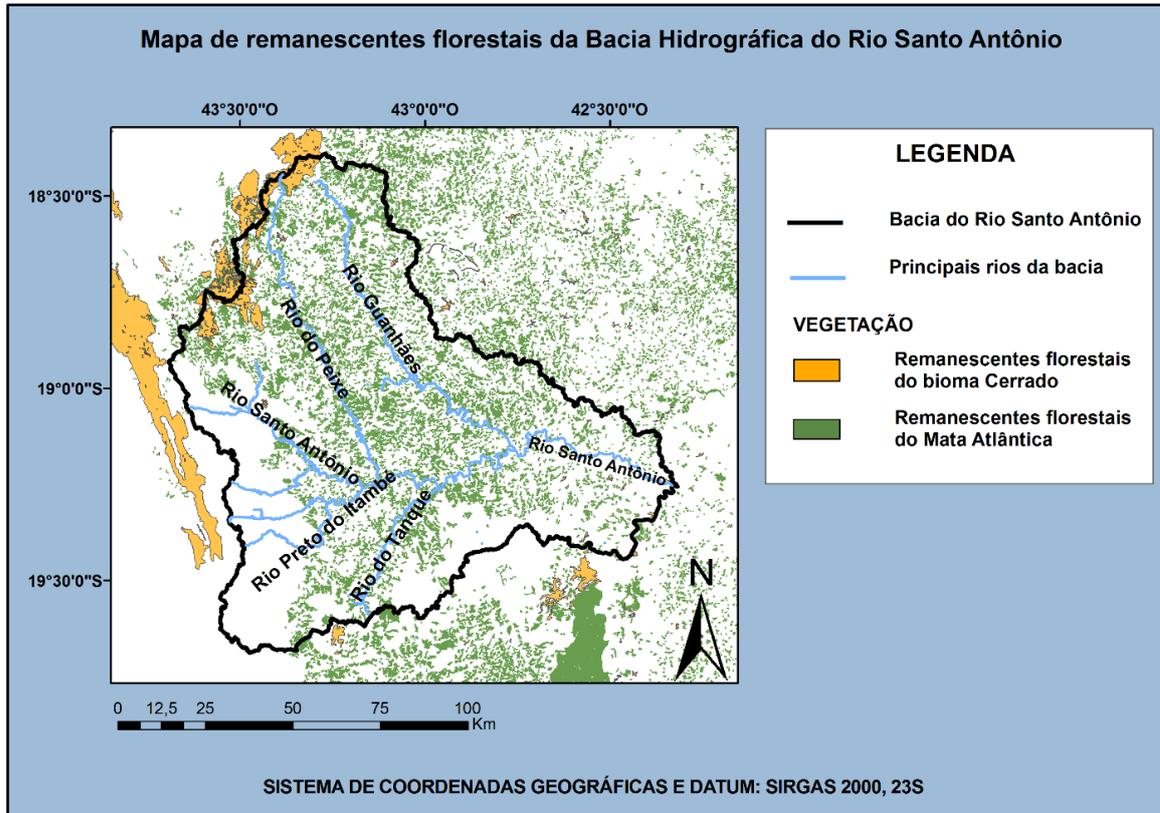


Figura 9: Mapa de vegetação da Bacia Hidrográfica do rio Santo Antônio representado pelos remanescentes florestais dos biomas de mata atlântica e cerrado. (Fonte: INSTITUTO PRÍSTINO, 2019; IDE-SISEMA, 2019).

2.2.8. Uso do solo

De acordo como IBGE (2017) são encontradas na bacia do rio Santo Antônio as seguintes classes de uso do solo: área artificial, silvicultura, vegetação campestre, pastagem natural, corpo d'água continental, mosaico de área agrícola com remanescentes florestais e mosaico de vegetação florestal com atividade agrícola, como mostra a Figura 10.

O mosaico de área agrícola com remanescentes florestais é a classe de uso do solo dominante na bacia estudada. Em escala de menor representatividade, segue o mosaico de vegetação florestal com atividade agrícola.

A silvicultura, é uma atividade muito representativa na região do vale do aço, importante para o suporte da siderurgia e da produção de papel e celulose.

As áreas classificadas como artificiais pelo IBGE (2017) estão relacionadas às sedes municipais e ocupam uma pequena superfície no mapa por se tratarem de pequenos municípios com a faixa urbana pouco desenvolvida.

Desta forma, o mapa de uso do solo da bacia permite observar que as florestas relacionadas ao bioma Mata Atlântica foram intensamente devastadas pela expansão da agricultura e da pecuária.

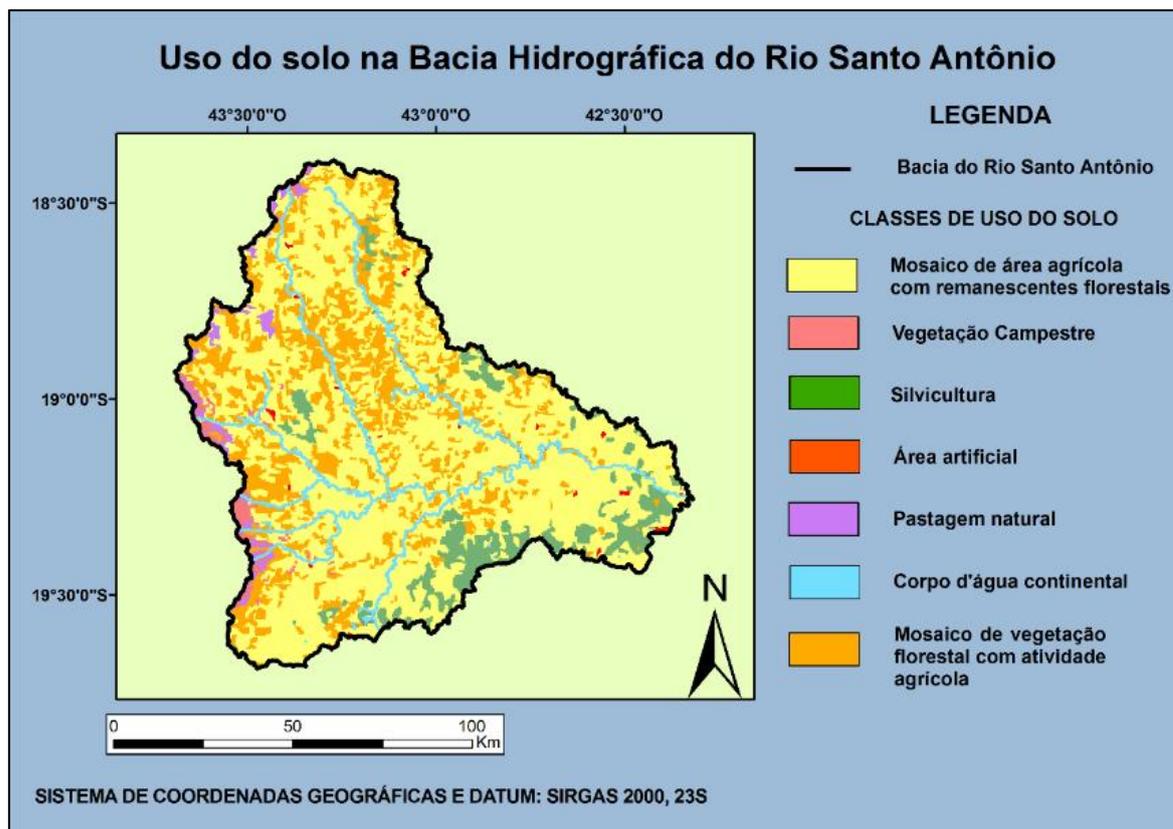


Figura 10: Mapa de uso do solo na Bacia Hidrográfica do rio Santo Antônio. (Fontes: IBGE, 2017; INSTITUTO PRÍSTINO, 2019).

2.2.9. População e sua distribuição

De acordo com o CENSO realizado pelo IBGE em 2010, a bacia do rio Santo Antônio concentra uma população de cerca de 181.421 mil habitantes, sendo que a população urbana concentra 114.180 mil habitantes e a população rural concentra 67.241 mil habitantes. A densidade demográfica na bacia é em média 17 hab/Km² (CBH SANTO ANTÔNIO, 2019).

A população está distribuída em 29 municípios mineiros: Açucena, Alvorada de Minas, Antônio Dias, Belo Oriente, Braúnas, Carmésia, Conceição do Mato Dentro, Congonhas do Norte, Dom Joaquim, Dolores de Guanhães, Ferros, Guanhães, Itabira, Itambé do Mato Dentro, Joanésia, Materlândia, Mesquita, Morro do Pilar, Naque, Passabém, Sabinópolis, Santa Maria de Itabira, Santana do Paraíso, Santo Antônio do Itambé, Santo Antônio do Rio Abaixo, São Sebastião do Rio Preto, Senhora do Porto, Serra Azul de Minas e Serro. Destes municípios, 21 têm as suas sedes municipais na bacia (Figura 11).

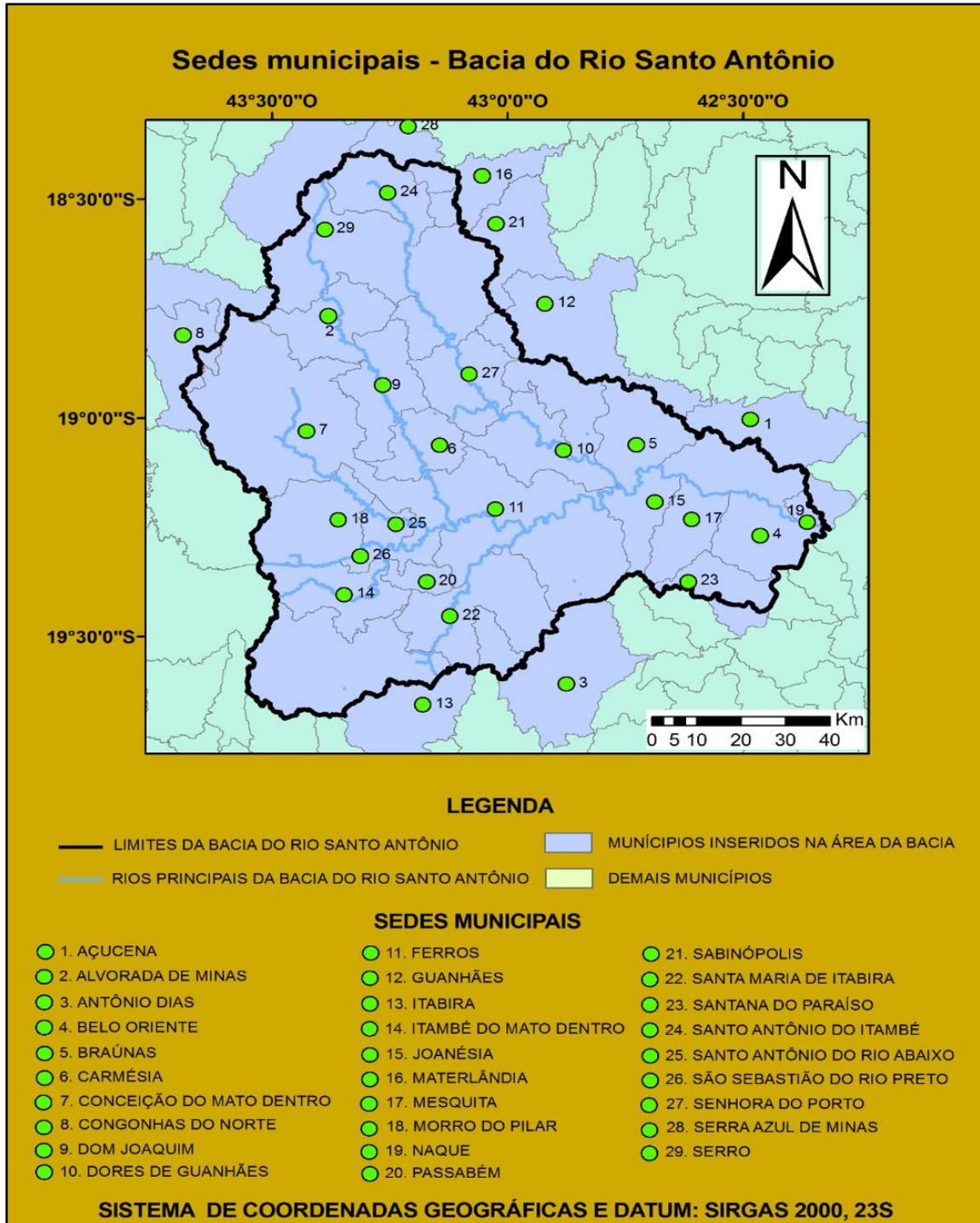


Figura 11: Municípios limítrofes à bacia do rio Santo Antônio. (Fonte: INSTITUTO PRÍSTINO, 2019).

A Tabela 6 apresenta dados sobre a distribuição da população da bacia do rio Santo Antônio por município, discriminando os 29 municípios que constituem a bacia e o número dos habitantes que de fato residiam na área superficial da bacia em 2010.

A tabela informa a projeção do IBGE para o ano de 2020. Viu-se que a população total dos 29 municípios da bacia aumentou de 335.132 habitantes em 2010 para 364.258 em 2020.

Tabela 6: População dos municípios da bacia do rio Santo Antônio em números (Fonte: PIRH, 2010; IBGE, 2020).

Município	Parcela da população residente na área da bacia do rio Santo Antônio de acordo com o Censo 2010 (PIRH, 2010)	Número integral de habitantes dos municípios (PIRH, 2010)	Número integral de habitantes dos municípios (IBGE, 2020)
Açucena	7367	11127	9368
Alvorada de Minas	3482	3482	3605
Antônio Dias	747	9435	9275
Belo Oriente	21369	21369	26994
Braúnas	5208	5208	4769
Carmésia	2550	2550	2646
Conceição do Mato Dentro	14200	14200	17503
Congonhas do Norte	507	5110	5046
Dom Joaquim	4530	4530	4451
Dores de Guanhães	5528	5528	5154
Ferros	11387	11387	9696
Guanhães	2035	29286	34573
Itabira	6018	105159	120904
Itambé do Mato Dentro	2434	2343	2056
Joanésia	5628	5628	4476
Materlândia	506	3636	4436
Mesquita	6493	6493	5546
Morro do Pilar	3474	3474	3153
Naque	5629	5885	7051
Passabém	1801	1801	1633
Sabinópolis	13504	15889	15416
Santa Maria de Itabira	10445	10445	10857
Santana do Paraíso	22765	22765	35369
Santo Antônio do Itambé	4517	4517	3799
Santo Antônio do Rio Abaixo	1753	1753	1760
São Sebastião do Rio Preto	1700	1700	1492
Senhora do Porto	3517	3517	3519
Serra Azul de Minas	781	4307	4292
Serro	12517	12517	20835
TOTAL	182048	335132	364258

2.2.10. Principais atividades da população da bacia do rio Santo Antônio

A economia da região do rio Doce, incluindo a bacia do rio Santo Antônio, está baseada principalmente nos setores de serviços e comércio, agricultura, pecuária, silvicultura, mineração, siderurgia e produção de papel e celulose (CBH DOCE, 2019; CBH SANTO ANTÔNIO, 2019; PIRH SANTO ANTÔNIO, 2019; IBGE, 2020).

No setor de serviços e comércio está concentrado cerca de 44% de todo o PIB registrado da área de estudo (CBH SANTO ANTÔNIO, 2019).

A indústria é o segundo setor que mais contribui para o PIB, representada principalmente pela mineração de ferro e a produção de papel e celulose (CBH SANTO ANTÔNIO, 2019). A mineração é uma atividade muito importante economicamente para região do Santo Antônio, visto que esta atividade já gera renda para alguns municípios e pode ser expandidas nos próximos anos, pois há um significativo volume e diversidade de recursos minerais disponíveis.

A mineração de ferro é uma atividade muito importante e tradicional da região. Na cidade de Morro do Pilar-MG se instalou o primeiro forno catalão da América do Sul, no século XIX, aproveitando-se das jazidas ferruginosas da região. Nos dias atuais, os maiores depósitos estão na Serra da Serpentina e na Serra da Escadinha, próximo às cidades de Conceição do Mato Dentro e Morro do Pilar-MG, respectivamente (GROSSI-SAD *et al.*, 1997).

Outros bens minerais são encontrados na área de estudo. Gemas como água marinha e esmeraldas ocorrem em pegmatitos e nos contatos com corpos ultramáficos. Ouro, platina e paládio ocorrem associados a aluviões. Com vasta utilização na construção civil, o caulim é um recurso também extraído na região (GROSSI-SAD *et al.*, 1997).

A CENIBRA (Celulose Nipo-Brasileira S/A) é uma empresa produtora de papel e celulose e atua em 17 municípios da bacia do rio Santo Antônio, em que o seu principal produto é a celulose branqueada de fibra curta de eucalipto. A sua principal fábrica está localizada no município de Belo Oriente-MG (IBGE, 2020).

Quanto à agricultura cultivada na região da bacia do Santo Antônio, os principais destaques do setor são a cana-de-açúcar, o café e o milho (CBH SANTO ANTÔNIO, 2019; IBGE, 2020).

A pecuária na região da bacia, de acordo com os estudos de (OVIEDO-PASTRANA *et al.*, 2014), é pouco a moderadamente desenvolvida.

A Tabela 7 mostra o processo da evolução industrial que ocorreu na área de estudo a partir do século XX.

Tabela 7: Sequência da evolução industrial na área da bacia do rio Santo Antônio (Fontes: VASCONCELLOS; VALE, 2014).

Processo de industrialização nos municípios da bacia do rio Santo Antônio	
Ano	Situação
1911	A descoberta das jazidas de minério de ferro em Itabira motiva a criação da <i>Brazilian Hematite Syndicate</i> que se torna mais tarde a <i>Itabira Iron Ore Company</i> , empreendimento realizado com o capital de companhias inglesas. Tal investimento motivou um fluxo migratório para a cidade.
1930 - 1939	Início do incentivo à industrialização das cidades brasileiras. Em busca de oportunidades de trabalho, a população rural continuamente migra para as cidades industriais.
1944	Chegada da empresa ACESITA (Companhia de Aços Especiais de Itabira) para o então distrito de Timóteo, na época pertencente à Antônio Dias. A empresa se instalaria inicialmente em Itabira, no entanto, houve a desistência devido ao relevo acidentado da cidade.
1956	Chegada da empresa USIMINAS (Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S/A) para a cidade de Ipatinga, fortalecendo o desenvolvimento da região que posteriormente viria a se chamar Vale do Aço, em virtude da produção de aços especiais.
1957	A <i>Itabira Iron Ore Company</i> foi nacionalizada por Getúlio Vargas, culminando na criação da Companhia Vale do Rio Doce S/A, atual Vale S/A. A empresa foi responsável pela exploração das jazidas de minério de ferro na cidade de Itabira e escoamento da produção para o litoral do Espírito Santo.
1959	Criação do aeroporto internacional de Ipatinga, localizado na cidade de Santana do Paraíso.
1973	Implantação da fábrica da Cenibra (Celulose Nipo-Brasileira S/A) na cidade de Belo Oriente. A empresa nos dias atuais atua em 17 dos 29 municípios da bacia do rio Santo Antônio.
2009	A empresa <i>Anglo-American</i> inicia a instalação de uma mina para extração de minério de ferro nas proximidades da cidade Conceição do Mato Dentro com vista à implementação do projeto Minas-Rio, que pretende transportar o minério da mina em Conceição do Mato Dentro até São João da Barra, litoral do Estado do Rio de Janeiro.

2.2.11. Ações antrópicas ocorridas na bacia do rio Santo Antônio

Durante a campanha de amostragem foram feitos registros referentes aos impactos resultantes de ações antrópicas. Tais ações são decorrentes de três principais fatores:

- À exploração desordenada dos recursos naturais;
- À falta de planejamento para ocupação do solo;
- À desinformação da população sobre um comportamento ambientalmente correto.

São listados abaixo os principais impactos mostrados nas fotografias contidas na Figura 12:

- Remoção de significativa parte da vegetação de Mata Atlântica e Cerrado da região, o que inclui as matas ciliares de vários pontos das drenagens;
- Substituição da vegetação remanescente de Mata Atlântica em prol da Silvicultura (Figura 12-A);
- Lançamento de esgoto doméstico sem qualquer tipo de tratamento (*in natura*) nas drenagens, o que pode ocasionar danos à saúde pública em função do surgimento de doenças associadas à atividade microbiológica;
- O desmatamento desenfreado e as queimadas na vegetação remanescente de Mata Atlântica visando a criação de pastagens e expansão de áreas agrícolas culminando no acelerado processo de erosão do solo (Figura 12 - B, C, D);
- A alteração da dinâmica, vazão e ecossistema aquático da bacia do rio Santo Antônio em função da instalação de hidrelétricas em vários pontos da bacia;
- A introdução de peixes exóticos em pontos específicos das drenagens, o que amplia o impacto gerado à ictiofauna local (VIEIRA, 2006);
- A liberação de uma grande quantidade de sedimentos nos canais e a introdução de metais e semimetais no ambiente aquático ao longo dos anos em decorrência da exploração mineral associada principalmente à mineração de ferro próximo à cabeceira do rio Santo Antônio. Este impacto contribui para o assoreamento progressivo da bacia e possível alteração da natureza química da água nos corpos d'água. Além do mais, a mineração local capta água dos mananciais, acarretando em diminuição da vazão e alteração da dinâmica natural (Figura 12 - E, F).



Figura 12: Registros fotográficos que mostram o resultado de ações que modificaram a Bacia Hidrográfica do rio Santo Antônio. A) Desmatamento da vegetação original da área em função da silvicultura. B) Ravinas e sulcos, estruturas de movimentação do solo. C) Exposição do solo em decorrência da remoção da vegetação local. D) Sulcos e ravinas nas encostas em função das pastagens. E) Minério de ferro presente nos sedimentos das margens do rio Santo Antônio, efeito decorrente da mineração no manancial. F) Barras arenosas presentes na parte central do rio Santo Antônio, próximo à sua desembocadura com o rio Doce, resultado do contínuo assoreamento do leito.

2.3 Contexto Geológico Regional

A bacia do rio Santo Antônio está situada entre a borda leste do cráton do São Francisco e o orógeno Araçuai. As litologias da área de estudo estão representadas na Figura 13.

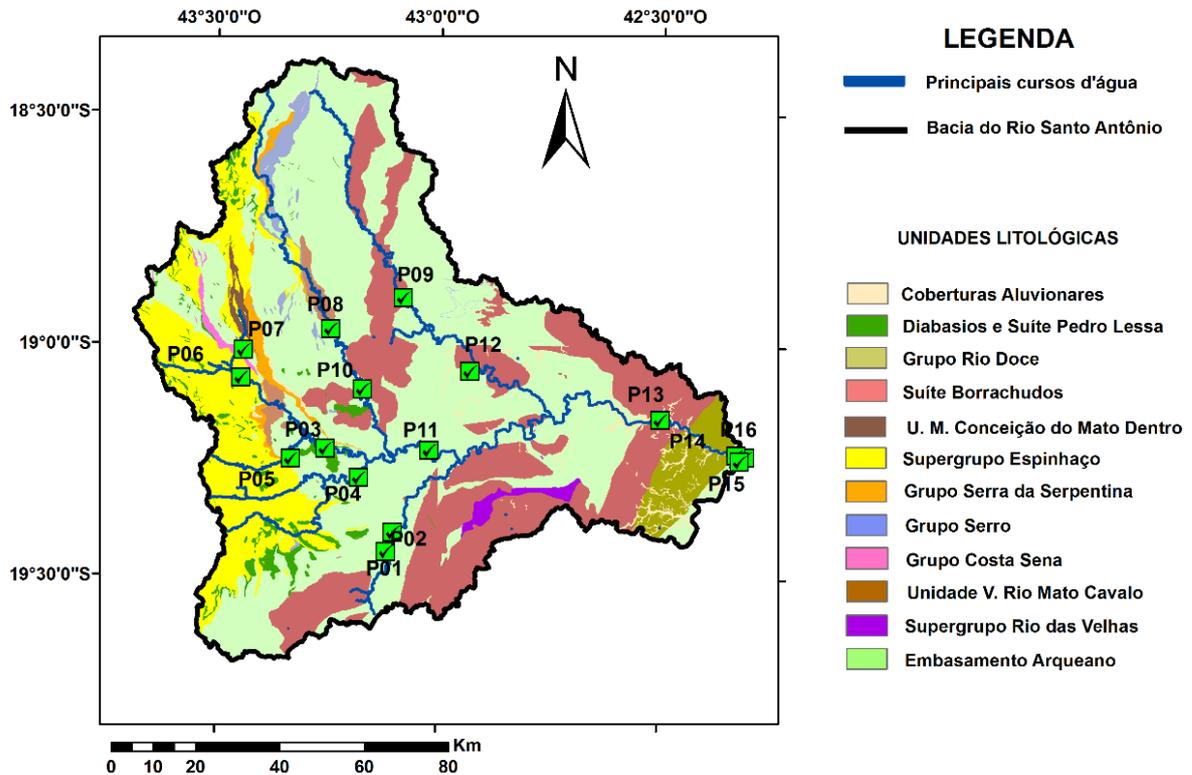


Figura 13: Unidades litológicas que afloram na área da bacia do rio Santo Antônio. Estão indicados os pontos de amostragem do estudo. (Fontes: CODEMIG, 2019; CPRM, 2019; INSTITUTO PRISTINO, 2019).

Na Tabela 8 é apresentada uma descrição resumida das várias litologias aflorantes na área de estudo e que são apresentadas também na Figura 13. Na Tabela 9 são apresentadas as concentrações médias dos elementos selecionados nas principais litologias encontradas na área de estudo.

Tabela 8: Composição litológica da área da bacia do rio Santo Antônio.

Unidade	Sub-divisão da unidade	Descrição das litologias
Embasamento arqueano	Complexo Gouveia	Constituído por rochas aluminosas do tipo S, granodioríticas a graníticas, que variam sobre quantidades acessórias de gnaisses, migmatitos e anfibolitos. A mineralogia principal dessas rochas é composta por microclina, quartzo, plagioclásio e subordinadamente por muscovita, sericita e biotita. Os minerais acessórios predominantes são: apatita, zircão e magnetita (FOGAÇA, 1982; HOFFMANN, 1983; ALMEIDA-ABREU <i>et al.</i> , 1989; GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1997).
	Complexo Basal ou mantiqueira	Constituído por corpos rochosos que abrangem granitoides foliados e granito-gnaisses. Os granitos e gnaisses são constituídos por microclina, quartzo e plagioclásio. Como minerais acessórios nessas rochas encontram-se biotita, zircão e opacos (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1989; OLIVEIRA & LEITE, 2000).
	Complexo Guanhães	Conjunto de gnaisses orto e paraderivados (Complexo Basal - GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1997) e sequências metavulcanossedimentares e formações ferríferas (Grupo Guanhães - GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1997) que se encontram dispersas entre terrenos granito-gnaissicos do tipo TTG (PEDROSA-SOARES <i>et al.</i> , 1994)
	Complexo Dona Rita	Constituído por gnaisses e migmatitos de composição granítica a granodiorítica, em que o leucossoma dessas rochas é formado por microclina, quartzo e plagioclásio, e o melanossoma é dominado por biotita (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1997).
	Complexo Belo Horizonte	Constituído por um embasamento gnáissico formado por rochas da crosta intermediária a supracrustais que foram submetidas a metamorfismo de fácies xisto verde a anfibolito (NOCE <i>et al.</i> , 1994; BRANDALISE & HEINECK, 1999).
Supergrupo Rio das Velhas	Grupo Itabira; Formação Moeda	As formações ferríferas apresentam intercalações entre níveis quartzosos e níveis ferruginosos de hematita especular e magnetita. (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1990; TEIXEIRA <i>et al.</i> , 1996).
	Grupo Caraça, Formação Batatal e Moeda	Constituído por quartzitos que apresentam níveis ferruginosos e se encontram encaixados em rochas metabásicas e anfibolitos. Os xistos são compostos por quartzo, biotita, sillimanita, muscovita e opacos. Já os paragneisses são encontrados intemperizados, alternando níveis silte-arenosos e níveis arenosos (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1990; OLIVEIRA & LEITE, 2000).
Unidade vulcanossedimentar Rio Mata Cavalo		A Sequência vulcanossedimentar Rio Mata Cavalo compreende rochas metaultramáficas, metamáficas, metassedimentares químicas, quartzitos e mica xistos em que a composição química está relacionada com as séries toleíticas-komatíticas de um <i>greenstone belt</i> . (DUSSIN, 1985).
Grupo Costa Sena		Compreende rochas xistosas claras que foram formadas a partir de rochas de aspecto filítico e são caracterizadas pela ausência de quartzo. (FOGAÇA, 1982; DUSSIN, 1985; GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1997).
Grupo Serro		Composto por rochas metaultramáficas que apresentam intercalações metamórficas e/ou metassedimentares, representadas na área de estudo por três pequenas massas rochosas (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1997).

Grupo Serra da Serpentina	Unidade Quartzítica	Composta por quartzitos micáceos com intercalações de filitos, xistos e metaconglomerados (DUSSIN, 1985; CHAPADEIRO <i>et al.</i> , 1987; GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1997).
	Unidade Itabirítica	Composta por itabiritos com intercalações de quartzitos e clorita xistos; (DUSSIN, 1985; CHAPADEIRO <i>et al.</i> , 1987; GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1997).
	Unidade Filítica	Composta por quartzo-muscovita filitos até xistos com intercalações quartzíticas. (DUSSIN, 1985; CHAPADEIRO <i>et al.</i> , 1987; GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1997).
Supergrupo Espinhaço	Formação Sopa-Brumadinho	Unidade Serra do Lobo: representada por quartzitos de granulação fina a grossa, intercalados com metaconglomerados (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1997).
		Unidade Rio Preto: representada por quartzitos finos, micáceos e laminados, contendo intercalações de muscovita-quartzo xisto, quartzito hematítico, quartzito feldspático e quartzito carbonático (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1997).
	Formação Galho do Miguel	Unidade Itambé do Mato Dentro: representada por quartzitos finos laminados em que as laminações são constituídas por filmes sericíticos e ferruginosos (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1997). Composta por faixas ocupadas por quartzitos finos que podem apresentar níveis feldspáticos (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1997).
Unidade Metaígneia Conceição do Mato Dentro		Constituída por rochas silicosas de natureza vulcânica a subvulcânica composta por meta-riolitos, metadacitos e microgranitos com evidência de milonitização (HERRGESELL 1984; GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1997).
Suíte Borrachudos e Granito Boa Vista		Constituídas por plutons graníticos anarogênicos que se instalaram no Complexo Guanhões com composição que varia de quartzo-monzoníticas a álcali-graníticas (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1990; DUSSIN <i>et al.</i> , 1993b; ALKMIM <i>et al.</i> , 2006; SILVA <i>et al.</i> , 2005). Já os Granitos Boa Vista são do tipo duas micas, foliados e estão intrusos em gnaisses do Grupo Guanhões (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1990, 1997).
Grupo Rio Doce	Formação São Tomé	Representada por quartzitos, xistos e biotita-quartzo gnaisses relacionados com a base do Grupo Macaúbas; (PEDROSA-SOARES <i>et al.</i> , 1994; OLIVEIRA & LEITE, 2000; VIEIRA, 2007)
	Formação Tumiritinga	Constituída por rochas gnáissicas compreendidas na região de Barra de Cuieté; e Formação Figueira, que abriga rochas gnáissicas bandadas e xistos (PEDROSA-SOARES <i>et al.</i> , 1994; OLIVEIRA & LEITE, 2000; VIEIRA, 2007).
Unidades Metabásicas		Compreendem diabásios e as rochas da Suíte metabásica Pedro Lessa. Os diabásios são verificados em toda área de estudo e se encontram intrudidos em rochas do Supergrupo Espinhaço, rochas dos complexos Basal e Dona Rita e da Suíte Borrachudos (GUIMARÃES, 1992; GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1997). A Suíte Metabásica Pedro Lessa compreende metadiabásios, anfibolitos, diques e soleiras de diabásios e gabros (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1997).
Coberturas Fanerozoicas e Aluvionares	Coberturas de canga	Resultantes de processos climáticos e erosivos que atuaram sobre os itabiritos da Serra do Espinhaço (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1997; OLIVEIRA & LEITE, 2000):
	Coberturas fanerozoicas	Resultante do agrupamento dos sedimentos de origem eluvionar, coluvionar e aluvionar (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1997; OLIVEIRA & LEITE, 2000).

Tabela 9: Composição química média das principais litologias da área da bacia do rio Santo Antônio. (Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃ - compreendendo o ferro total Fe₂O₃ e o FeO, MgO, MnO, Na₂O, P₂O₅ e TiO₂ em %; Co, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn em ppm).

Unidade	Rocha	Al ₂ O ₃	CaO	Co	Cr	Cu	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	Ni	P ₂ O ₅	Pb	Ti	Zn	Observação
C.B.A - Complexo Gouveia	Granito com intercalações migmatíticas	13,83	0,82	-	6	-	1,65	5,42	0,29	0,02	3,31	3	0,08		0,2		Amostra localizada nas coordenadas 7.913.300N/657.800E (HERGESELL, 1984)
C.B.A - Complexo Basal	granodiorito	17	4,2	-	-	31	3,66	3,6	0,5	0,06	5,1	-	0,15	284	0,13	256	Amostra GU-100 do Batólito Guanhões próximo a Senhora do Porto (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1989)
Suíte Borrachudos	ortognaisses	12,13	1,52	-	-	-	4,12	4,77	0,16	0,05	2,9	-	-	30	0,4	78	Amostra AK048 de OLIVEIRA (2002)
Suíte Borrachudos	granitos	11,7	0,82	-	-	2-	1,94	6,3	0,04	0,02	0,9	-	0,14	23	0,21	160-	Amostra GU-P-111B do Plutonito Senhora do Porto (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1989)
Suíte Borrachudos	granitos	13,72	0,61	-	2	2,8	2,39	5,9	0,01	0,02	5,19	-	0,01	109	0,1	40	Amostra 5218 coletada em Dolores de Guanhões - (FERNANDES <i>et al.</i> , 1994)
Supergrupo Espinhaço	filito hematítico	17,96	1,67	-	48	40	26,64	7,46	2,03	0,06	0,13	11	1,3	-	3,96	-	Amostra MR-361 de HERGESELL (1984)
Grupo Serra da Serpentina	Itabirito	1,4	0,13	136	6	3	49,39	0,1	0,1	0,02	0,1	12	0,01	1	1,25	24	Amostra FS-SS-3 de DUSSIN (1985)
Grupo Serra da Serpentina	filito hematítico	13,49	1,87	157	10	57	16,54	4,68	1,34	0,13	0,42	32	0,45	11	2,41	72	Amostra FS-SS-5 de DUSSIN (1985)
Rochas metabásicas e Suíte Pedro Lessa	metadiabásios	13,56	9,35	90	147	88	13,52	0,68	6,1	0,21	2,51	97	0,26	-	2,13	126	Média entre 8 amostras de metadiabásios [M96, 396, 79, 376-A, 9, 7, 328 e 393-A], GUIMARÃES (1992)
Rochas metabásicas e Suíte Pedro Lessa	metabasitos	13,7	9,7	56	295	95	20	1,1	5,6	0,28	2,1	132	0,52	21	3,6	82	Amostra MI04 de (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1989)

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas as metodologias empregadas para a realização deste estudo. O conteúdo metodológico foi dividido em três partes para simplificar a compreensão do desenvolvimento da pesquisa e dos procedimentos das etapas analíticas realizadas em laboratório. O projeto foi desenvolvido em três fases principais: pré-campo ou gabinete, trabalho de campo e pós-campo ou laboratório e gabinete.

A fim de integrar e organizar as atividades necessárias para a realização da pesquisa, elaborou-se um fluxograma estabelecendo o objetivo a ser alcançado por cada uma das etapas do projeto, sendo este representado pela Figura 14.

3.1. Fase Pré-Campo / Gabinete

O projeto em questão, pautado na compreensão dos aspectos geoquímicos da bacia em busca de uma gestão eficiente dos recursos hídricos da bacia do rio Santo Antônio, teve seu início a partir de uma revisão bibliográfica sobre a área a ser estudada (*e.g.* GROSSI-SAD *et al.*, 1989, 1990, 1997; VIEIRA, 2006, 2009; SIQUEIRA, 2019; GASPAR, 2021), sobre o comportamento dos elementos químicos no ambiente, com ênfase nos sistemas fluviais (*e.g.* SALOMONS 1995, 1998; REIMANN & CARITAT, 1998; FORSTNER, 2004; SALOMONS & FORSTNER, 2010; 2012) e regulamentações ambientais (*e.g.* CONAMA, 2005; CONAMA, 2012).

Para a determinação dos pontos de amostragem, utilizaram-se mapas rodoviários, topográficos e geológicos da região junto às imagens dos aplicativos *Google Maps*® e *Google Earth Pro*®. Os mapas temáticos da área de estudo foram confeccionados com o auxílio do *software ArcGis10*®. Desta forma, foram determinados dezesseis pontos considerados essenciais para a coleta de amostras de água e sedimentos, sendo que os principais critérios para a escolha foram: envolver os principais rios tributários da bacia; cobrir diferentes pontos do rio principal desde sua cabeceira à sua desembocadura; cobrir áreas urbanas e áreas pouco alteradas pela ação antrópica; e por fim, cobrir áreas proximais à mineração.

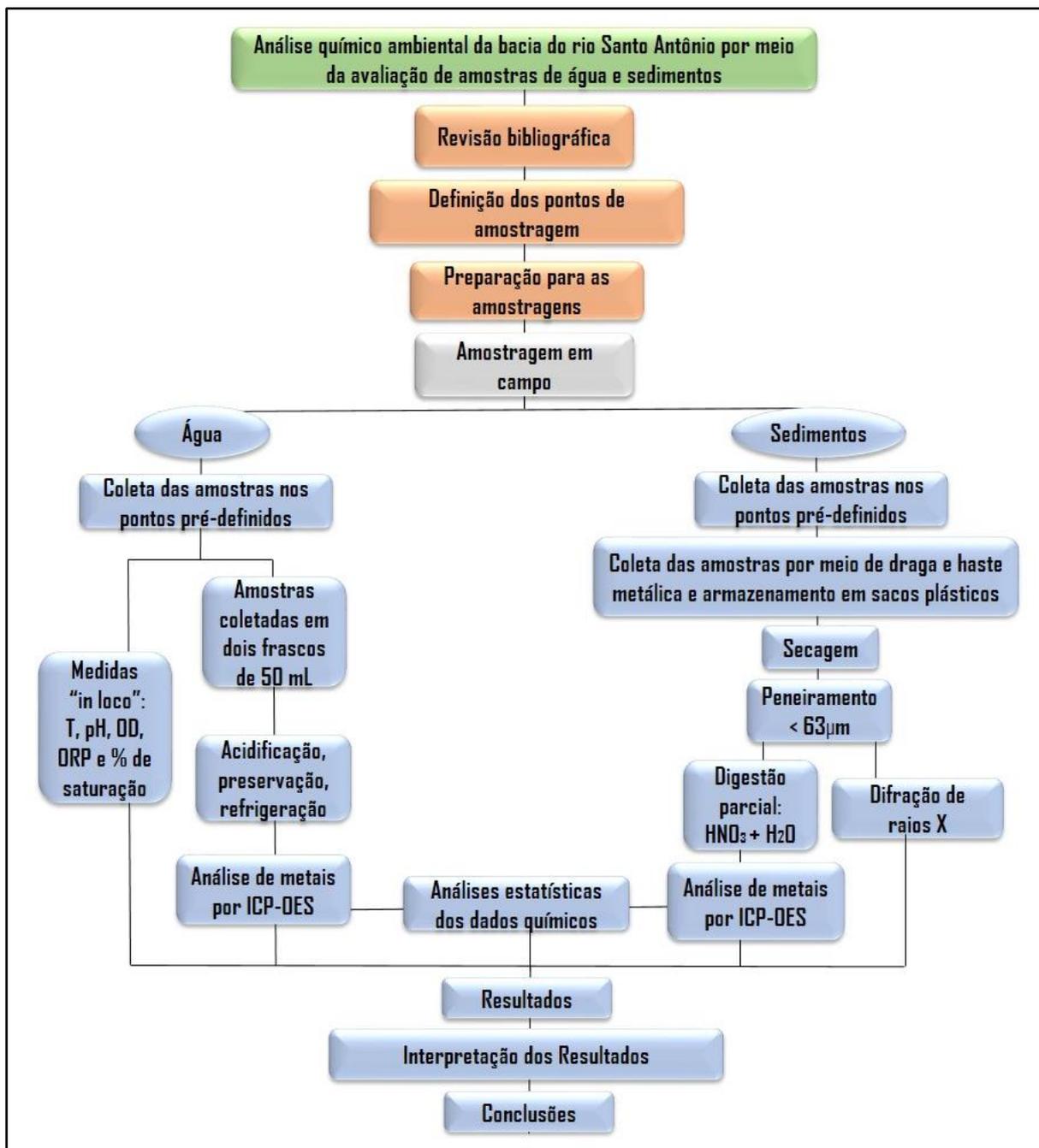


Figura 14: Fluxograma da metodologia utilizada neste trabalho da avaliação química-ambiental executada na bacia do rio Santo Antônio.

3.2. Trabalho de Campo

Entre os dias 23/09/2019 e 25/09/2019 foi realizada a etapa de amostragem na bacia do rio Santo Antônio, durante o período de estiagem.

A tabela com a descrição e os dados levantados encontra-se no (Apêndice 1) com as seguintes informações: tipo de amostra coletada, nomenclatura do ponto de amostragem, coordenadas geográficas dos pontos na bacia e a localização do ponto na bacia.

A Figura 15 apresenta a localização dos pontos de amostragem na bacia, sendo que estes pontos podem ser verificados sob um mapa geológico no capítulo 2, tópico 3 - Figura 13.

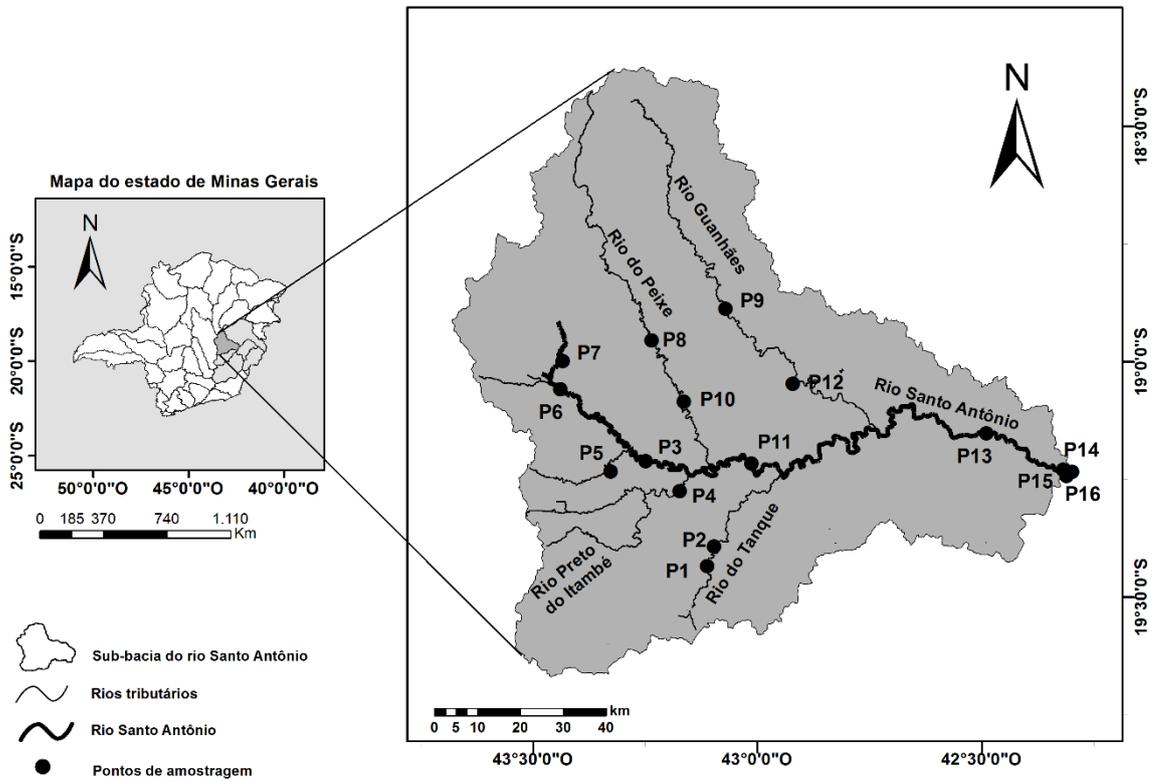


Figura 15: Localização dos pontos de amostragem na bacia do rio Santo Antônio.

Para a orientação em campo e a localização dos pontos de amostragem utilizou-se um GPS - *Global Positioning System*, da marca *Garmin*.

Os registros fotográficos dos locais de coleta e demais aspectos interessantes da área de estudo foram obtidos com uma câmera fotográfica de um telefone celular da marca LGk40S. As anotações e dados de campo foram realizadas em tabelas pré-fabricadas usando uma prancheta e uma caderneta de campo.

Utilizou-se um medidor portátil manual, o Multiparâmetro modelo *Myron L. Company* da marca *Ultrameter II, 6P* adaptado com um eletrodo de Ag/AgCl em solução de KCl saturado, e o oxímetro *Hq40d* da marca *Hach*, para coletar dados referentes aos seguintes parâmetros “*in loco*”:

- Potencial Hidrogeniônico (pH);
- Oxigênio dissolvido;
- % de saturação de oxigênio;
- Potencial de Oxidação/Redução (ORP);
- Temperatura da água.

Em cada ponto de amostragem, foram coletadas amostras de água e sedimentos para realização das demais análises.

A coleta das **amostras de água** ocorreu segundo o guia escrito por BRANDÃO *et al.*, (2011) com adaptações à coleta nos mananciais. Em cada ponto de amostragem foram coletadas duas amostras em frascos de plástico de 50 mL, contra a corrente, ambientando-os três vezes com a água do rio, sendo que os frascos foram previamente identificados e esterilizados.

As amostras de água coletadas foram acidificadas com três gotas de HNO₃ ultrapuro concentrado até atingir o pH < 2 e preservadas a 4°C em caixas de isopor e depois depositadas na geladeira até a etapa de filtragem.

A coleta das **amostras de sedimentos** também seguiu a metodologia descrita no guia escrito por BRANDÃO *et al.* (2011) com adaptações em função das peculiaridades apresentadas durante a coleta nos mananciais. As amostras de sedimentos de fundo de rio foram coletadas com um amostrador na forma de uma concha de aço inoxidável e armazenadas em sacos plásticos de polietileno até a etapa de secagem do material.

3.3. Fase Pós Campo/Laboratório

Após a etapa de campo, as amostras dos materiais coletados foram preparadas para realização das análises químicas. A preparação das amostras ocorreu nos laboratórios de Saneamento Ambiental PROAMB/UFOP e Ferrovias e Asfalto/Departamento de Engenharia Civil - EM/UFOP.

As análises químicas de água foram realizadas nos laboratórios do Núcleo de Geoquímica Ambiental (NGqA) do CPMTC/IGC/UFMG, enquanto as análises químicas de sedimentos foram realizadas nos laboratórios de Geoquímica Ambiental do DEGEO/EM/UFOP. A composição mineral foi determinada no laboratório de Raios X/DEMIN/UFOP.

3.3.1. Preparação

A filtragem das **amostras de água** ocorreu em filtros de membrana de 0,45 µm (Milipor), separando os resíduos sólidos suspensos. Em seguida, o conteúdo passante do processo foi encaminhado para leitura de quatorze elementos (Mg, Al, Ca, Cr, Fe, Co, Cu, Cd, Ti, Mn, Ni, Zn, Ba e Pb) por meio do Espectrofotômetro de Emissão Atômica com Fonte de Plasma Indutivamente Acoplado de Argônio (ICP-OES), aparelho modelo M 4165 – *Spectroflame – Spectro*, no laboratório do Núcleo de Geoquímica Ambiental (NGqA) do CPMTC/IGC/UFMG.

A secagem das **amostras de sedimentos** ocorreu em temperatura ambiente. Com os sedimentos secos, estes foram encaminhados ao laboratório de Ferrovias e Asfalto/

Departamento de Engenharia Civil - Escola de Minas/ Universidade Federal de Ouro Preto para a etapa de peneiramento, que consiste em separar as amostras em diferentes frações granulométricas (areia muito grossa, grossa, média, fina, muito fina e silte/argila) por meio de um sistema de peneiras de nylon, conhecida como série de Tyler (Tabela 10). O material passante na peneira de #230 ou 63 μ m foi utilizado para análise dos elementos por Difração de Raios X e ICP-OES.

Tabela 10: Correlação entre a escala WENTWORTH (1922) e as aberturas das peneiras da Série de Tyler, em Mesh e o diâmetro em mm².

Granulometria (WENTWORTH, 1922)	Aberturas	
	Ø (mm)	ABNT/Mesh
Areia muito grossa	1	18
Areia grossa	0,5	35
Areia média	0,25	60
Areia fina	0,125	120
Areia muito fina	0,063	230
Silte/Argila	Fundo	Fundo

Utilizou-se 1,0g da fração fina do material (<63 μ m) para determinação mineralógica por análise de Difração de Raios X, utilizando o difratômetro do modelo *X'pert3 powder* da *PANalytical* equipado com tubo de cobre (radiação Cu-K α) do Laboratório de Microscopia Ótica e Difração de Raios X do DEMIN/UFOP na condição de varredura em arranjo 2 θ (5° a 90°).

Uma outra alíquota de 0,5g deste material foi utilizada para a análise química, sendo esta direcionada para a determinação dos metais, que está contida na fração silte-argilosa (FÖRSTNER 1989).

Após a pesagem de 0,5 g de cada uma das 16 amostras de menor fração granulométrica (<63 μ m), realizou-se a digestão parcial do material para extração de metais do sistema com 7,0 mL de HCl concentrado e 2,3 mL de HNO₃ (água régia - HCl/HNO₃, 3:1). Em seguida, as amostras foram colocadas em temperatura ambiente por 16h e depois aquecidas por 2h em uma placa com temperatura de 110°C. Na sequência as amostras foram filtradas com um papel filtro quantitativo, sendo que os materiais passantes nos filtros foram coletados em frascos volumétricos de 50 mL, transferidos para frascos de polietileno devidamente identificados e armazenados a 4°C.

As concentrações dos elementos (As, Ba, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Mo, Ni, Sc, Sr, Th, V, Y, Zn, Mn, Sb, Al, Fe, Ca, K, Mg, Na, Zr, Pb, P, S, Si e Ti) foram determinadas no laboratório de Geoquímica Ambiental (LqGA) do DEGEO/EM/UFOP utilizando Espectrometria de

Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES, aparelho da marca *Spectro*, modelo *Ciros*; e o material de referência padrão para validar as amostras é o GBW07406).

3.4. Fase Pós Campo/Gabinete

3.4.1. Análise estatística aplicada a estudos geoquímico-ambientais

Para a interpretação dos dados obtidos nas análises químicas, estes foram tratados estatisticamente. A utilização de métodos estatísticos em análises geoquímico-ambientais tem se provado uma ferramenta eficaz para interpretação dos dados coletados.

3.4.2. Tratamento Estatístico

Os resultados das análises de água e sedimentos foram tratados estatisticamente com o auxílio do *software Minitab 2019*® para gerar informações sobre organização, anomalias e possíveis correlações entre os dados, sendo submetidos a análises univariadas e bivariadas.

O teste univariado boxplot no *software* citado utilizou dados logtransformados de modo que fossem atenuados os efeitos de possíveis anomalias (ANDRIOTTI, 2010; FILHO, 2014; LIMA, 2020).

Os resultados obtidos pela análise são figuras expressadas em forma de diagramas “boxplot”, que geraram informações importantes sobre os elementos metálicos encontrados na bacia.

Os mesmos dados foram submetidos também a um tratamento estatístico bivariado, o teste não-paramétrico de Pearson. Tanto para água quanto para os sedimentos, os resultados gerados foram expressos na forma de duas matrizes, sendo que a primeira utilizou dados sem qualquer tipo de alteração prévia, e a segunda matriz, os dados logtransformados.

3.4.2.1. Tratamento estatístico univariado

Utilizou-se neste estudo a análise estatística univariada para estudar a distribuição ou o comportamento de uma variável em meio a uma população amostral, utilizando o diagrama boxplot.

Boxplot é um método estatístico que tem como principais vantagens a visualização da distribuição dos dados e seus dados estatísticos, como assimetria e *outliers*, além de ser um método robusto de definição do *cut-off* para *outliers* que podem afetar parâmetros estatísticos na análise clássica, como média e mediana (ANDRIOTTI, 2010).

A construção do diagrama funciona da seguinte maneira: a caixa central contém 50% dos dados (diferença entre o 1º e o 3º quartis, da base ao topo, entre a faixa de 25% e 75% da

população amostral). Os *whiskers* representam a diferença entre o ponto máximo e mínimo (que pode variar até 1,5 vezes a amplitude interquartil), e os *outliers* ou anomalias, positivos ou negativos, extrapolam os limites máximos e mínimos. Na Figura 16, são mostrados os conceitos descritos acima (ANDRIOTTI, 2010).

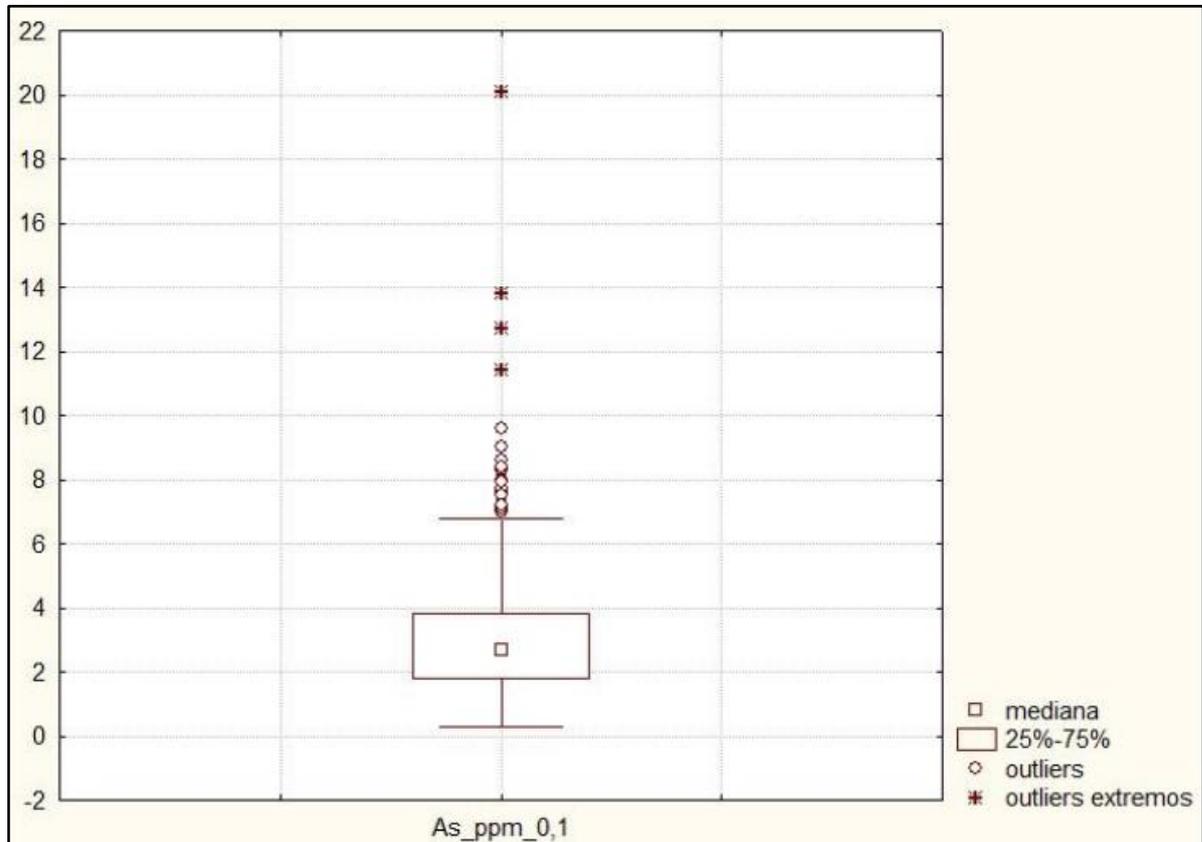


Figura 16: Exemplo de diagrama boxplot (Fonte: ANDRIOTTI, 2010).

3.2.4.2. Tratamento estatístico bivariado

A análise bivariada, é uma ferramenta que permite avaliar o comportamento e a distribuição de duas variáveis de forma simultânea e interpretar o grau de sua correlação.

A definição de correlação de Pearson pode ser expressa como a medida de associação linear entre duas variáveis quantitativas (ANDRIOTTI, 2010; FILHO, 2014). O coeficiente de correlação de Pearson é representado pela letra r , e apresenta variação entre -1 e 1. Quanto mais próximo do valor 1, maior é a correlação entre as variáveis. Quanto mais próximo do valor zero, menor é a correlação entre as variáveis (Figura 17) (ANDRIOTTI, 2010; FILHO, 2014).

$R > 0,7$	Positiva
$-0,7 < R < 0,7$	Ausente
$R < -0,7$	Negativa

Figura 17: Avaliação numérica da correlação entre duas variáveis.

A Figura 17 infere que uma correlação positiva ($R > 0,7$) indica que quando a concentração do elemento químico “x” aumenta, a concentração do elemento químico “y” também aumenta. Uma correlação negativa ($R < 0,7$) indica que quando a concentração do elemento químico “x” aumenta, a concentração do elemento químico “y” diminui (ANDRIOTTI, 2010; FILHO, 2014).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Dados físicos e químicos relacionados as amostras de água

Ao analisar a água de um manancial, são obtidas informações sobre as condições atuais do recurso hídrico, sejam estas condições físicas, como exemplo o pH e o Eh, bem como condições químicas, como a composição e a distribuição dos componentes. Portanto, estes são importantes parâmetros que permitem caracterizar sua qualidade. A seguir, são apresentados os dados obtidos em amostras de água coletadas no período de estiagem na bacia do rio Santo Antônio. Estes dados são comparados com os valores limites estipulados pela resolução CONAMA 357/2005, para a sua classificação, avaliação da qualidade, uso permitido e a estipulação das contribuições naturais e antropogênicas pelo lançamento de efluentes.

4.1.1. Parâmetros físicos e químicos “*in loco*”

Os dados obtidos por meio das análises físicas e químicas da água estão disponíveis (Apêndice 2). A seguir, os valores de pH, ORP e Eh, Oxigênio dissolvido e Temperatura da água serão apresentados e discutidos.

4.1.1.1. pH

Os valores de pH em todos os pontos amostrados da bacia estão dentro dos limites estabelecidos pela resolução CONAMA 357/2005 para águas de classe 2, definidos entre 6 e 9. Os valores variam entre o mínimo de 7,31 (ponto MG15) e o máximo de 8,29 (ponto MG03, Figura 18).



Figura 18: Ponto de amostragem MG03, situado na cidade de Santo Antônio do Rio Abaixo-MG. O pH neste local é de 7,31, estando entre os limites estabelecidos pela resolução CONAMA 357/2005 para cursos d'água classe 2. O Eh encontrado no local é de 0,1476 V.

4.1.1.2. ORP e Eh

Os valores de ORP (Potencial de Oxirredução) medidos nos pontos monitorados apresentaram variação entre -0,0026 V (Ponto MG15) e -0,0524 V (Ponto MG03).

Realizou-se a conversão do potencial redox (ORP) para Eh. Dessa forma, como o instrumento de medição utilizado como referência para o parâmetro Eh é o eletrodo padrão de hidrogênio, adicionou-se o valor de 200 mV às medições de ORP em cada ponto amostrado (YSI, 2001).

O pH e o Eh são parâmetros que controlam as condições físicas e químicas de um sistema aquático. Com a obtenção destes parâmetros é possível prever os estados iônicos das substâncias dissolvidas no ambiente (SALOMONS, 1998).

4.1.1.3. Temperatura

Os dados obtidos nos dezesseis pontos de coleta mostram que a temperatura da água variou entre 20,4°C a 27,7°C. Esta oscilação dos valores está atrelada a um conjunto de fatores tais como o horário da coleta das amostras, profundidade, velocidade do fluxo, confluência entre drenagens e outros.

4.1.1.4. Saturação de oxigênio / Oxigênio dissolvido

A porcentagem de saturação de oxigênio na água apresentou uma variação entre 85,1% e 109,7%, com a exceção do ponto MG07 (Figura 19), em que a saturação era de 23,4. Nesse sentido, o ponto MG07, com o valor de 1,88 mg/L de oxigênio dissolvido na água, é o único ponto amostrado em que a concentração está abaixo de 5 mg/L, limite mínimo estabelecido pela resolução CONAMA 357/2005. Isto mostra uma condição neste local, conhecido como hipóxia, o que pode inviabilizar a presença de organismos aeróbicos como peixes e plantas, indicando um desequilíbrio do ecossistema (CETESB, 2020).

A explicação para a baixa concentração de oxigênio dissolvido no ponto MG07 é atribuída à sua localização, situada na zona urbana da cidade de Conceição do Mato Dentro-MG. Neste local, o esgoto doméstico é lançado '*in natura*' no manancial e não há fluxos turbulentos, o que dificulta a aeração da água.



Figura 19: Ponto de amostragem MG03, situado na cidade de Conceição do Mato Dentro-MG. Neste local a concentração de oxigênio dissolvido na água é de $1,88 \text{ mg/L}^{-1}$, estando abaixo do limite estabelecido pela resolução do CONAMA 357/2005 para águas cursos d'água classe 2.

4.1.2. Composição química das amostras de água

As análises químicas laboratoriais geraram informações importantes a compreensão da origem, mobilidade, deposição e interação dos elementos nos sistemas fluviais da bacia. Estes resultados se encontram disponíveis no (Apêndice 3).

Os dados obtidos a partir da análise química indicam que nove (Cr, Co, Cu, Cd, Ti, Ni, Zn, Ba e Pb) dos quatorze elementos analisados (Mg, Al, Ca, Cr, Fe, Co, Cu, Cd, Ti, Mn, Ni, Zn, Ba e Pb) apresentaram concentrações abaixo do limite de detecção.

A discussão sobre o comportamento dos elementos em amostras de água das drenagens se baseia em elementos com concentrações acima do limite de detecção do aparelho: Al, Mg, Ca, Fe e Mn. Os elementos serão divididos em elementos maiores (Ca, Mg, Fe e Al) e elementos traços (Mn). A seguir, serão apresentados os resultados obtidos pelas análises químicas das amostras água da bacia.

4.1.2.1. Elementos maiores e traços na água

Na Figura 20 verifica-se a distribuição das concentrações dos elementos maiores (Ca, Mg, Fe e Al) e traços (Mn) da nascente até a foz da bacia durante o período de estiagem do ano de 2019, na forma de gráfico.

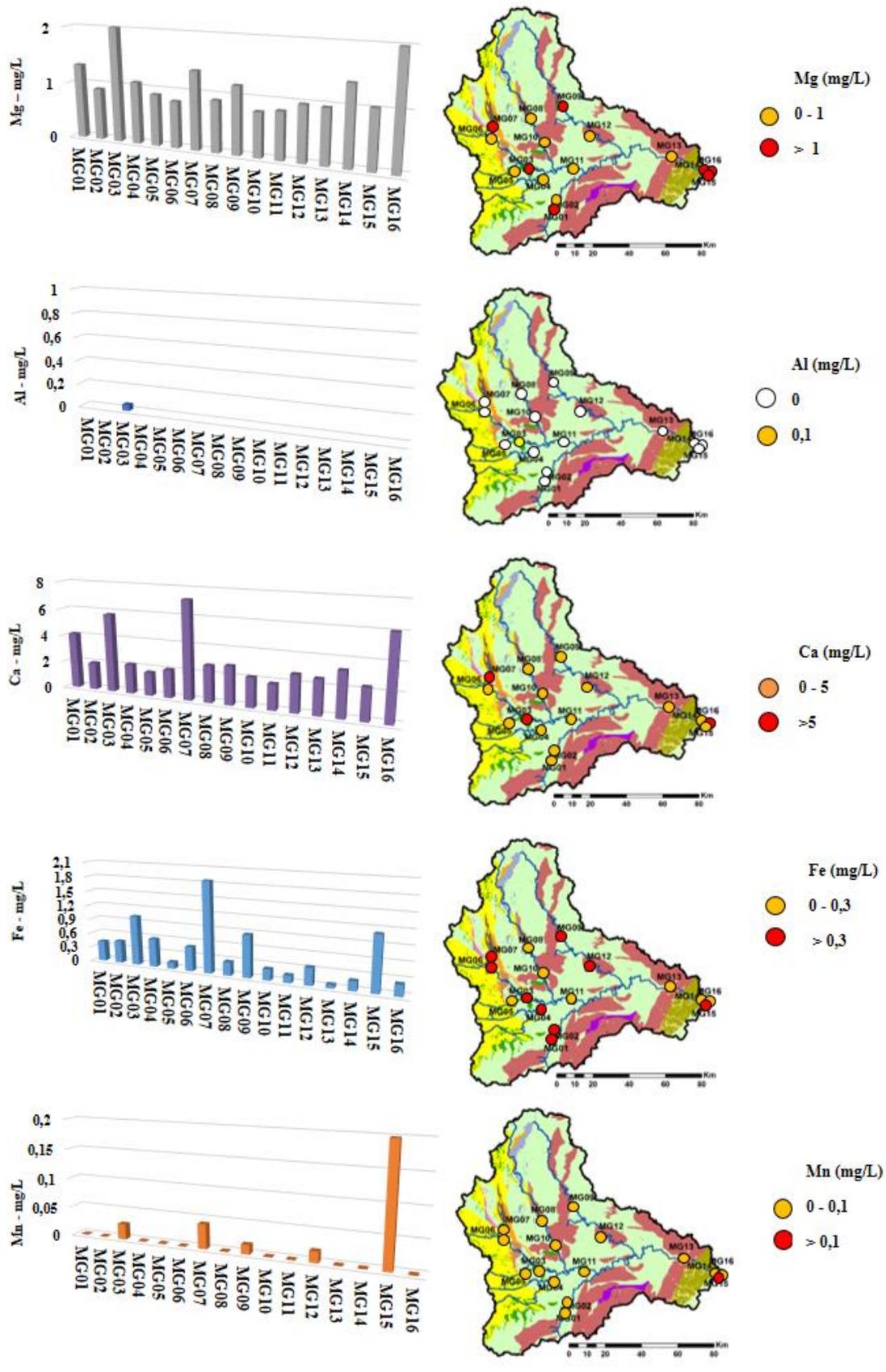


Figura 20: Mapa e gráficos que apresentam a evolução das concentrações em (mg/L) dos elementos presentes na água ao longo da bacia do rio Santo Antônio.

No ponto MG15 verificou-se o maior pico de concentração do citado elemento (Figura 21). Para compreensão da distribuição regional dos elementos na água, os resultados foram apresentados em um mapa, também verificado na Figura 20. Este mapa apresenta a evolução das concentrações dos íons ao longo da bacia do rio Santo Antônio.

A discussão sobre a evolução dos elementos na bacia e a presença dos íons nos mananciais amostrados é pautada pelo conhecimento litológico local que foi apresentado neste volume e por gráficos Eh x pH (Figura 22) que levam em consideração as condições dos elementos analisados diante das oscilações dos parâmetros que ocorrem em sistemas aquáticos (TAKENO, 2005).

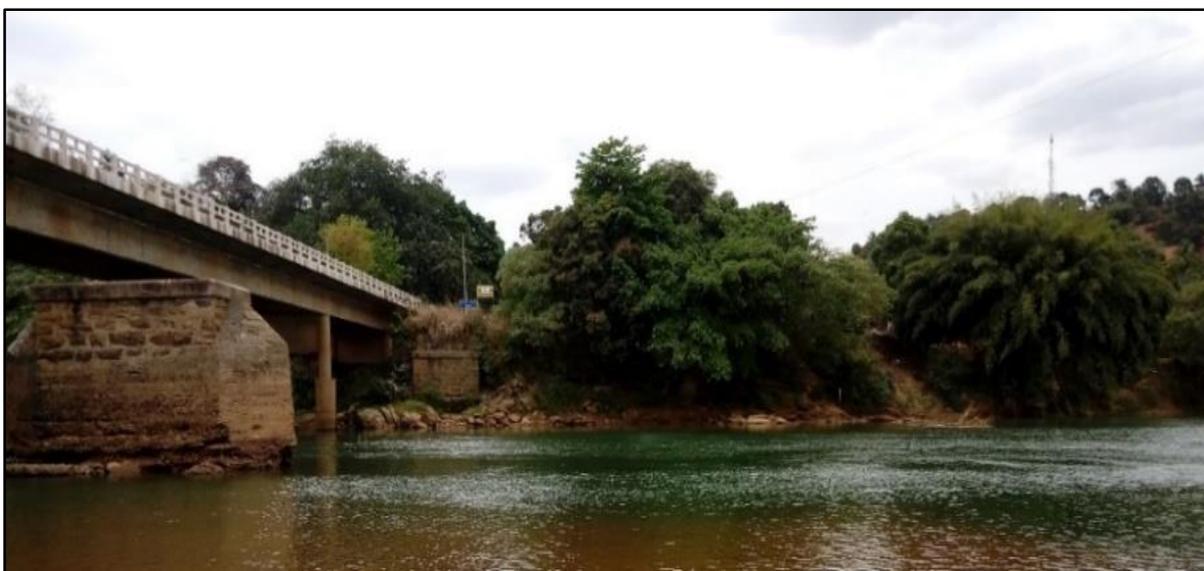


Figura 21: Ponto de amostragem MG15, no rio Santo Antônio próximo à confluência com o rio Doce, situado na cidade de Naque-MG. Neste local a água apresenta concentração de Mn de 0,1985 mg/L, acima do limite estabelecido pela norma CONAMA 357/2005 para água doce de classe 2.

Al – O alumínio foi detectado na água somente no ponto MG03. A litologia do entorno da bacia contém em sua estrutura uma significativa quantidade de alumínio (gnaisses, granitos, filitos, rochas básicas e diabásios, em que a composição do elemento nas amostras varia em média entre 11 a 17%). Dessa forma, o elemento é liberado ao meio ambiente e é incorporado às drenagens da bacia, sendo disponível na água na forma de íon AlO_2^- , conforme visto no ponto MG03. Devido às condições de pH neutro e Eh oxidante verificadas nos pontos amostrados, ocorre a precipitação do elemento ao longo da bacia (Figura 22).

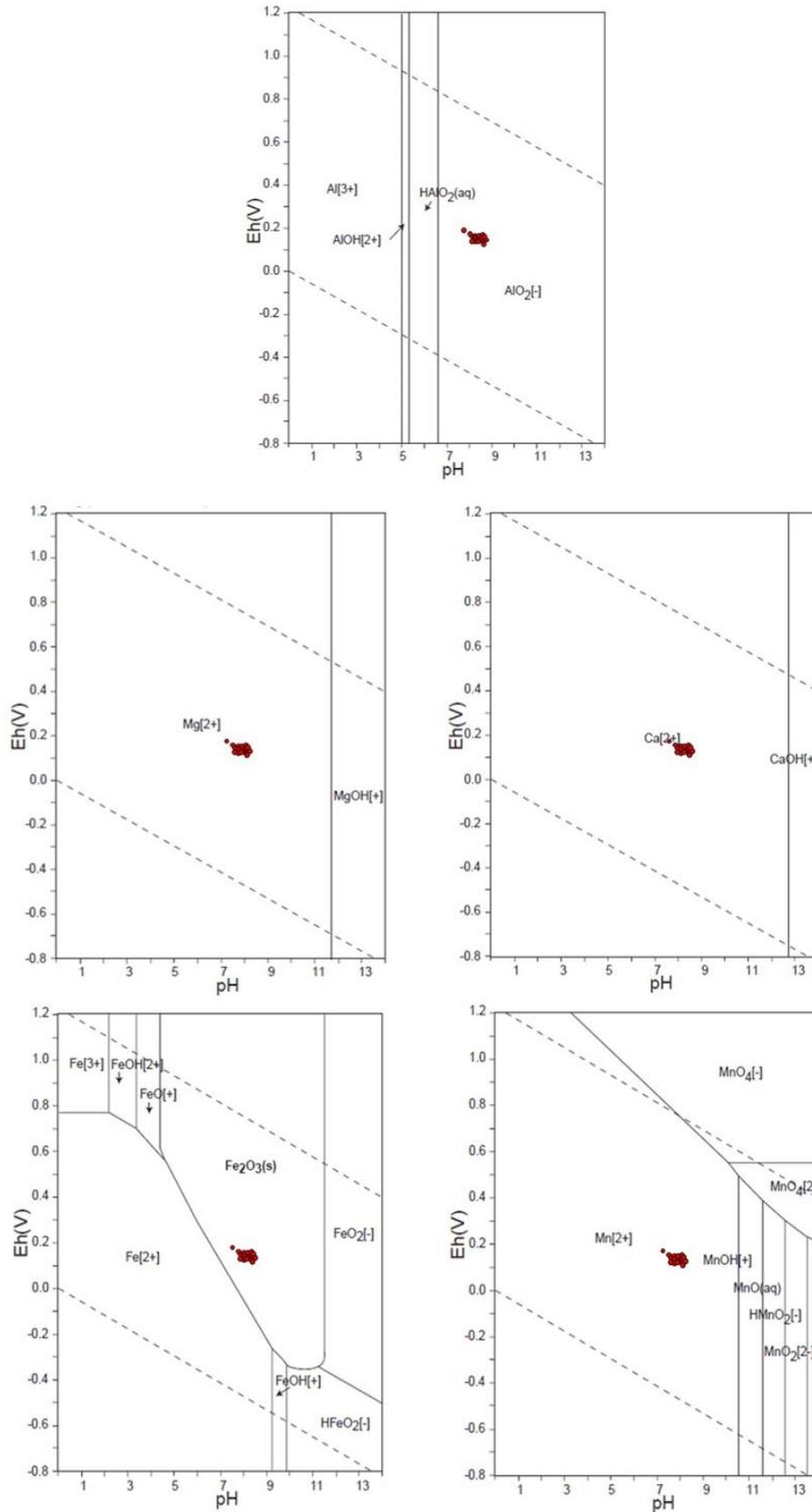


Figura 22: Diagrama Eh x pH mostrando a interação dos elementos Al, Mg, Ca, Fe e Mn diante das variações físicas em um sistema aquoso. Os pontos em vermelho correspondem aos valores dos parâmetros nos pontos de coleta da bacia do rio Santo Antônio (TAKENO, 2005).

Ca – Gnaisses, granitos, rochas metabásicas e diabásios são as litologias da área de estudo que contém o cálcio em sua estrutura, liberando-o para as drenagens devido ao processo de intemperismo. As maiores concentrações de Ca na água são verificadas nas cabeceiras do rio Santo Antônio, na parte oeste da área de estudo. Nas drenagens da bacia o elemento é encontrado na forma de Ca^{2+} e a concentração do elemento encontrada na bacia está atrelada às condições de pH neutro e Eh oxidante verificadas nos pontos amostrados, pois permitem que o elemento se mantenha solubilizado na água (Figura 22).

Fe – As maiores concentrações de ferro encontradas na água da bacia foram verificadas na parte oeste. Verifica-se que na referida região se encontram áreas de mineração. Outros pontos com teores mais elevados do elemento estão localizados no rio do Peixe, na desembocadura do rio Santo Antônio e no rio Doce. O Fe é abundante nas rochas que compõem a litologia local (gnaisses, granitos, rochas metabásicas, diabásios, e principalmente, em itabiritos e filitos ferruginosos), e estas fornecem o elemento para as drenagens. Sob as condições de pH neutro e Eh oxidante encontradas nas águas das drenagens (Figura 22) o elemento se encontra na forma de $\text{Fe}_2\text{O}_{3(s)}$, o que explica a diminuição da concentração do elemento se analisarmos a cabeceira da bacia (rica em Fe devido às jazidas ferruginosas localizadas na região oeste da área de estudo), em relação a sua confluência, pois o $\text{Fe}_2\text{O}_{3(s)}$ se precipita com muita facilidade.

Mg – O arcabouço geológico do entorno da bacia é rico em rochas magnesianas (principalmente diabásios e rochas metabásicas) que disponibilizam pelo intemperismo o elemento para o ambiente do entorno. As maiores concentrações do elemento na área de estudo são observadas nas cabeceiras das drenagens dos rios Santo Antônio, Guanhões e Tanque, e na desembocadura do rio Santo Antônio, em locais próximos às rochas magnesianas citadas. As condições de pH neutro e Eh oxidante encontradas na água ao longo da bacia (Figura 22) favorecem que o elemento se mantenha dissolvido na forma de íon, Mg^{2+} .

Mn – As altas concentrações de manganês estão associadas às localidades com maior presença de afloramentos de rochas ricas em Fe (rio Guanhões, MG09 e MG12; alto rio Santo Antônio, MG03 e MG07; e desembocadura do rio Santo Antônio, MG15). O manganês é oriundo de várias rochas que compõem a geologia regional (principalmente filitos ferruginosos, itabiritos, rochas metabásicas e diabásios). Estas rochas o disponibilizam pela ação dos processos de intemperismo. Diante das condições de pH neutro e Eh oxidante (Figura 22), o elemento se encontra dissolvido na água na forma de íon, Mn^{2+} .

4.1.3. Avaliação estatística dos dados das amostras de água

O tratamento estatístico foi aplicado (boxplot, tratamento univariado; teste não-paramétrico de Pearson, tratamento bivariado) para obtenção de novas informações usando os dados das análises químicas de amostras de água da bacia do rio Santo Antônio.

Foram utilizadas as concentrações de Fe, Mn, Mg e Ca nesta avaliação. O Al foi desconsiderado das referidas análises por ser detectado somente em uma amostra dos dezesseis exemplares amostrados. Para as amostras em que a concentração de Mn esteve abaixo do limite de detecção do ICP-OES, considerou-se o valor referente à metade do limite de detecção do aparelho de medição, (LD/2).

A Tabela 11 mostra os dados que estão acima do limite de detecção do aparelho e o próprio limite de detecção do ICP-OES.

Tabela 11: Apresentação dos dados referentes ao número das análises, as porcentagem de amostras acima do LD e o limite de detecção do aparelho (ICP-OES).

Elemento	Número de amostras	Unidade	% de amostras acima do LD	Limite de detecção
Fe	16	(mg/kg)	100%	0,0037
Mn	5	(mg/kg)	31,25%	0,0003
Ca	16	(mg/kg)	100%	0,0103
Mg	16	(mg/kg)	100%	0,0004

4.1.3.1. Resultado do tratamento com a estatística univariada

Avaliação dos principais elementos presentes na água: A partir da utilização do diagrama boxplot foram avaliadas possíveis anomalias dos elementos Ca, Mg, Fe e Mn durante o período de estiagem (Figura 23). Verificou-se que os elementos acima mencionados não apresentaram anomalias positivas ou negativas.

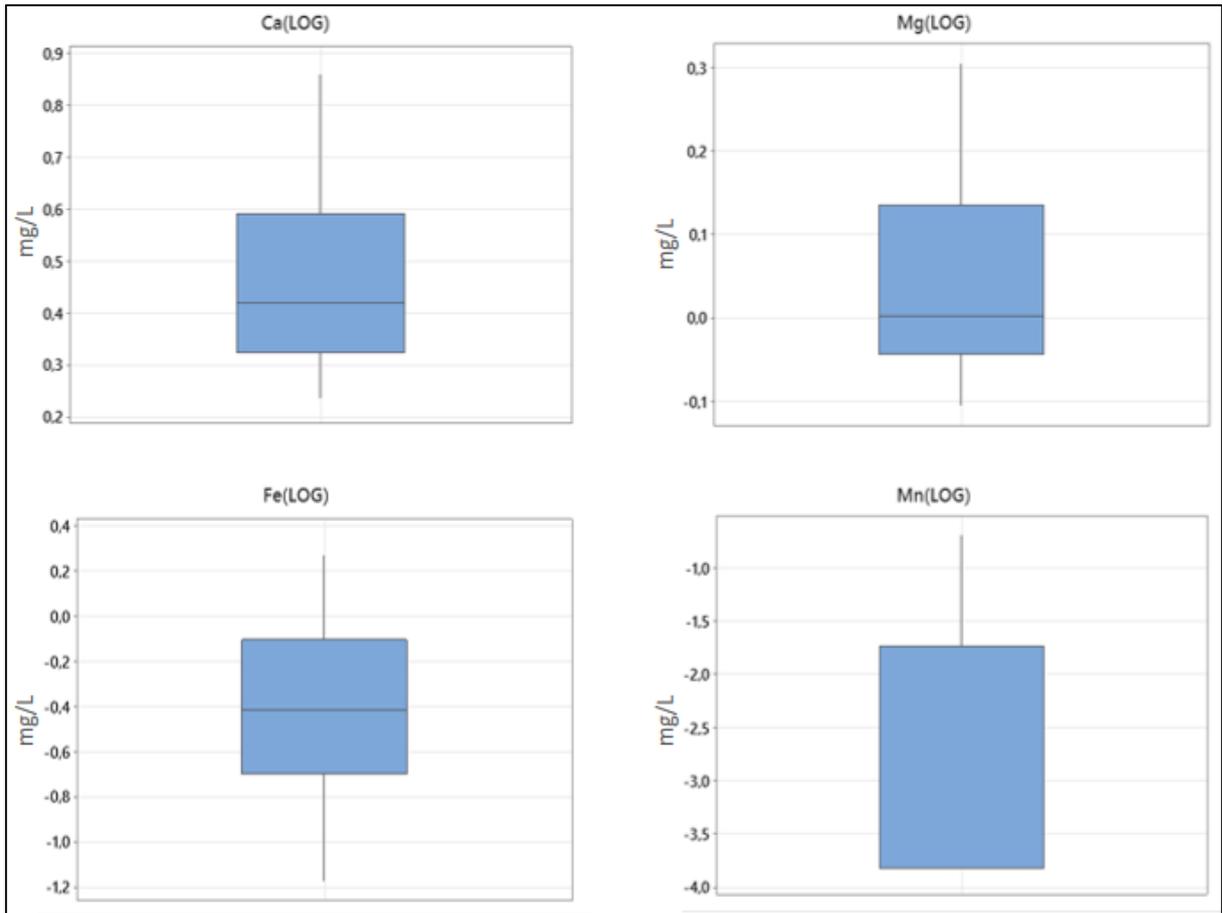


Figura 23: Diagrama boxplot referente aos dados logtransformados das análises químicas dos elementos Ca, Mg, Fe e Mn das amostras de água durante o período de estiagem da bacia do rio Santo Antônio.

4.1.3.2. Resultado do tratamento com a estatística bivariada

A partir do teste não-paramétrico de Pearson foram construídas duas matrizes de correlação; a primeira se refere aos dados sem qualquer tipo de tratamento prévio (Tabela 12), e a segunda matriz se refere aos dados logtransformados (Tabela 13), para atenuar os efeitos das anomalias (*outliers*).

Tabela 12: Variáveis e seus valores referentes ao coeficiente de correlação de Pearson para os dados químicos da água no período de estiagem. A cor amarela na tabela enfatiza a correlação entre os elementos.

	Fe	Mn	Mg	Ca
Fe	1			
Mn	0,53	1		
Mg	0,31	0,01	1	
Ca	0,58	0,03	0,83	1

Tabela 13: Variáveis e seus valores referentes ao coeficiente de correlação de Pearson para os dados químicos logtransformados da água no período de estiagem da bacia. A cor amarela na tabela enfatiza a correlação entre os elementos.

	Fe	Mn	Mg	Ca
Fe	1			
Mn	0,73	1		
Mg	0,34	0,30	1	
Ca	0,43	0,37	0,87	1

Conforme mostram as Tabelas 12 e 13, existe correlação positiva, ($\pm 1 \geq R^2 \geq \pm 0,7$), entre Fe/Mn e Ca/Mg.

4.1.3.2.1 Avaliação da correlação entre os elementos analisados na água

Na Figura 24 são apresentadas, na forma de gráficos, as correlações entre os elementos Ca-Mg e Fe-Mn.

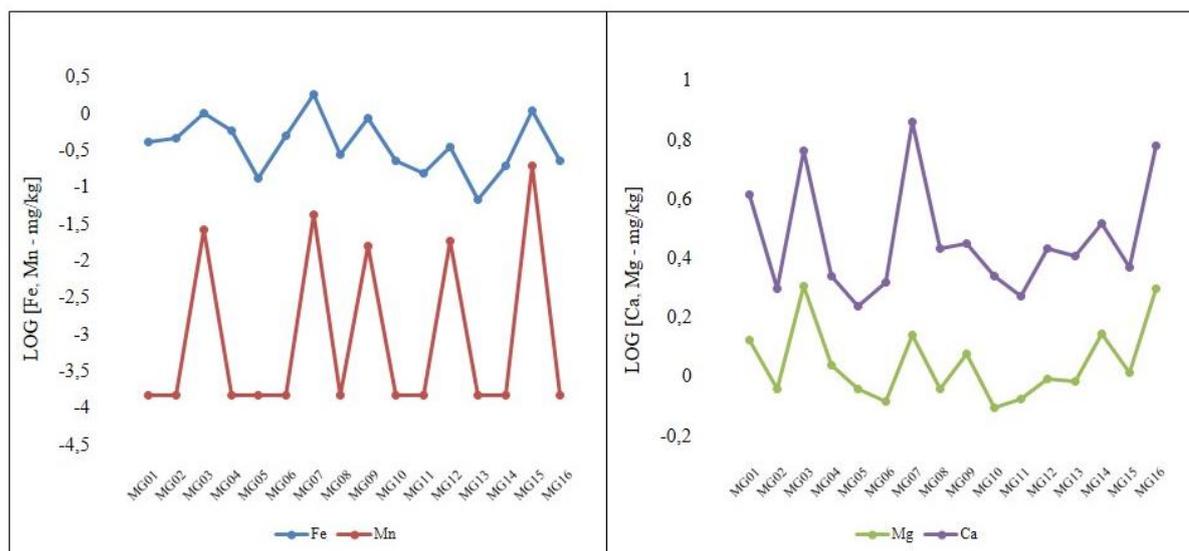


Figura 24: Os diagramas mostram a concentração (mg/L) logtransformada dos elementos Mn e Fe (à esquerda) e Ca e Mg (à direita) nas amostras de água da bacia.

Ca-Mg: O cálcio é um elemento litófilo, de acordo com a classificação de GOLDSCHMIDT (1937), e abundante em rochas e águas naturais (SANTOS, 2008). O magnésio também é um elemento litófilo, segundo GOLDSCHMIDT (1937), e contém propriedades semelhantes ao cálcio; no entanto, apresenta maior solubilidade e maior dificuldade para se precipitar, ocorrendo mais comumente na forma de bicarbonato (SANTOS, 2008). Ainda de acordo com SANTOS (2008), o cálcio e o magnésio apresentam propriedades químicas e comportamento geoquímico semelhante.

O cálcio é bastante comum nas litologias da área de estudo (gnaiesses, granitos, rochas metabásicas e diabásios). As condições de pH neutro e Eh oxidante permitem que uma grande quantidade de Ca^{2+} permaneça em solução. Fatores físicos, como o aumento da temperatura da

água, atuam no sistema aquoso deslocando o equilíbrio, pois o H_2CO_3 presente na água se dissocia em H^+ e HCO_3^- . Por sua vez, os íons atuam na solubilização de sais de CaCO_3 disponibilizados pela geologia local, liberando os íons Ca^{2+} e CO_3^{2-} para a água. Com a temperatura da água mais elevada, a solubilidade do carbonato aumenta e o ambiente fica supersaturado em cálcio ao longo da bacia (Verifique a Figura 22, Eh x pH para Ca na água).

Quanto à disponibilidade de Mg na água da bacia, o processo é similar ao Ca, sendo que a maior diferença está na concentração dos íons das rochas magnesianas encontradas no entorno da bacia ($\text{Mg} < \text{Ca}$). Fatores físicos (como o exemplo citado acima) e a variação do pH da água fazem com que o H_2CO_3 presente na água se dissocie em íons H^+ e HCO_3^- e estes solubilizem o MgCO_3 da litologia local, disponibilizando para a água os íons Mg^{2+} e CO_3^{2-} . O aumento de algum dos parâmetros físicos acima citados, influenciam na maior solubilidade do carbonato, supersaturando Mg ao longo da bacia (Verifique a Figura 22, Eh x pH para Ca na água).

De acordo com os gráficos apresentados na Figura 24, corroborados pelo teste não paramétrico de Pearson (Tabelas 12 e 13), os elementos em questão apresentam correlação positiva na água, sendo esta mais uma evidência da influência geogênica para a concentração dos metais.

Fe-Mn: Conforme mostra o gráfico apresentado na Figura 24, pode-se verificar que os elementos ferro e manganês têm correlação positiva, corroborando os dados obtidos pelo tratamento estatístico não-paramétrico de Pearson

A exploração do minério de ferro na porção oeste da área da bacia próximo às drenagens é muito intensa. Estas atividades têm produzido uma grande quantidade de sedimentos, que se depositaram nas calhas dos rios. As condições pH/Eh encontradas durante o período de estiagem permitem que ocorra a dissolução de Fe e Mn e uma alta concentração desses elementos ao longo da bacia.

Em busca de se obter a origem e proveniência das rochas do minério extraído na Serra da Serpentina, recorreu-se ao trabalho de (DUSSIN 1985; Tabela 14).

Tabela 14: Composição química do itabirito (amostras 1,2 e 3), hematita (amostras 1,2 e 3), filito (amostras 1 e 2) encontrado na Serra da Serpentina de acordo com DUSSIN (1985). Fe_2O_3 em % de óxido e MnO_3 em ppm.

TEOR Fe_2O_3 - % de óxido MnO_3 - ppm	Itabirito			Hematita			Filito Ferruginoso	
	1	2	3	1	2	3	1	2
Fe_2O_3	49,07	48,50	31,21	92,61	92,48	82,15	3,69	4,76
MnO	0,02	0,06	<0,01	0,01	0,01	0,09	0,13	0,06

A Tabela 14 mostra que o teor de ferro é muito superior do que o teor de manganês encontrado nas rochas estudadas. No entanto, a concentração destes elementos na água não apresenta a mesma proporção verificada nas rochas, pois a concentração dos íons no sistema é regulada pelos parâmetros físico-químicos como Eh, pH e Temperatura da água. E assim, sob às condições existentes de pH neutro e Eh oxidante na bacia, o ferro precipita mais facilmente que o manganês. Além do mais, existem contribuições de outras fontes como basaltos, rochas metabásicas e anfibolitos, e alguns minerais de granitos e gnaisses que influenciam na variação de concentração desses elementos.

Dessa forma, verifica-se que o intemperismo das rochas da área atuam na concentração dos referidos metais na água da bacia, mantendo a concentração do íon ferro solubilizado próximo às concentrações que geralmente são verificadas em águas naturais, pouco acima de 0,3-0,4 mg/L, ao passo que o elemento manganês se mantém em baixa concentração ao longo de quase toda a bacia, inferior a 0,1 mg/L.

Com o rompimento da barragem de rejeitos de fundão, houve uma invasão da água e dos sedimentos do rio Doce para o rio Santo Antônio, o que gerou uma mudança das condições químicas na confluência entre o rio tributário e o principal (COSTA, 2007; REIS, 2019).

4.2. Amostras de sedimentos

A análise dos sedimentos fornece uma gama de dados fundamentais para compreensão da história deposicional e evolução geoquímica de um corpo d'água. Aqui são apresentados dados referentes à análise granulométrica, mineralógica e química das amostras de sedimentos do rio Santo Antônio. Usou-se para a comparação a resolução CONAMA 454/2012, lei que estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional.

4.2.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica é uma importante ferramenta de estudo para os sedimentos, pois oferece informações sobre distribuição das partículas e a sua composição mineralógica. Estas informações podem ajudar na avaliação dos processos de transporte, adsorção e carga de elementos no ambiente fluvial.

A distribuição granulométrica por amostra coletada está representada na tabela disposta no (Apêndice 4) deste volume. A Figura 25 mostra uma comparação da distribuição granulométrica referente a cada ponto.

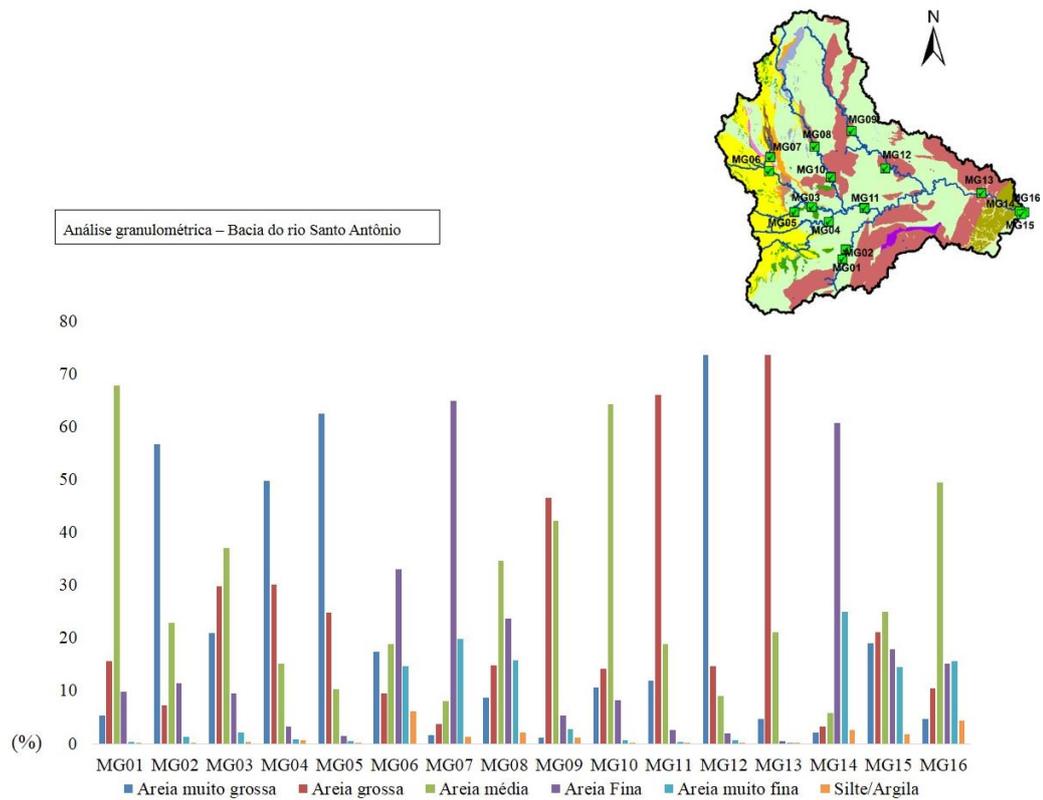


Figura 25: Representação gráfica da análise granulométrica dos sedimentos na bacia do rio Santo Antônio durante o seu período de estiagem.

De acordo com os gráficos apresentados, pode-se inferir a seguinte predominância de frações granulométricas:

- *areia muito grossa*, MG02, MG04, MG05, MG12;
- *areia grossa*, MG09, MG11, MG13;
- *areia média*, MG01, MG03, MG08, MG10, MG15, MG16;
- *areia fina*, MG06, MG07, MG14.

Em nenhum dos pontos amostrados predomina as frações areia fina e silte/argila.

Desta forma, sugere-se que as drenagens da bacia apresentem fluxos com velocidades superiores a 1 m/s em todas as estações, impedindo a deposição da fração silte/argila. Sem esta fração, a retenção de metais nestes pontos de amostragem está limitada. Assim, a distribuição de análises totais das frações mais grosseiras reflete as fontes de contribuição.

Sedimentos de fundo grosseiros são mais eficientes na degradação do resíduo orgânico (doméstico/ agricultura/ indústria) devido ao acúmulo de micro-organismos nos interstícios e na superfície das partículas, com maior viabilidade, e assim, permitindo uma maior produção e acúmulo de oxigênio. A velocidade da água e a profundidade do sedimento são fatores com importante relevância para esta análise (SALOMONS & FORSTNER, 2010; 2012).

4.2.2. Análise mineralógica

Para entender melhor as relações entre intemperismo e a deposição dos seus produtos na bacia do rio Santo Antônio, determinou-se a composição mineralógica das amostras de sedimentos coletados.

A composição mineralógica de cada amostra está disponível na Figura 26. Os difratogramas referentes a cada ponto amostrado estão no (Apêndice 5).

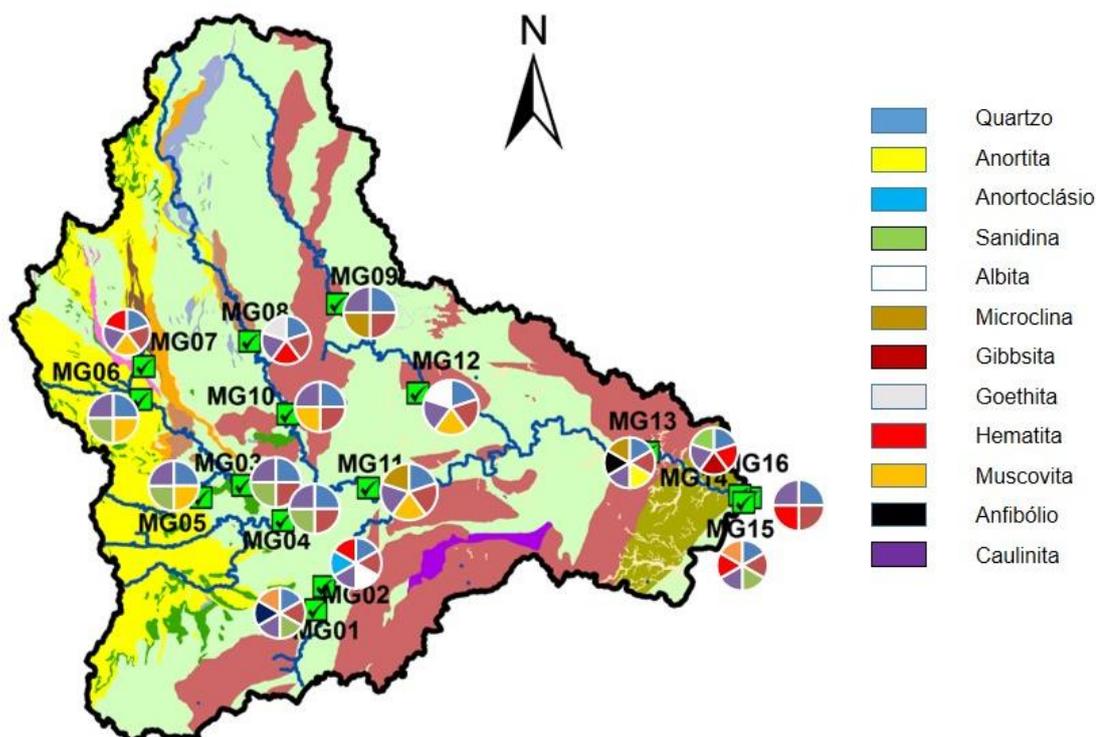


Figura 26: Composição mineralógica das amostras da bacia do rio Santo Antônio, obtida por difração de raios x.

Os minerais identificados foram:

Quartzo: está presente em todas as amostras selecionadas e a explicação para esta observação é sua vasta distribuição na natureza, bem como sua baixa solubilidade em água.

Plagioclásio: encontrado em várias amostras nas variações anortita, albita e sanidina. Este mineral é muito comum em granitos, gnaisses e rochas máficas como o diabásio.

K-feldspatos: encontrado em algumas amostras nas variações microclina e anortoclásio. É um mineral comum, típico de granitos e gnaisses.

Caulinita: ocorre em todas as amostras analisadas. Tal fato se deve, pois, este mineral é um produto da alteração de outros minerais, principalmente de feldspatos e outros silicatos, em decorrência do intemperismo químico.

Gibbsita: ocorre em várias amostras analisadas. É um mineral secundário, formado a partir da alteração de minerais aluminossilicáticos tais como feldspatos e muscovita.

Goethita: ocorre somente na amostra MG08, sendo este um produto de alteração de minerais ferruginosos como a hematita.

Hematita: ocorre em algumas amostras. Este é o principal mineral constituinte dos itabiritos.

Muscovita: mineral verificado em várias amostras. A muscovita é um produto de desagregação de granitos e xistos.

Anfibólio: ocorre somente em uma amostra, a MG01. Este mineral está presente principalmente em rochas máficas como anfibolitos, rochas de metamorfismo da fácies xisto verde e em granitos menos ácidos.

4.2.3. Análises químicas das amostras de sedimentos

A tabela completa das análises químicas dos sedimentos está disponível no (Apêndice 6). Tais análises permitiram caracterizar a origem, a composição e a relação dos elementos em seu ambiente de deposição.

Comparando os resultados das análises químicas com os limites determinados pela regulamentação CONAMA 454/2012 é possível avaliar o seu enquadramento ambiental e a necessidade de possíveis métodos para mitigação de anomalias.

Para fins de interpretação os resultados foram subdivididos em elementos maiores e elementos traços.

4.2.3.1 Elementos maiores nas amostras dos sedimentos

A seguir, discorre-se a respeito dos elementos maiores identificados nos sedimentos da bacia do rio Santo Antônio. Nas Figuras 27 e 28 verifica-se as concentrações de Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P e Ti na forma de gráficos. Nas citadas figuras os mapas mostram a evolução das concentrações dos elementos maiores nas amostras de sedimentos da nascente até a foz da bacia do rio Santo Antônio.

A discussão apresentada neste tópico tem como principais bases os dados químicos de rocha referentes à área de estudo, apresentado neste volume, e gráficos Eh x pH (Figura 29) apresentado por (TAKENO, 2005), e (HANDZLIK & FITZNER, 2010) para o caso específico do Ti, em que tais gráficos se referem ao comportamento de cada um dos elementos maiores verificados nos sedimentos diante das condições físicas e químicas apresentadas pelos sistemas aquáticos. (Verifique a Figura 22, EhxpH para Al na água).

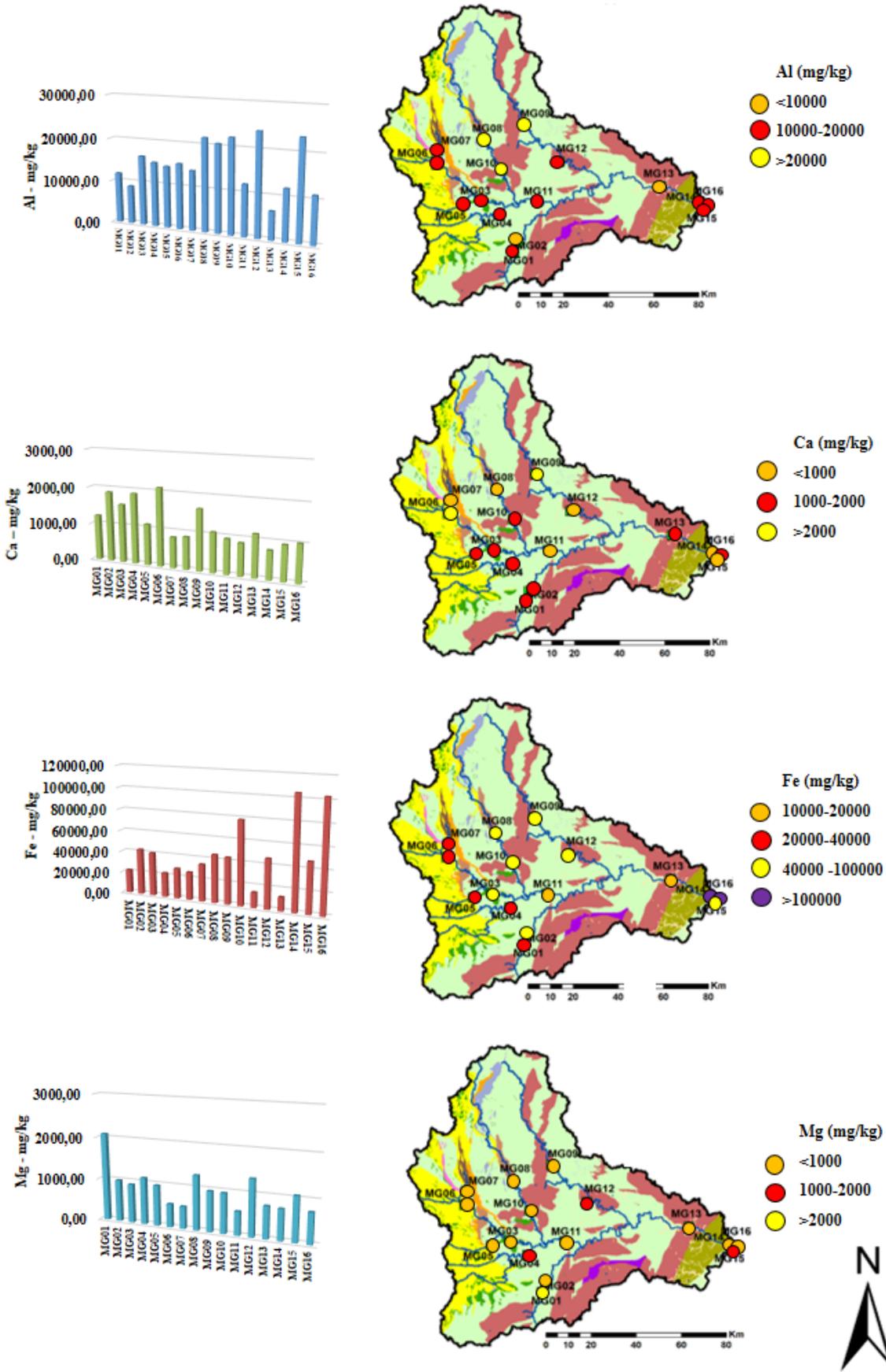


Figura 27: Mapa e gráficos das concentrações em (mg/kg) dos elementos maiores Al, Ca, Fe e Mg encontrados nos sedimentos na bacia do rio Santo Antônio. Observa-se uma boa correlação com a composição do embasamento, fisiografia e variação físico-química das drenagens.

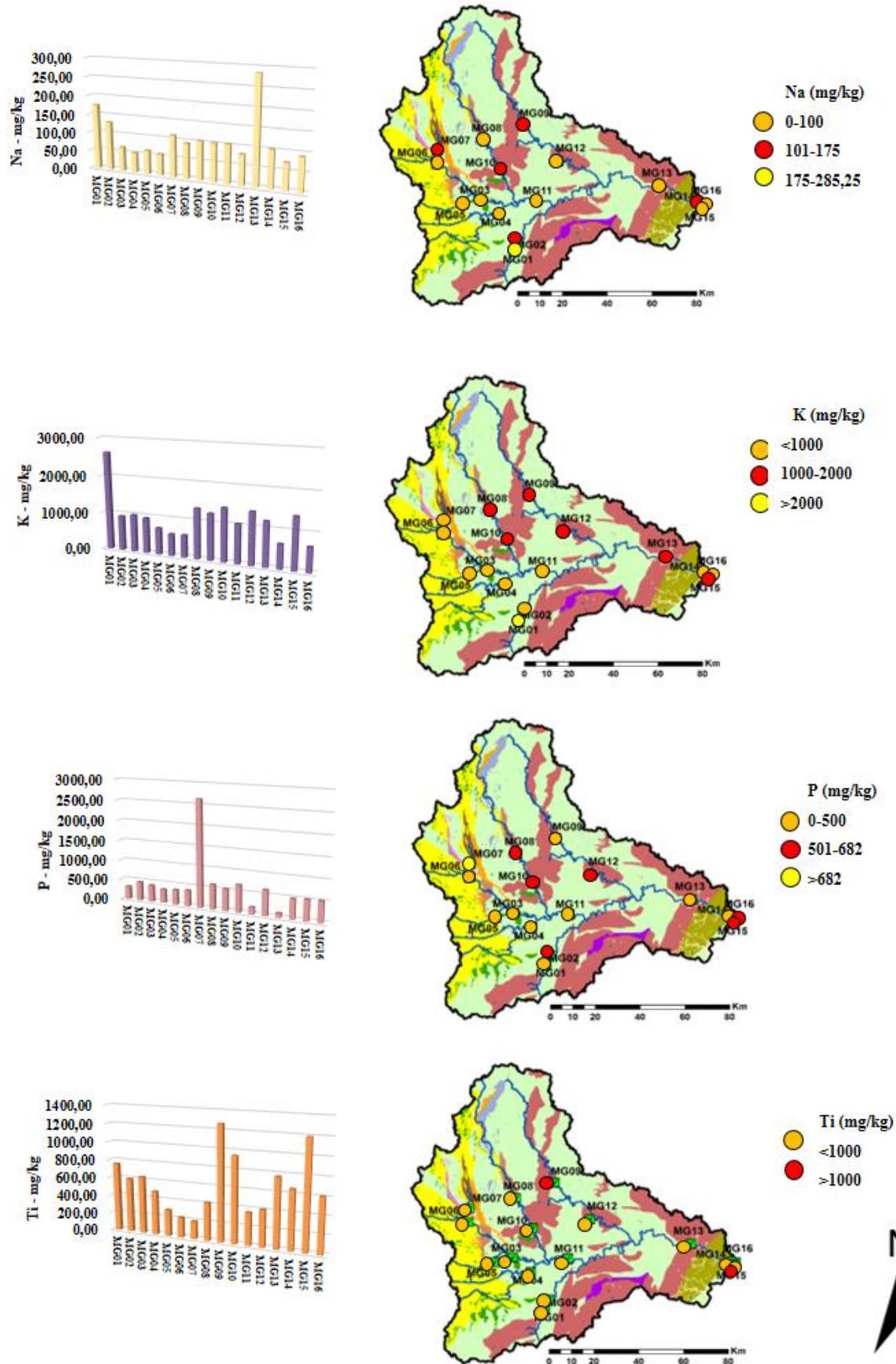


Figura 28: Mapa e gráficos das concentrações em (mg/kg) dos elementos maiores Na, K, P e Ti encontrados nos sedimentos na bacia do rio Santo Antônio. Observa-se uma boa correlação com a composição do embasamento, fisiografia e variação físico-química das drenagens.

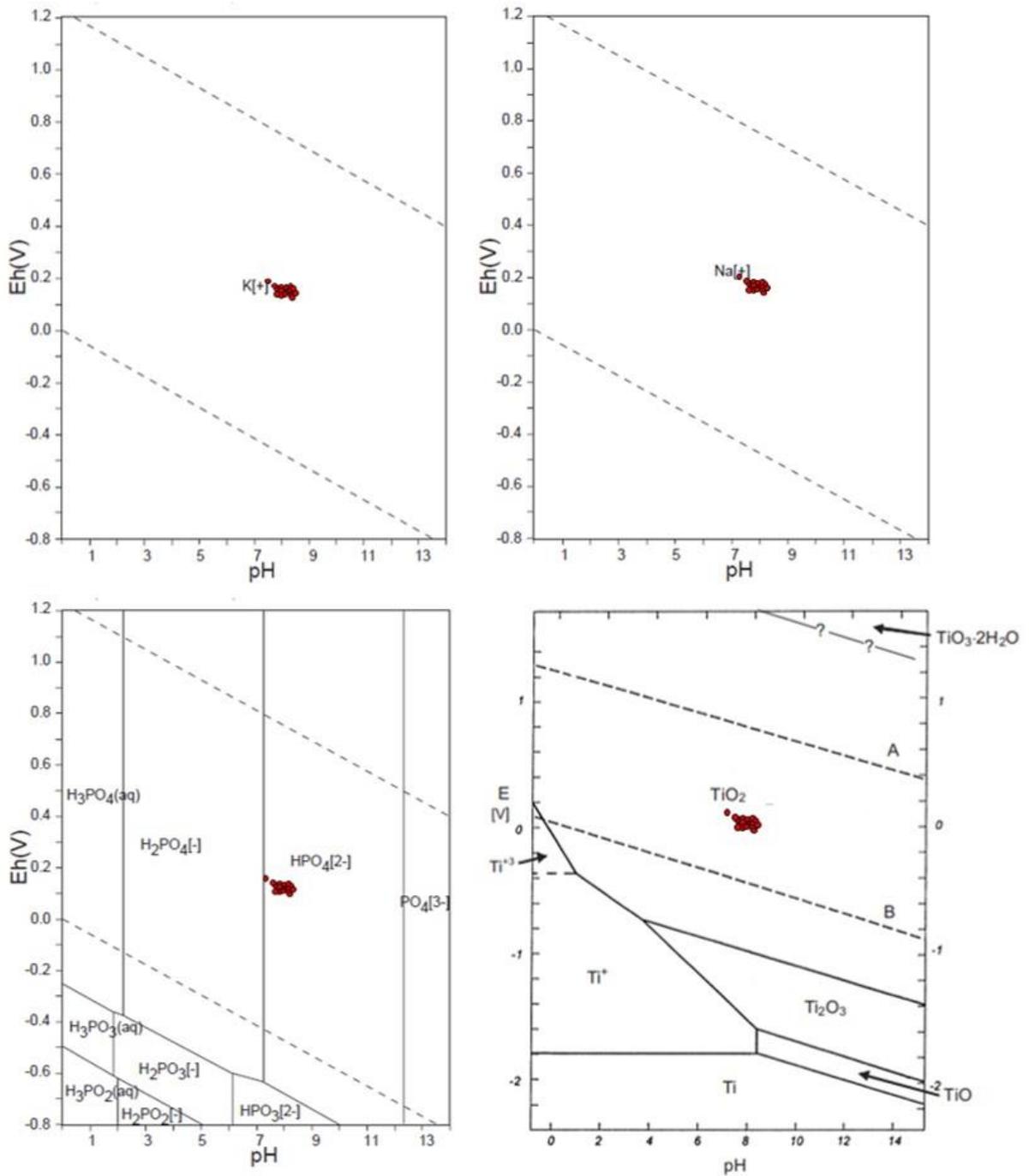


Figura 29: Diagrama de Pourboix com as condições da água da bacia. Os diagramas Eh x pH refletem a especiação de K, Na, P e Ti em um sistema aquoso em que os pontos em vermelho correspondem aos valores nos pontos de coleta das amostras (TAKENO, 2005; HANDZLIK & FITZNER, 2010).

Al – Ocorre em elevada concentração nos sedimentos em toda a bacia, >10.000 mg/kg em todos os pontos amostrados. Tal concentração está atrelada à litologia local (gnaisses, granitos, filitos, rochas básicas e diabásios que variam em média entre 11 a 17% em Al) que fornece o alumínio ao ambiente.

Nas drenagens, sob condições de pH neutro e Eh oxidante, os íons alumínio se precipitam com facilidade, principalmente na forma de óxidos e hidróxidos de alumínio (gibbsita – corroborado pelas análises mineralógicas). A concentração elevada nos sedimentos tem relação com sua baixa mobilidade, pois as condições físicas e químicas das drenagens não permitem que os óxidos e hidróxidos de alumínio sejam novamente solubilizados e incorporados à água.

Ca – A concentração de cálcio nos sedimentos é bastante elevada em toda a bacia, acima de 1000mg/kg. As litologias do entorno da bacia contêm representativa quantidade de cálcio (gnaisses, granitos, gabros e diabásios) e disponibilizam o elemento para o ambiente.

Nas drenagens da bacia, o elemento se encontra na forma de íon, Ca^{2+} . Embora as condições de pH neutro e Eh oxidante permitam que grande quantidade de íons cálcio sejam dissolvidos na água, fatores físicos como a temperatura da água e a evaporação podem causar uma supersaturação, e conseqüente precipitação, como também pode ocorrer a adsorção pela matéria orgânica lançada na bacia (*e.g.* Figura 22, EhxpH). A alta mobilidade do elemento está atrelada também à ressolubilização do elemento devido às variações físico-químicas durante o ano.

Mg – A concentração de magnésio encontrada nos sedimentos também é alta ao longo de toda a bacia, > 1000 mg/kg. As litologias do entorno da bacia são ricas em magnésio (rochas básicas, diabásios, filitos, itabiritos, gnaisses e granitos) e disponibilizam o elemento ao ambiente, na forma de íon, Mg^{2+} favorecido pelas condições de pH neutro e Eh oxidante. Da mesma forma que o Ca^{2+} , o aumento de temperatura é um fator a ser considerado em relação à precipitação de Mg^{2+} , seja pela maior solubilidade de CO_2 , seja pela sua incorporação à matéria orgânica. A ressolubilização devido às mudanças físico-químicas durante as estações do ano aumentam a mobilidade deste elemento (*e.g.* Figura 22).

K – A concentração de potássio nos sedimentos também é alta em todas as amostras da bacia, > 1000 mg/kg. O arcabouço geológico local rico em potássio (principalmente gnaisses, granitos e filitos ferruginosos) disponibiliza o elemento ao ambiente. Dessa forma, ele é liberado para as drenagens, onde se concentra na forma de íon, K^+ . As condições de pH neutro e Eh oxidante da bacia (Figura 29) favorecem que uma parte dos íons potássio sejam precipitados, junto à matéria orgânica e óxidos, ou mesmo co-precipitado junto a outros sais.

Fe – Verificaram-se altas concentrações de ferro nos sedimentos em toda a bacia, > 10.000 mg/kg. As maiores concentrações de ferro nos sedimentos foram encontradas nos rios do Peixe, rio do Tanque e rio Guanhões. No rio Santo Antônio com exceção de sua foz, verifica-se que a concentração de ferro é menor do que a constatada em seus tributários, pois, após o rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro de Fundão, o rio Doce invadiu a desembocadura do rio Santo Antônio, seu afluente, aumentando a concentração de Fe nos sedimentos do local. As rochas que compõem a geologia local (principalmente itabiritos, filitos ferruginosos) por meio do intemperismo e da mineração disponibilizam Fe para as drenagens da bacia.

As condições de pH neutro e Eh oxidante, favorecem que parte dos íons ferro se encontrem solubilizados na água, como íon Fe^{2+} . No entanto, outra parte dos íons precipitam nos sedimentos na forma de óxidos e hidróxidos de ferro (Verifique a Figura 22, EhxpH para Fe na água; Fe_2O_3 - vide também goethita no capítulo relacionado às análises mineralógicas). Óxidos de ferro possuem alta superfície específica, portanto, sua precipitação geralmente é acompanhada pela fixação de ânions (PO_4) ou cátions (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn), por meio de adsorção ou co-precipitação. A mobilidade do Fe nos sedimentos é muito baixa, pois o elemento se encontra fortemente adsorvido nos sedimentos e o pH e o Ca dissolvido na água da bacia são fatores limitantes para a migração no ambiente (BASÍLIO, 2005; SOUZA *et al.*, 2015).

Na – Verificou-se maior concentração do elemento nos pontos MG01 e MG13. As rochas do embasamento como gnaisses, granitos, rochas básicas e diabásios disponibilizam o elemento para o ambiente, sendo que o íon Na^+ é transportado na água devido à sua alta solubilidade sob as condições físicas e químicas apresentadas na bacia. (Figura 29).

P – A concentração de fósforo nos sedimentos da bacia foi verificada acima de 700 mg/kg em quase todos os pontos, com exceção do MG07 – localizado na cabeceira do rio Santo Antônio. O fósforo é encontrado principalmente nos filitos ferruginosos do Supergrupo Espinhaço, sendo liberado para o ambiente.

O ortofosfato é o íon mais comum do P encontrado nos corpos d'água, principalmente pela adição de esgotos domésticos. O ponto MG07, localizado na zona urbana da cidade de Conceição do Mato Dentro, reflete bem esta situação. Um ponto importante a se enfatizar é que o fósforo é eliminado rapidamente pela ação microbiológica em um ambiente bem oxigenado, o que ocorre ao longo da bacia. O sedimento do ponto MG13, a jusante do ponto MG07, já mostra teores muito baixos do elemento. Verifica-se o aumento da concentração do elemento próximo à confluência do rio Doce, em decorrência da proximidade com a zona urbana de Naque.

Ti – A concentração de titânio nas amostras de sedimentos da bacia é < 1.000 mg/kg, com a exceção dos pontos MG09 – rio Guanhães e MG15 – confluência do rio Santo Antônio com o rio Doce. O titânio é um elemento encontrado principalmente em minerais que compõem gnaisses e granitos da Suíte Borrachudos, nos filitos ferruginosos do Supergrupo Espinhaço e nas rochas básicas e metadiabásios da Suíte Pedro Lessa. O elemento ocorre na forma de íon titânio, Ti^{2+} na água e na forma de TiO_2 nos sedimentos. Nas condições físicas e químicas das drenagens, o titânio apresenta mobilidade muito baixa, e pode ser também facilmente adsorvido ou co-precipitado para os sedimentos por outros íons como o Fe e o Mn (Figura 29).

4.2.3.2 Elementos traços nos sedimentos

Os resultados das análises químicas indicaram nos sedimentos a presença de uma série de elementos na forma de traços.

As Figuras 30 e 31 mostram gráficos com a concentração destes elementos (As, Cd, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, Pb e Zn) nos sedimentos ao longo da bacia no período de estiagem de 2019.

Nas citadas figuras são apresentados mapas referentes à distribuição das concentrações dos principais elementos traços nos sedimentos ao longo da bacia do rio Santo Antônio. A discussão sobre a distribuição dos elementos traços na bacia decorre a partir dos dados químicos das rochas da área estudada (verificados na Tabela 9), e por gráficos Eh x pH (Figuras 32 e 33) que levam em consideração as condições dos elementos traços analisados em sistemas aquáticos (TAKENO, 2005) e em atividades humanas.

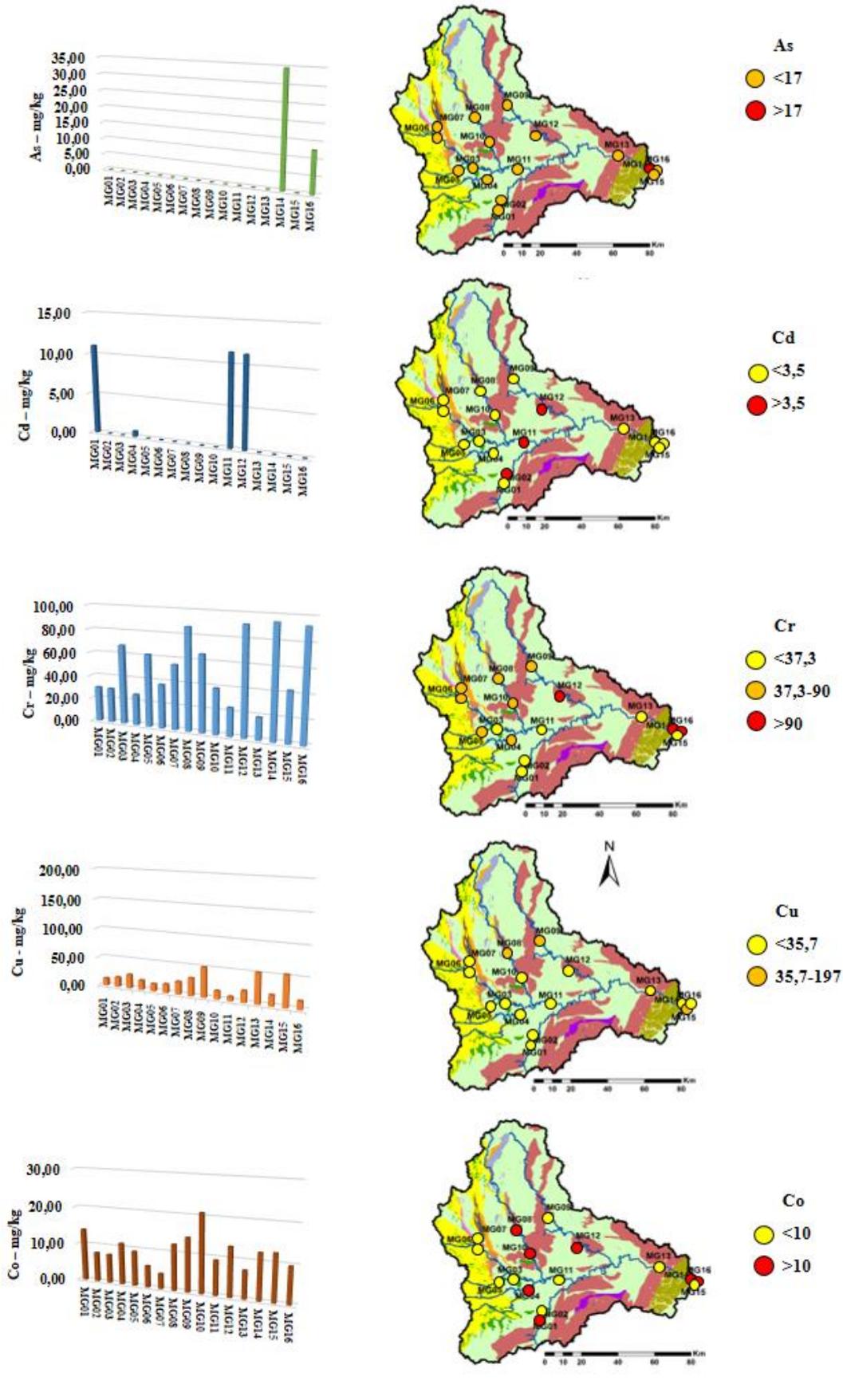


Figura 30: Mapa das concentrações em (mg/kg) dos elementos traços As, Cd, Cr, Cu e Co encontrados nos sedimentos na bacia do rio Santo Antônio.

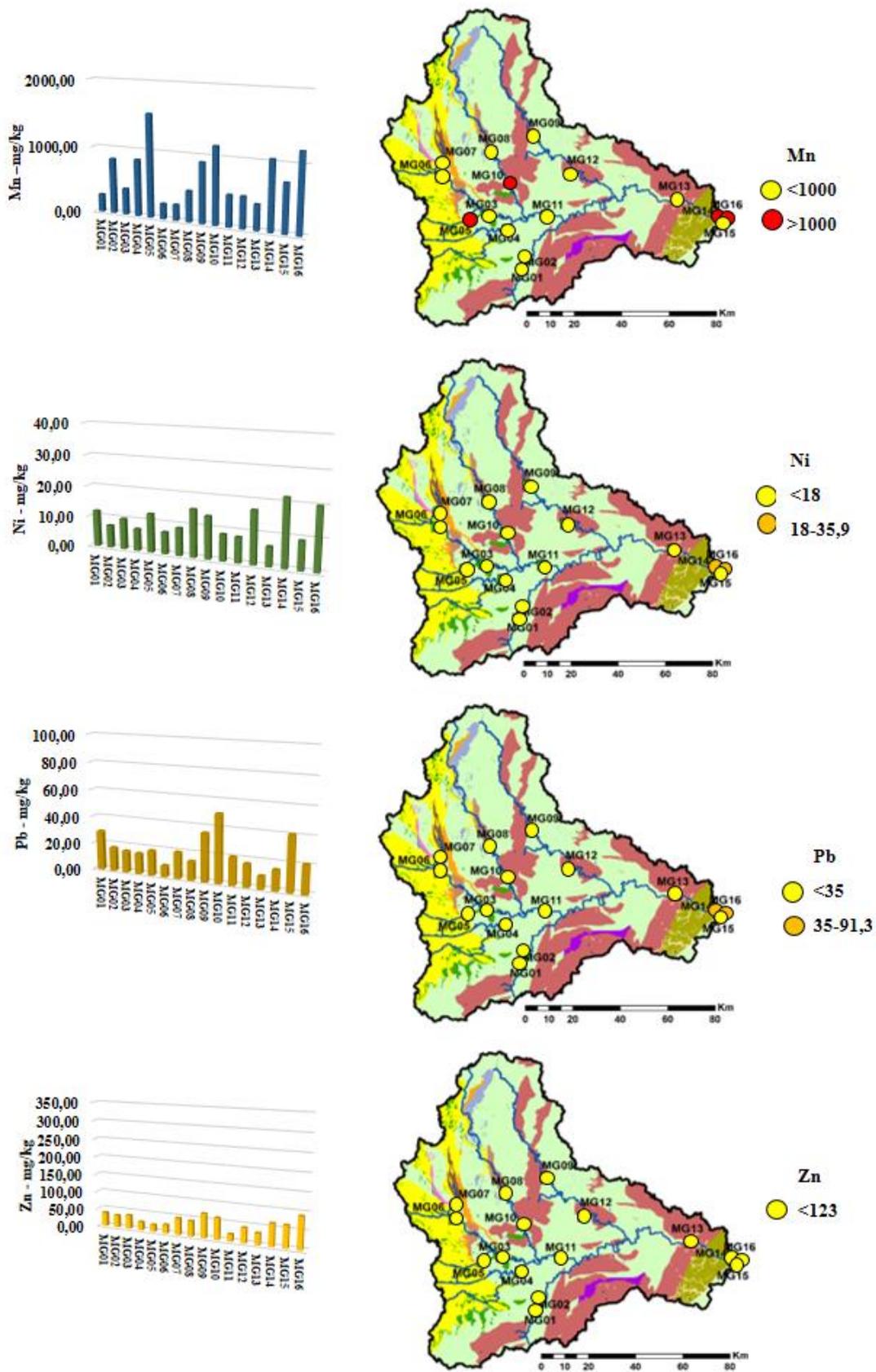


Figura 31: Mapa das concentrações em (mg/kg) dos elementos traços Mn, N, Pb e Zn encontrados nos sedimentos na bacia do rio Santo Antônio.

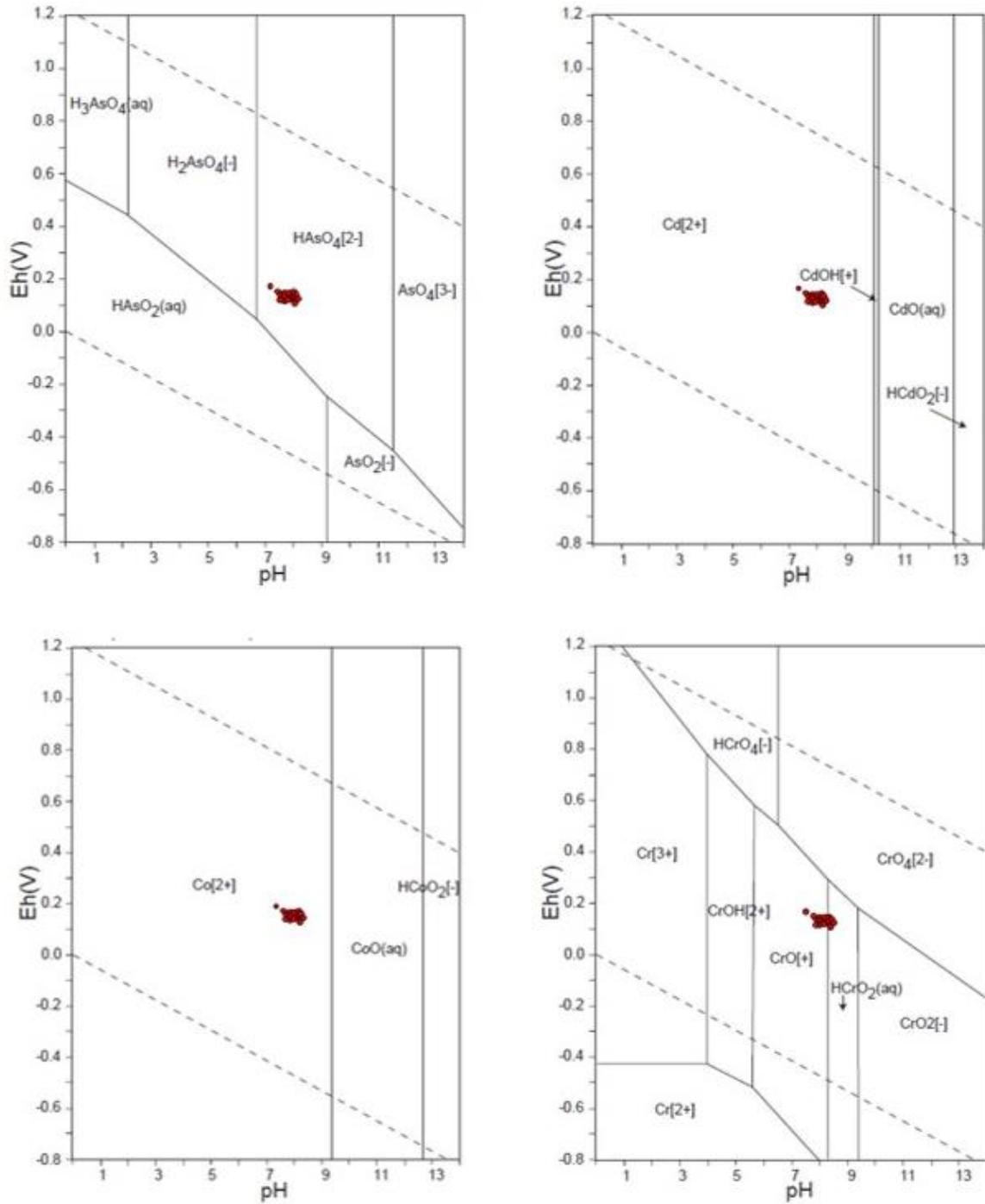


Figura 32: Diagramas Eh x pH mostrando a interação dos elementos As, Cd, Co e Cr diante das variações físicas em um sistema aquoso. Os pontos em vermelho correspondem aos valores dos parâmetros nos pontos de coleta da bacia do rio Santo Antônio (TAKENO, 2005).

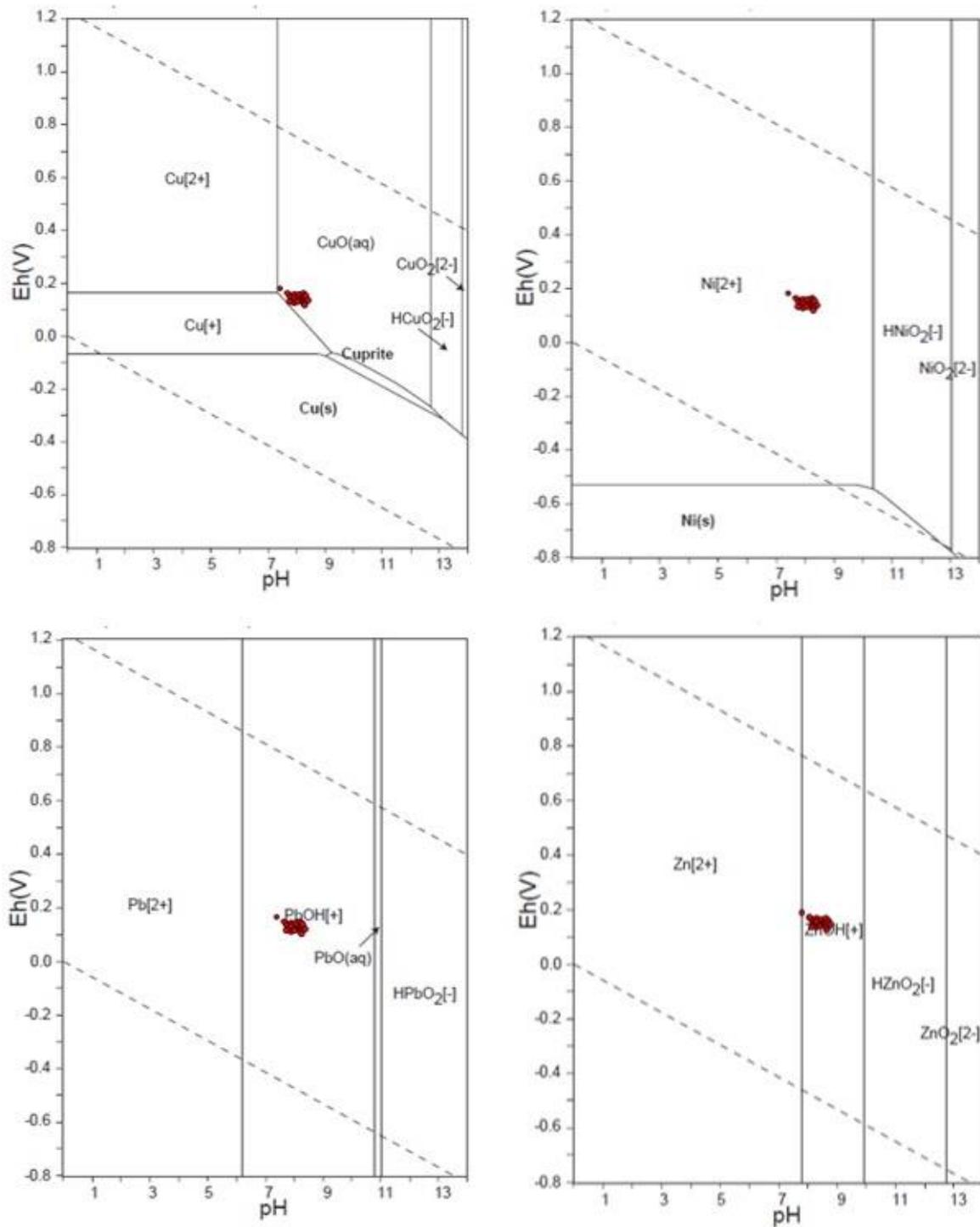


Figura 33: Diagrama Eh x pH mostrando a interação dos elementos Cu, Ni, Pb e Zn diante das variações físicas em um sistema aquoso. Os pontos em vermelho correspondem aos valores dos parâmetros nos pontos de coleta da bacia do rio Santo Antônio (TAKENO, 2005).

As – O Arsênio foi detectado somente na desembocadura da bacia do rio Santo Antônio (MG14). Presume-se que a alta concentração do elemento no local seja decorrente da influência do rio Doce que aportou um grande volume de sedimentos após o rompimento da barragem de rejeitos de fundão, e os íons HASO_4^{2-} foram adsorvidos aos sedimentos finos. As condições

físicas e químicas do manancial (pH neutro, Eh oxidante; Figura 32) influenciam na baixa mobilidade do As.

Cd – O Cádmiio foi encontrado em três pontos da bacia: no córrego Jirau, dentro da zona urbana da cidade de Santa Maria de Itabira; no rio Santo Antônio, na zona urbana da cidade de Ferros; e no rio Guanhães, na zona urbana da cidade de Dores de Guanhães.

As litologias da área de estudo não contém altas concentrações de cádmio em sua composição, sugerindo a ação antrópica como fonte do elemento nos sedimentos, destacando-se a atividade industrial concentrada nas zonas urbanas da bacia. O Cd é utilizado na indústria como: anticorrosivo para aços galvanizados, na pigmentação de plásticos e na composição de pilhas, baterias recarregáveis e objetos eletrônicos (CETESB, 2020).

Sob as condições físicas e químicas apresentadas na bacia (pH neutro, Eh oxidante – Figura 32), o cádmio apresenta mobilidade média, podendo ser reincorporado à água na forma de íon Cd^{2+} .

Co – O cobalto apresentou suas maiores concentrações nos rios Preto, Peixe e Guanhães. No rio Santo Antônio, as concentrações são baixas em seus trechos iniciais tendo um significativo aumento na sua confluência com o rio Doce devido ao evento citado no rio principal.

Várias litologias da área da bacia, principalmente itabiritos e filitos ferruginosos do Grupo Serra da Serpentina, são portadoras de Co, que o disponibilizam o elemento na forma de íon Co^{2+} , sendo este precipitado pelas condições físico-químicas do manancial. No substrato, o cobalto é adsorvido principalmente aos óxidos de Fe e Mn, explicando a maior concentração do elemento na confluência do rio Santo Antônio e o rio Doce. Sob as condições atuais do manancial (pH neutro e Eh oxidante – Figura 32), a mobilidade do cobalto é baixa, devido ao pH e Eh limitarem a ressolubilização do elemento na água.

Cr – O Cromo é proveniente, principalmente dos filitos ferruginosos do Grupo Serra da Serpentina e das rochas básicas e metadiabásios da Suíte Pedro Lessa, que disponibilizam o elemento na forma de CrO^+ e $HCrO_2^-$. As condições da água da bacia causam a precipitação do íon cromo na forma de óxido/hidróxido.

Nos sedimentos, o cromo é adsorvido principalmente aos óxidos de Fe e Mn. A mobilidade do Cr é baixa, limitada pelas condições físicas e químicas atuais que impedem que o elemento seja novamente incorporado a água da bacia. (Figura 32).

Cu – O Cu natural nos sedimentos é oriundo principalmente dos metadiabásios da Suíte Pedro Lessa, além de rochas básicas e em menor proporção granitos e gnaisses. As condições físico-químicas da bacia associada à presença de material orgânico causam a precipitação do elemento na forma de CuO (Figura 33).

Mn – A concentração de manganês nos sedimentos se manteve > 1.000 mg/kg em quase todos os pontos da bacia. Altos teores de manganês estão associados às localidades com maior concentração de ferro nos sedimentos (rio Guanhões, MG10; alto rio Santo Antônio, MG03; e desembocadura do rio Santo Antônio, MG14). A litologia do local (itabiritos, filitos ferruginosos, rochas básicas e diabásios) é portadora do elemento e o disponibiliza para as drenagens.

As condições de pH neutro e Eh oxidante, deveriam favorecer a solubilização do íon manganês na água. No entanto, oscilações dos parâmetros como o aumento do pH, oxigenação da água, atividades biológicas e outras, podem causar sua precipitação na forma de óxido de manganês (Figura 22). A mobilidade do elemento no ambiente fluvial é baixa, visto que quando ocorre sua precipitação este se encontra fortemente adsorvido pelos sedimentos, não podendo ser novamente solubilizado pela água.

Ni – O níquel é proveniente das litologias da área de estudo, como filitos ferruginosos do Grupo Serra da Serpentina e rochas básicas e metadiabásios da Suíte Pedro Lessa, liberando-o na forma de Ni²⁺. O íon Ni²⁺ se precipita na forma de óxido, e nos sedimentos, é adsorvido facilmente pelos óxidos de Fe e Mn. A mobilidade do níquel é baixa, limitada pelas condições físicas e químicas (Figura 33) atuais das águas das drenagens da bacia.

Pb – Os gnaisses e granitos da Suíte Borrachudos são as principais fontes de chumbo na bacia, que o disponibilizam naturalmente na forma de PbOH⁺. Com a saturação da água, o íon PbOH⁺ se precipita na forma de óxido. A mobilidade do chumbo é baixa, em função das condições físicas e químicas (Figura 33) da água das drenagens da bacia.

Zn – As rochas das litologias do entorno da bacia abrigam zinco em sua estrutura (rochas básicas, diabásios, granitos e gnaisses) e disponibilizam o elemento para o ambiente naturalmente na forma de íon, Zn²⁺ ou ZnOH⁺. Com a saturação da água, os íons de zinco se precipitam na forma de hidróxido, facilitado pela adsorção aos óxidos de Fe e Mn. As condições de pH neutro e Eh oxidante (Figura 33) encontradas na bacia, permitem a mobilização dos sedimentos e precipitados.

4.2.4. Relação entre as concentrações dos elementos nas amostras de sedimentos

Também foram utilizadas as citadas ferramentas estatísticas para obtenção de novas informações sobre os dados obtidos nas análises químicas laboratoriais realizadas nas amostras de sedimentos da bacia do rio Santo Antônio para estabelecer correlações entre os elementos traços.

Os dados obtidos pela análise química referentes aos elementos maiores (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P e Ti) e aos elementos traços (Co, Cu, Cr, Mn, Ni, Pb e Zn) foram os parâmetros utilizados nos testes estatísticos, que permitiram compreender melhor o comportamento e as relações entre os metais citados acima.

Inicialmente, os dados foram padronizados de modo que os teores abaixo do limite de detecção do aparelho foram substituídos pela metade do limite de detecção do aparelho (LD/2), prática comumente utilizada em estudos ambientais. Os metais que apresentaram concentração inferior ao limite de detecção do aparelho em mais de 20% amostras (4 em um universo amostral de 16), foram desconsiderados. Assim os elementos As e Cd não foram incluídos na avaliação estatística. A Tabela 15 apresenta o limite de detecção obtido pela leitura analítica realizada por ICP-OES e a % de amostras que se encontram acima do referido limite de detecção.

Tabela 15: Análise quanto ao grau de detecção referente às concentrações de metais em amostras de sedimentos (mg/kg) na sub-bacia do rio Santo Antônio (LD – Limite de detecção).

Elemento	Número de amostras	Unidade	% de amostras acima do LD	Limite de detecção
Co	16	(mg/kg)	100%	1,56
Cu	16	(mg/kg)	100%	1,23
Cr	16	(mg/kg)	100%	1,08
Pb	16	(mg/kg)	100%	7,08
Zn	16	(mg/kg)	100%	0,31
Fe	16	(mg/kg)	100%	7,24
Ni	16	(mg/kg)	100%	3,02
Mn	16	(mg/kg)	100%	5,55
Al	16	(mg/kg)	100%	24,5
Ca	16	(mg/kg)	100%	4,28
K	16	(mg/kg)	100%	12,24
Mg	16	(mg/kg)	100%	3,04
Ti	16	(mg/kg)	100%	10,75

4.2.4.1. Avaliação dos resultados do tratamento com a estatística univariada

Aplicou-se o método estatístico “boxplot” para a avaliação de possíveis anomalias nos resultados obtidos a respeito dos sedimentos da bacia.

Avaliação dos elementos maiores nos sedimentos:

Foram detectadas anomalias nos resultados das análises químicas em três elementos: Mg e Na, que apresentaram uma anomalia positiva; e P que apresentou uma anomalia positiva e uma anomalia negativa (Figura 34).

Avaliação dos elementos traços nos sedimentos:

Nenhum dos elementos traços avaliados pelo teste (Figura 35) apresentaram anomalias positivas ou negativas nas amostras coletadas.

4.2.4.2. Análise estatística bivariada com a utilização da correlação de Pearson

O teste de correlação de Pearson foi aplicado no estudo dos sedimentos da bacia do rio Santo Antônio com o intuito de verificar eventuais correlações entre os elementos nas amostras coletadas.

A primeira matriz de correlação foi constituída por dados sem qualquer tipo de tratamento prévio (Tabela 16) e a segunda matriz com logtransformação prévia (Tabela 17).

Pôde-se verificar por meio das matrizes que os valores dos coeficientes apontam correlação positiva ($\pm 1 \geq R^2 \leq \pm 0,7$) entre algumas variáveis selecionadas. Na Tabela 16 as correlações ocorrem entre: Cr-Ni; Fe-Ni; Fe-Zn; Co-Pb; Pb-Ti; K-Mg. Já na Tabela 17 identifica-se a correlação entre as variáveis: Cr-Ni; Fe-Zn; K-Mg; Cr-Fe.

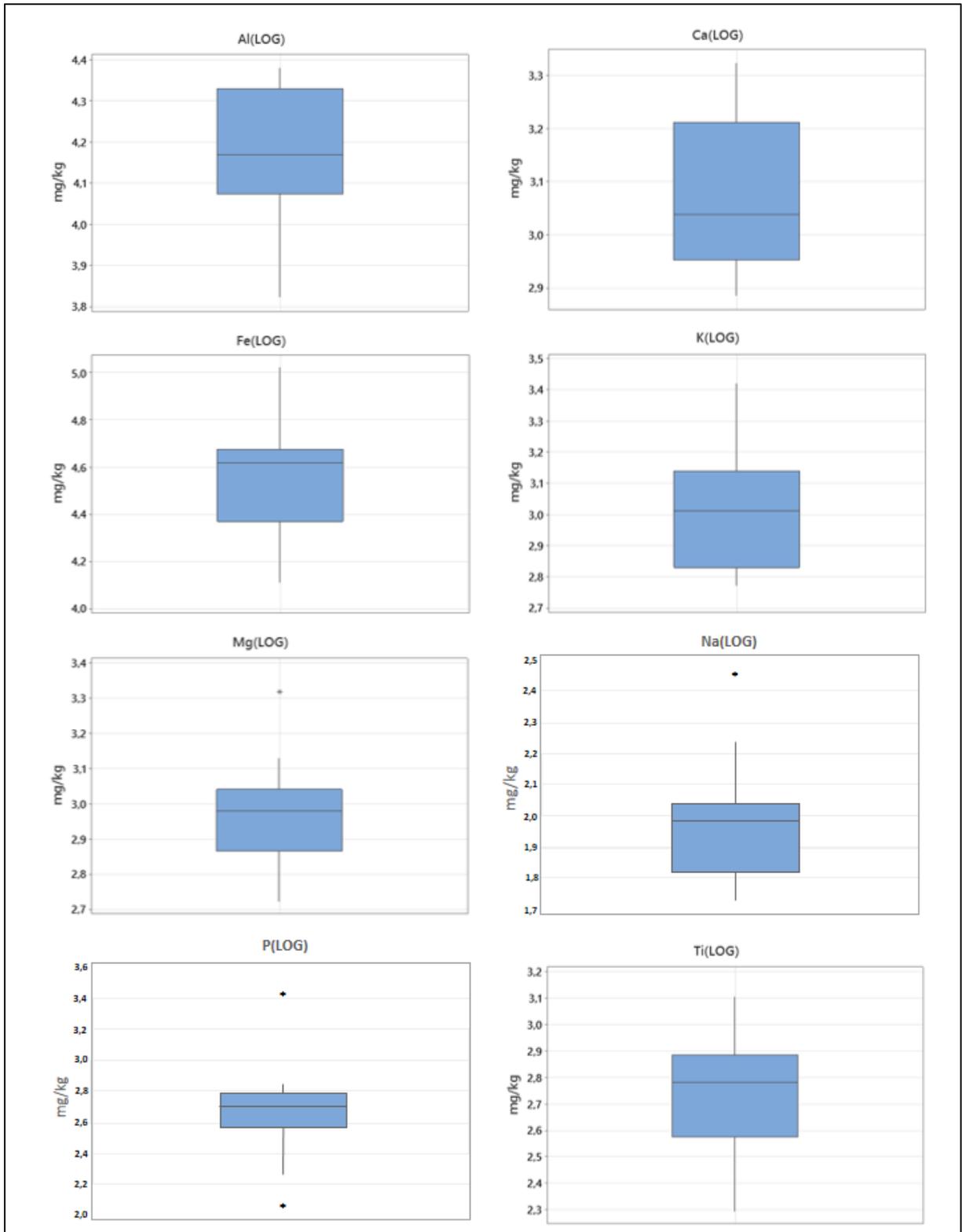


Figura 34: Diagramas tipo “boxplot” referente aos dados logtransformados das análises químicas dos elementos metálicos maiores Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P e Ti presentes nos sedimentos durante o período de estigem da bacia do rio Santo Antônio.

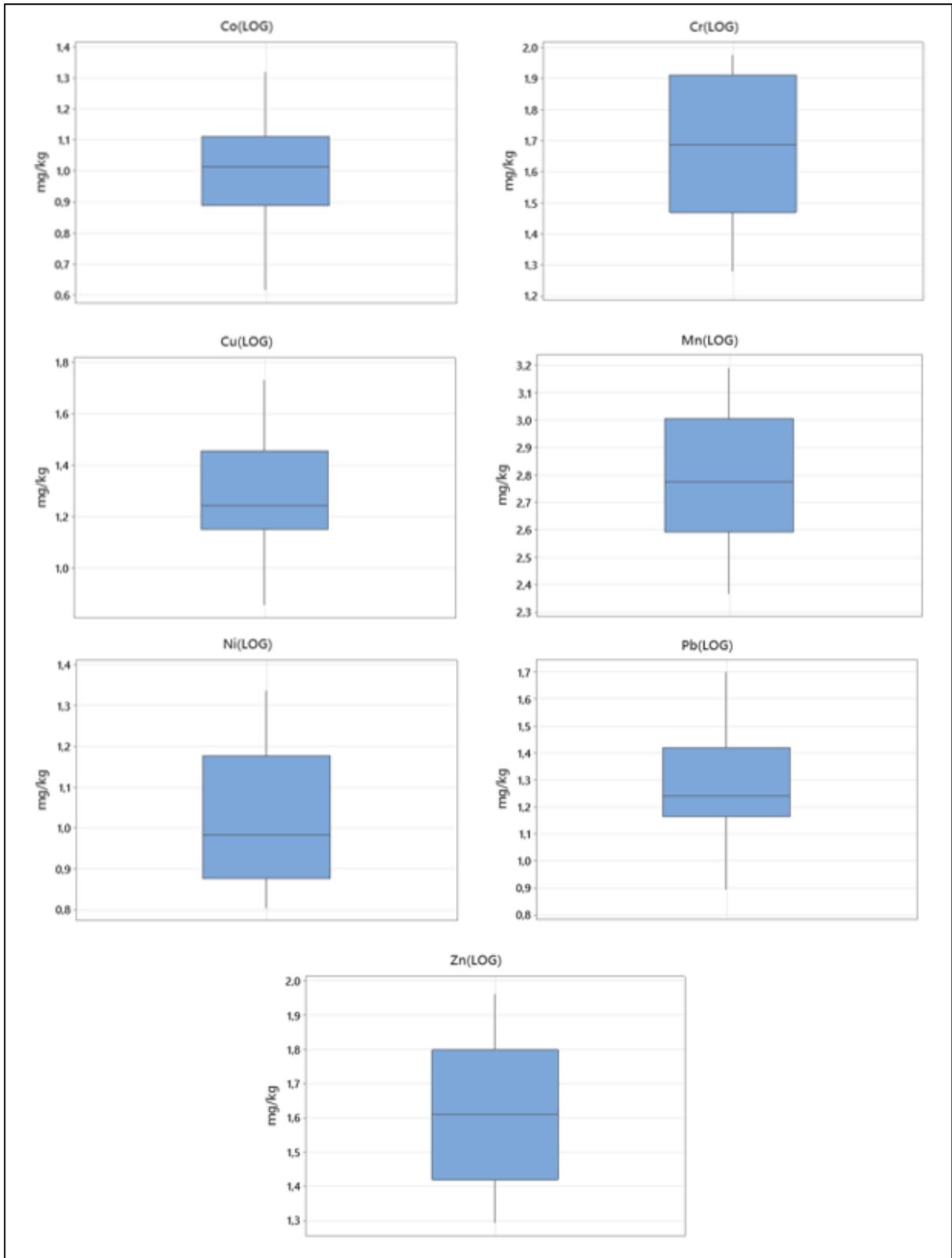


Figura 35: Diagramas boxplot referente aos dados logtransformados das análises químicas dos elementos metálicos traços Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb e Zn presentes nos sedimentos durante o período de estiagem da bacia do rio Santo Antônio.

Tabela 16: Matriz dos valores do coeficiente de correlação de Pearson para os dados obtidos no período de estiagem da bacia (sem tratamento prévio). Em amarelo são destacados os elementos que apresentam correlação positiva.

	Al	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Ti	Zn
Al	1,00														
Ca	-0,17	1,00													
Co	0,56	-0,23	1,00												
Cr	0,36	-0,44	0,12	1,00											
Cu	0,24	-0,05	0,05	-0,03	1,00										
Fe	0,14	-0,35	0,38	0,67	-0,12	1,00									
K	0,22	-0,13	0,56	-0,24	0,13	-0,24	1,00								
Mg	0,24	-0,04	0,49	-0,01	-0,01	-0,15	0,87	1,00							
Mn	0,05	-0,10	0,39	0,27	-0,13	0,53	-0,29	-0,11	1,00						
Na	-0,54	-0,17	-0,07	-0,38	0,36	-0,24	0,36	0,13	-0,29	1,00					
Ni	0,16	-0,51	0,26	0,90	-0,10	0,73	-0,06	0,14	0,36	-0,20	1,00				
P	0,12	-0,29	-0,28	0,19	-0,03	0,09	-0,26	-0,25	-0,22	-0,11	-0,01	1,00			
Pb	0,51	-0,19	0,75	-0,11	0,19	0,27	0,44	0,23	0,33	-0,10	-0,05	0,07	1,00		
Ti	0,28	0,01	0,60	-0,08	0,66	0,25	0,43	0,25	0,23	0,22	0,03	-0,27	0,72	1,00	
Zn	0,24	-0,35	0,39	0,55	0,29	0,82	0,00	-0,04	0,33	-0,04	0,61	0,19	0,49	0,56	1,00

Tabela 17: Matriz dos valores do coeficiente de correlação de Pearson dos dados previamente logtransformação. Em amarelo são destacados os elementos que apresentam correlação positiva.

	Al	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Ti	Zn
Al	1,00														
Ca	-0,14	1,00													
Co	0,47	-0,17	1,00												
Cr	0,49	-0,41	0,15	1,00											
Cu	0,17	-0,01	0,04	0,11	1,00										
Fe	0,37	-0,29	0,36	0,75	0,06	1,00									
K	0,24	-0,06	0,65	-0,26	0,19	-0,21	1,00								
Mg	0,29	0,03	0,63	0,06	0,13	0,03	0,80	1,00							
Mn	0,11	-0,08	0,53	0,27	-0,05	0,52	-0,14	0,09	1,00						
Na	-0,60	-0,23	0,00	-0,38	0,23	-0,25	0,39	0,09	-0,23	1,00					
Ni	0,27	-0,53	0,37	0,87	-0,01	0,67	-0,04	0,24	0,35	-0,11	1,00				
P	0,49	-0,25	-0,14	0,56	0,06	0,56	-0,26	-0,08	-0,04	-0,29	0,29	1,00			
Pb	0,47	-0,21	0,62	0,08	0,04	0,37	0,47	0,32	0,40	0,00	0,15	0,31	1,00		
Ti	0,10	0,05	0,68	-0,06	0,49	0,28	0,57	0,44	0,40	0,31	0,11	-0,25	0,58	1,00	
Zn	0,26	-0,36	0,36	0,54	0,43	0,79	0,10	0,10	0,26	0,16	0,56	0,46	0,51	0,57	1,00

4.2.4.2.1. Correlação entre os elementos nas amostras de sedimentos

Nas Figuras 36 e 37 são apresentados os gráficos de correlação entre os elementos Ca-Mg; Cr-Fe-Mn-Ni; Co-Pb-Ti; e Cu-Zn. Logo em seguida, são apresentadas as discussões sobre as correlações constatadas.

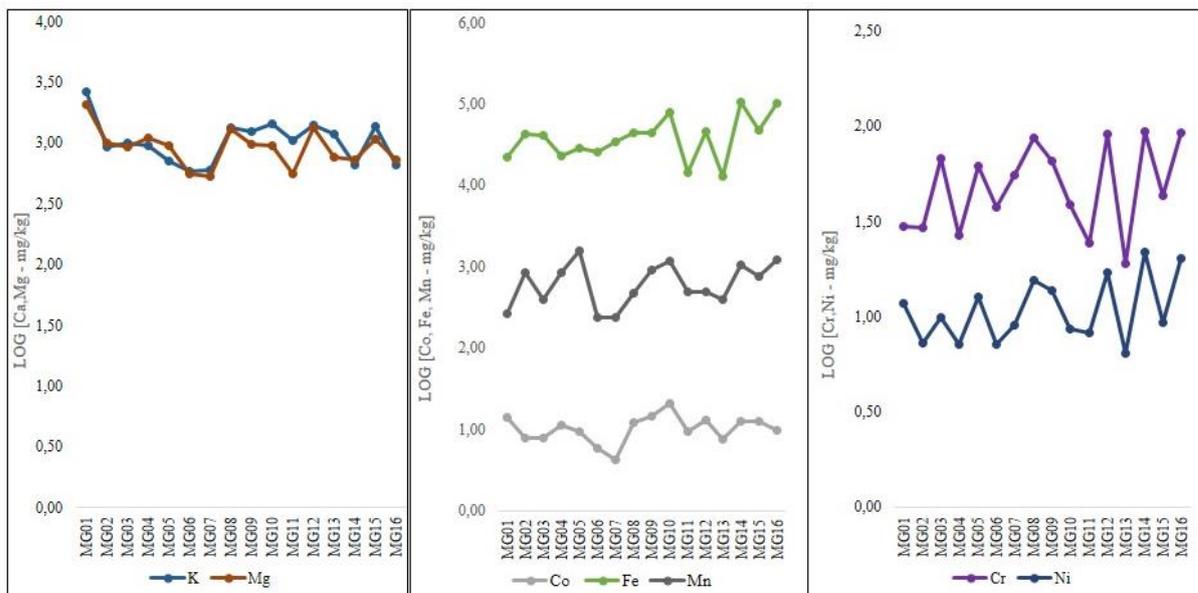


Figura 36: À esquerda apresenta-se o gráfico referente à concentração logtransformada dos elementos potássio e magnésio (mg/kg) nos sedimentos ao longo da bacia. Ao centro encontra-se o gráfico referente à concentração logtransformada dos elementos cobalto, ferro e manganês (mg/kg) ao longo da bacia. Já à direita apresenta-se o gráfico referente à concentração logtransformada dos elementos cromo e níquel (mg/kg) ao longo da bacia.

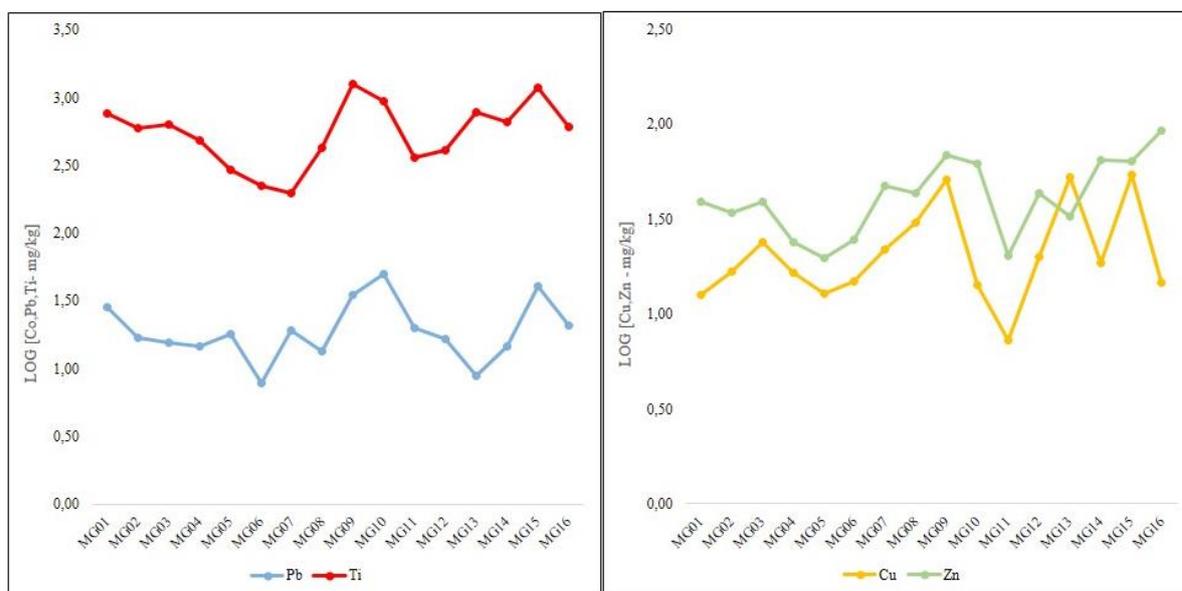


Figura 37: À esquerda verifica-se o gráfico que correlaciona a concentração dos elementos chumbo e titânio (mg/kg) ao longo da bacia. À direita verifica-se o gráfico que correlaciona a concentração dos elementos cobre e zinco (mg/kg) ao longo da bacia.

K e Mg - O Potássio e o Magnésio são elementos alcalinos, classificados como litófilos de acordo com GOLDSCHMIDT (1937) e apresentam afinidade química e comportamento geoquímico semelhante. Relacionando os gráficos de K e Mg apresentados na Figura 36 e o teste de correlação de Pearson pode-se apontar a correlação positiva entre os elementos nas amostras de sedimentos nas drenagens da bacia do rio Santo Antônio.

Os maiores picos de concentração dos dois elementos na área da bacia foram encontrados nos pontos MG01, MG08 e MG12. A mineralogia dos pontos de amostragem é composta por: MG01 - quartzo, muscovita, microclina, caulinita, gibbsita e anfibólio; MG08 - quartzo, caulinita, muscovita e gibbsita; e MG12 - quartzo, caulinita, albita e gibbsita. Esses minerais primários e secundários retratam uma típica mineralogia de granitos e gnaisses intemperizados nos sedimentos.

Assim, as possíveis fontes para os elementos na bacia são os granitos e gnaisses da Suíte Borrachudos e os granitos e gnaisses dos complexos basais arqueanos (visto que o substrato das drenagens reflete a composição química das rochas do entorno), além de metadiabásios, basaltos, gabros e rochas básicas da Suíte Pedro Lessa (Tabela 9).

Fe, Co, Mn: De acordo com a classificação de GOLDSCHMIDT (1937), os elementos ferro, cobalto e manganês apresentam afinidade geoquímica, e são classificados como siderófilos. Nos sedimentos da bacia do rio Santo Antônio observou-se a correlação entre os citados elementos (Figura 36; Tabela 16 e 17).

As maiores concentrações de Fe, Co e Mn estão relacionadas aos pontos MG10, MG14, MG15 e MG16.

O ponto MG10 é influenciado pela mineração das rochas do Grupo Serra da Serpentina. A Tabela 9 mostra que o itabirito e o filito ferruginoso deste Grupo são as litologias que apresentam as maiores concentrações de ferro, cobalto e manganês. A presença de hematita e goethita na amostra do ponto MG10 sustentam a argumentação baseada nos dados citados da tabela.

Na desembocadura da bacia existe uma concentração elevada destes elementos, sendo que sua fonte está relacionada à cabeceira do rio Doce e sua deposição relacionada ao rompimento da Barragem de Fundão.

Cr e Ni: De acordo com a classificação de GOLDSCHMIDT (1937), os elementos cromo e níquel são elementos classificados como siderófilos. Nos sedimentos da bacia do rio Santo Antônio verificou-se a correlação entre os elementos, confirmada pelo teste não-paramétrico de Pearson (Figura 36).

Os dados químicos de rocha apresentados na Tabela 9 mostram que as maiores concentrações do Cr e Ni nos sedimentos estão relacionadas aos afloramentos de rochas metabásicas e diabásios da Suíte Pedro Lessa, influenciando o ponto MG03 e o ponto MG12 nas proximidades do plutonito Senhora do Porto.

O ponto MG05 apresenta influência dos filitos ferruginosos do Supergrupo Espinhaço, pois se localiza próximo ao contato entre o Complexo basal arqueano e o Supergrupo

Espinhaço. Já a cabeceira do rio do Peixe recebe influência do Grupo Serra da Serpentina, detectada no ponto MG08.

Na desembocadura da bacia, o aumento de concentração dos elementos está relacionado à invasão das águas e dos sedimentos do rio Doce sobre o rio Santo Antônio, de modo que o Cr e o Ni neste local possivelmente são oriundos da mesma matriz, a cabeceira do rio Doce.

Pb-Ti: Na Figura 37 são apresentados gráficos das concentrações de Pb e Ti. Estes elementos foram classificados por GOLDSCHMIDT (1937) como calcófilos. Observa-se a correlação entre estes dois elementos em todos os pontos amostrados, corroborada pelo teste não-paramétrico de Pearson.

Os maiores picos de concentração destes elementos são encontrados nos pontos MG09, MG10 e MG15. Levando-se em conta a análise mineralógica e os dados químicos de rocha mostrados na Tabela 9, sugere-se que os granitos e gnaisses da Suíte Borrachudos e dos Complexos Basais Arqueanos são as possíveis fontes portadoras dos elementos, sendo que estas rochas afloram nos pontos MG09 e MG10.

A correlação entre Pb e Ti verificada no ponto MG15 tem relação com os sedimentos depositados pelo rio Doce, devido à sua influência na desembocadura do rio Santo Antônio.

Cu-Zn: O cobre e o zinco são elementos calcófilos (GOLDSCHMIDT, 1937). A correlação entre os elementos é constatada pela observação gráfica (Figura 37). Tal discrepância pode ser apontada por meio da não correlação entre os pontos MG01 (cabeceira do rio Santo Antônio) e os pontos MG14 e MG16 (desembocadura do rio Santo Antônio), pois os pontos acima mencionados são amplamente afetados pela influência antrópica – o primeiro afetado pela urbanização da cidade de Santa Maria de Itabira, e os últimos, pela influência do rio Doce.

O maior pico de concentração dos dois elementos foi verificado no ponto MG09, localizado nas proximidades de Senhora do Porto. Nesta localidade verifica-se a influência da Suíte Borrachudos, em que a concentração de Zn é equivalente a 160 ppm e de Cu é equivalente a 2 ppm (Tabela 9).

4.2.5. Índice de Geoacumulação

Para avaliar e expressar as informações sobre as características ambientais da bacia do rio Santo Antônio, utilizou-se o Índice de Geoacumulação (I_{geo}), que avalia em categorias a contaminação de metais em corpos hídricos e é obtido por meio da seguinte equação:

$$I_{geo} = \log_2 Cn / 1.5 \times Bn, \text{ em que:}$$

Cn = Concentração do elemento traço medido na fração fina (<0.063 mm) da amostra;

Bn = Valores de background tendo como referência os dados obtidos na área analisada;

1,5 = Constante definida para adequar o índice às possíveis flutuações nos valores de *background* na região de estudo.

Buscou-se verificar o grau de contaminação dos elementos Co, Cu, Cr, Pb e Zn no rio principal da bacia, o rio Santo Antônio, e em seus tributários, rio Guanhães, rio do Tanque, rio do Peixe, rio Preto e rio Preto do Itambé e córrego Jirau para os elementos analisados.

Como para a região ainda não foi determinado um *background* geoquímico, o método empregado em estudos ambientais para este tipo de situação é utilizar para o parâmetro (Cb) os valores de menor concentração de cada elemento ao longo da bacia, disponíveis na Tabela 18.

Tabela 18: Valores mínimos para cada um dos elementos analisados como referência para a análise de background para cálculo do Índice de Geoacumulação (Igeo).

Elementos	Cu	Cr	Co	Pb	Zn
Concentração mg/kg	7,24	19,09	4,14	7,83	19,76

A Tabela 19 apresenta o índice de geoacumulação para cada um dos elementos analisados e a classificação do enriquecimento ambiental das drenagens da bacia do rio Santo Antônio. Segundo os dados, as drenagens da bacia podem ser enquadradas na classe 1 da classificação Igeo, para os elementos Co, Cu, Cr, Pb e Zn (Tabela 4), indicando que o grau de poluição é muito baixo em relação aos elementos investigados.

Tabela 19: Valores médios do índice de Geoacumulação nas principais drenagens da bacia do rio Santo Antônio.

	Valores médios do índice de Geoacumulação					Número de amostras
	Co	Cu	Cr	Zn	Pb	
Rio Santo Antônio	0,48	0,41	0,19	0,18	0,34	7
Rio Guanhães	0,61	0,46	0,22	0,19	0,39	2
Rio do Peixe	0,64	0,40	0,20	0,19	0,40	2
Rio do Tanque	0,48	0,37	0,177	0,17	0,43	1
Rio Preto do Itambé	0,56	0,37	0,165	0,15	0,35	1
Rio Preto	0,58	0,34	0,65	0,14	0,35	1
Córrego Jirau	0,61	0,34	0,17	0,18	0,41	1
Classificação Igeo	Pouco poluído	Pouco poluído	Pouco poluído	Pouco poluído	Pouco poluído	

4.2.6. Comparações entre os resultados e a legislação ambiental

4.2.6.1 Comparação dos elementos analisados na água com os limites estabelecidos pela CONAMA 357/2005

A regulamentação CONAMA 357/2005 estabelece os limites máximos para a concentração dos metais Al, Ca, Fe, Mg e Mn na água em relação à classe 2, sendo que tais valores estão expostos na Tabela 20.

Tabela 20: Valores dos limites máximos da classe 2 dos metais Al, Ca, Fe, Mg e Mn de acordo com a regulamentação CONAMA 357/2005.

Elementos químicos	Classe 2 (mg/L)
Alumínio (Al)	0,1
Cálcio (Ca)	5
Ferro (Fe)	0,3
Magnésio (Mg)	1
Manganês (Mn)	0,1

- O alumínio foi encontrado somente no ponto MG03 e a concentração do elemento neste local esteve abaixo do limite máximo estabelecido para a classe 2 da norma.

- O cálcio foi encontrado em todas as amostras. Nos pontos MG03, MG07 e MG16 a concentração do elemento esteve acima do limite máximo estabelecido para a classe 2 da legislação.

- O ferro foi encontrado em todas as amostras. Nos pontos MG01, MG02, MG03, MG04, MG06, MG07, MG09, MG12 e MG15 as concentrações de Fe estiveram acima do limite máximo permitido para a classe 2 da legislação.

- O magnésio foi encontrado em todas as amostras. Nos pontos MG01, MG03, MG07, MG09, MG14, MG15 e MG16 as concentrações de Mg estiveram acima do limite máximo permitido para a classe 2.

- O manganês foi detectado em cinco pontos de amostragem, sendo eles: MG03, MG07, MG09, MG12 e MG15. No ponto MG15, a concentração do elemento esteve acima do limite máximo permitido para a classe 2.

De acordo com os resultados apresentados, com exceção do Al, os demais elementos apresentaram em alguns pontos concentrações que superaram os limites máximos exigidos para

a classe 2 da CONAMA 357/2005. No entanto, são necessários mais estudos para avaliar se tais concentrações podem representar danos ao ecossistema aquático e a vida em geral.

4.2.6.2. Comparação dos elementos analisados nos sedimentos com os limites estabelecidos pela CONAMA 454/2012

A regulamentação CONAMA 454/2012 estabelece os limites máximos para a concentração dos metais As, Cd, Pb, Cu, Cr, Ni e Zn nos sedimentos em relação aos níveis 1 e 2, sendo que tais valores estão expostos na Tabela 21.

Como para a área de estudo não foram definidos valores de *background* geoquímico, os resultados da análise química foram comparados com os dados da tabela mencionada abaixo.

Tabela 21: Níveis de concentração dos elementos químicos permitidos pela resolução CONAMA 454/2012. Nível 1: limiar abaixo da menor probabilidade de efeitos adversos na biota; Nível 2: limiar acima de maior probabilidade de efeitos adversos na biota (Fonte: CONAMA, 2012).

Elementos químicos	Nível 1 (mg/kg)	Nível 2 (mg/kg)
Arsênio (As)	5,90	17,00
Cádmio (Cd)	0,60	3,50
Chumbo (Pb)	35,00	91,30
Cobre (Cu)	35,70	197,00
Cromo (Cr)	37,30	90,00
Níquel (Ni)	18,00	35,90
Zinco (Zn)	123,00	315,00

- O Arsênio foi encontrado na confluência do rio Santo Antônio (MG14) com o rio Doce e esteve acima do nível 2 da regulamentação CONAMA 454/2012; e o segundo ponto localizado no rio Doce (MG16), esteve abaixo do limite estabelecido para o nível 1.

- O cádmio foi encontrado nos pontos MG12, MG14 e MG16, e esteve acima do limite máximo para o nível 2.

- O chumbo foi encontrado em todas as amostras e esteve acima do nível 1 somente nos pontos MG09, MG13 e MG15.

- O cobre foi detectado em todas as amostras. Valores de concentração acima do limite determinado para o nível 1 foram detectados nos pontos MG08, MG09 e MG15.

- O cromo foi encontrado em todos os pontos. Nas amostras coletadas nos pontos MG03, MG05, MG06, MG07, MG08, MG09 e MG10, as concentrações estiveram acima dos limites para o nível 1 da regulamentação, já nos pontos MG12, MG14 e MG16, as concentrações de cromo estiveram acima do que a norma exige para o nível 2.

- O níquel foi detectado em todas as amostras coletadas na bacia. Nas amostras coletadas nos pontos MG14 e MG16, as concentrações do elemento estiveram acima do valor limite estabelecido para o nível 1.

- O zinco foi encontrado em todas as amostras, sendo que em todas elas as concentrações do elemento foram inferiores ao limite máximo estabelecido para o nível 1 da regulamentação CONAMA 454/2012.

De acordo com os resultados apresentados, com exceção do Zn, os demais metais apresentaram concentrações acima dos limites exigidos para o nível 1 da norma. Já o As, Cd e Cr em alguns pontos, apresentaram concentrações acima do limite máximo exigido para o nível 2 da regulamentação. Essas informações nos mostram que a área de estudo necessita ser continuamente monitorada para se conhecer a evolução dos citados metais (As, Cd, Cr), pois estes elementos, de fato, podem representar danos ao ecossistema aquático e a vida em geral.

CAPÍTULO 5

ASSESSMENT ON BOTTON SEDIMENTS IN THE SANTO ANTÔNIO RIVER BASIN, TRIBUTARY OF THE DOCE RIVER-MG

1. Introduction

The Santo Antônio river basin is a left bank tributary of the Doce river basin, which is the most preserved of the entire basin and one of the best preserved in the state of Minas Gerais, sheltering about 90% of all remaining species of the endemic ichthyofauna (VIEIRA 2006, 2009).

Agriculture along the Santo Antônio river basin is mainly composed of sugarcane, coffee and corn cultivation (IBGE 2020). The local industrial activities are represented in this region mainly by iron mining and the production of wood, paper and cellulose (CBH SANTO ANTÔNIO, 2019). As for livestock, (OVIEDO-PASTRANA *et al.*, 2014) classified the development of dairy farming in the region as little to moderately developed.

As in several other hydrologic basins in the state, the population increase in the surroundings of the tributary and together with the ineffective planning of the use of water resources, inadequate land use practices, uncontrolled industrialization and resource management resulted in the drop in the quality and quantity of water in the basin and has caused the missing of common fish species to be fished by local residents, such as the Andirá (*henochilus wheatlandii*) (REIS *et al.*, 2017).

Pollution of water and sediments, mainly by highly hazardous metals, is a factor that can change the physico-chemical dynamics of the aquatic environment in terms of its environmental quality, as the mobilization of these elements can affect the local biome and the supply of drinking water to the population (FÖRSTNER, 2004).

In this sense, some activities in the basin region are worrisome, as they can have a direct impact on the dynamism of the drainages. One of them is the inefficiency of sanitation in the region. It is important to emphasize that all 29 municipalities that make up the basin collect their domestic and industrial sewage, however, only five treat part of the collected sewage (ANA, 2018).

Another factor impacting the basin is mining. Soil remobilization is responsible for a significant production of sediment that are silting up drainages. The capture of water to

transport iron ore production to Brazilian ports in pipelines is responsible for a significant reduction in the flow of the rivers in the basin. Furthermore, in 2015 the dam of an important mining company in the county of Mariana, Minas Gerais, broke. This dam contained iron ore residues were transported until to the Doce river and which in turn flooded the confluence of the Santo Antônio river with a significant amount of these sediment.

In the Doce river basin, arsenic is available in the environment due to the exploitation of gold in recent centuries. The natural occurrence of the element (FeAsS - Arsenopyrite) is extremely common in the paragenesis of the valuable resource, found near the headwaters of the Ribeirão do Carmo and also of other tributary of the Doce river (COSTA, 2007; ROESER & ROESER, 2010; REIS, 2019). The mobilization of this element from sediments was enhanced with the rupture of the Fundão dam, which occurred in 2015 in Mariana, making these elements available in water and deposited in the sediments downstreams in concentrations never before found in the basin.

The bioaccumulation or biomagnification of As is the greatest danger verified for the riverside population, since fishing near the confluence of the Santo Antônio river with the Doce river is very common. Still there are no records of human intoxication by this element along the river.

Still on the alteration of the natural dynamics of the Santo Antônio river basin, the deforestation of native Atlantic Forest vegetation, usually by fire cleaning due to the practice of forestry and agriculture in the region, are also responsible for the production of sediments and siltation of drainages, in addition to the possible transport of contaminants.

In addition to these activities, the Santo Antônio river basin has also hydroelectric potential. According to the “Companhia Energética de Minas Gerais S.A.” (CEMIG, 2020), there are four Hydroelectric Plants (UHE) and three Small Hydroelectric Plants (PCH) along the basin. VIEIRA (2006) sees the presence of these hydroelectric plants as a potential risk to the natural river dynamics due to the imminent damage generated to the natural biome of the basin.

Beside the mentioned important anthropogenic activities that can cause a high concentration of metals in this basin, there are also natural enrichment processes. They act in the release of metals to the environment, such as the process of leaching, solubilization and alteration of minerals contained in these rocks through the action of water, by the action of

organic and inorganic compounds available in the environment and conditions related to relief and its morphology (GROTZINGER & JORDAN, 2013; CALIJURI & CUNHA, 2013).

Sediments can be defined as fragmentary materials arising from the action of weathering and erosion of rocks and soils, transported by supergene agents and deposited in areas of lower energy levels, often basins (CPRM, 2019). SALOMONS & FÖRSTNER (2010) understand that sediments are important historical registers for comprehension of the dynamics and rate of pollution of a given water body. A series of studies carried out in rivers around the world – As examples: VINK *et al.*, (1999) in Europe, ZHENG *et al.*, (2008) in China, EL-KAMMAR *et al.*, (2009) in Egypt, HORN *et al.*, (2014) in Brazil – emphasize the importance of analyzing metals and metalloids in sediments to obtain information about the real situation.

The particle size and the mineral composition are important factors for the enrichment of metals in sediments, as coarser sediments tend to reflect the characteristics of the local geology, while finer sediments act in the adsorption, storage and transport of metals through the environment (SALOMONS & FÖRSTNER, 1984; 2010).

Questions about particle size and concentration of metals lead to the questioning of the origin of elements in an aquatic environment, whether this is geogenic or anthropogenic. The answers to the question presented are acquired through in-depth geochemical studies on the area to be researched, and in the correlation between geochemistry and other areas of knowledge such as biology and toxicology (RODRIGUES & NALINI JÚNIOR, 2009).

However, studies on the sediments of Brazilian rivers are still scarce and logistic and geographic obstacles often are aggravating their realization, local universities are the main channels for collecting and disseminating data in this regard.

Even so, (RODRIGUES & NALINI JÚNIOR, 2009) stated that it is very important to determine the regional geochemical background for this type of study, to permit the understanding of the natural levels of metals in the environment and analyzing possible contamination generated by anthropogenic action.

As the geochemical background of the study area is not determined, other parameters were used to characterize the distribution of metals in the basin. To establish the provenance of the metals in the basin, chemical data of the rocks in the study area were used, together with the GOLDSCHMIDT (1937) classification, to obtain information about the distribution and behavior in the basin.

In Brazil, CONAMA Resolution 454/2012 is used as a reference to assess possible sediment contamination related to the metals As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn and how these elements can influence the aquatic environment. It is noteworthy that the concentration values of the aforementioned metals are identical to the concentration values suggested by the Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME 1999; CCME 2005), therefore, due to climatic, lithological and other factors, do not reliably reflect the characteristics of drainage in the Brazilian territory.

Given the above scenario and given the doubts to be answered, the objective of this research is to evaluate the influence of local lithology and human activities on the quality of surface water in the Santo Antônio river basin. This is done by the analysis of metals in the bottom sediments of the drainages, by correlation with the chemical data of the lithologies surveyed in the study area.

1.1. General characteristics of the study area

The Santo Antônio river basin is located in the eastern portion of the state of Minas Gerais (Fig.1). The basin surface drainage area is approximately 10,429.26 km², representing 15.12% of the Doce river basin area. The source of the Santo Antônio river, the main one in the basin, is located near Conceição do Mato Dentro-MG city. The river runs about 280 km to its confluence, which is located on the outskirts of the of Naque-MG city. The main tributaries of the Santo Antônio river are: Tanque river, Preto do Itambé river, Peixe river, Guanhões river and Jirau stream.

In 2018, flows were measured at the fluvimetric stations: Conceição do Mato Dentro, located at the source of the Santo Antônio river; and Naque Velho, located near the confluence of the Santo Antônio river. The first recorded a maximum flow of 90.6 m³/s in February (rainy period), a minimum flow of 0.813 m³/s in the month of August (dry period) and an average annual flow of 5.28 m³/s, while the second recorded maximum flow of 1218.78 m³/s in December (rainy period), minimum flow of 25.4 m³/s in August (dry period), and average annual flow of 102.39 m³/s (ANA, 2020).

The ichthyofauna present in the Santo Antônio river and its tributaries is one of the most preserved and conserved not only in the state of Minas Gerais, but in the Atlantic Forest biome, sheltering about 90% of all endemic species found in the Doce river basin.

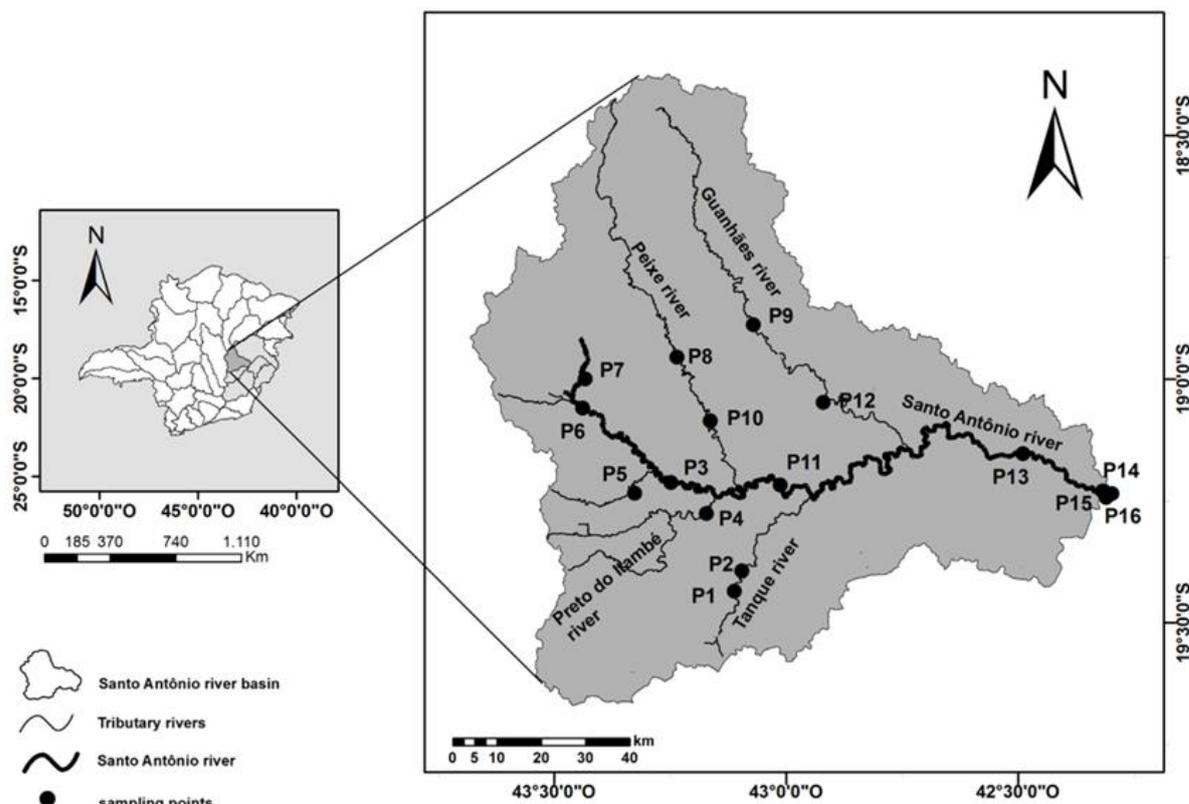


Figure 1: Location of Santo Antônio river basin in Minas Gerais/Brazil.

As for the remaining vegetation in the study area, about 98% of this is composed of the Atlantic Forest biome, with the remainder composed of the Cerrado biome. In the basin area, there are thirteen Conservation Units (PIRH, 2010).

The Santo Antônio river basin contains the following geomorphological units: the chain of quartzitic mountains referring to the Serra do Espinhaço, which are located in the western region of the study area; the plateau region that is located in the central part of the basin area; and the eastern region of the basin area, where the Doce river depression is located. In this way, the local landscape is composed of flat, undulating and uneven terrain in which the altitude varies between 133 and 1584 meters (IDESISEMA, 2019; EMBRAPA, 2020).

The main soil units found in the region are: Red Latosols, Red-Yellow Latosols and Red-Yellow Podzolics. Yellow Latosols, Purple Latosols, Cambisols and Litholic Neosols are also verified, with these having lesser local representation (AMARAL *et al.*, 2004).

According to Koppen's Classification, the predominant climate in the Santo Antônio river basin is the Cwa, characterized by abundant rainfall during the summer and dry weather during the winter (VIEIRA, 2006).

INMET (2019) collected data regarding the average temperature and rainfall for the entire Brazilian territory in the year 2018. According to the data collected, it was found that the average temperature in the region of the basin studied in that year is approximately 22°C and the total annual precipitation index in the Santo Antônio river basin region ranged from 1600 to 1800 mm.

The Santo Antônio river basin is characterized by a period of flood and drought, which are quite distinct during the year (ANA, 2020). The flood period in the study area is concentrated between the months of November to March, when the total monthly rainfall can exceed 500 mm. The dry period is verified between the months of May to September, when rainfall is scarce in the region (VIEIRA, 2006).

The geology of the region under study is represented by a varied geological framework (Fig.2), available below:

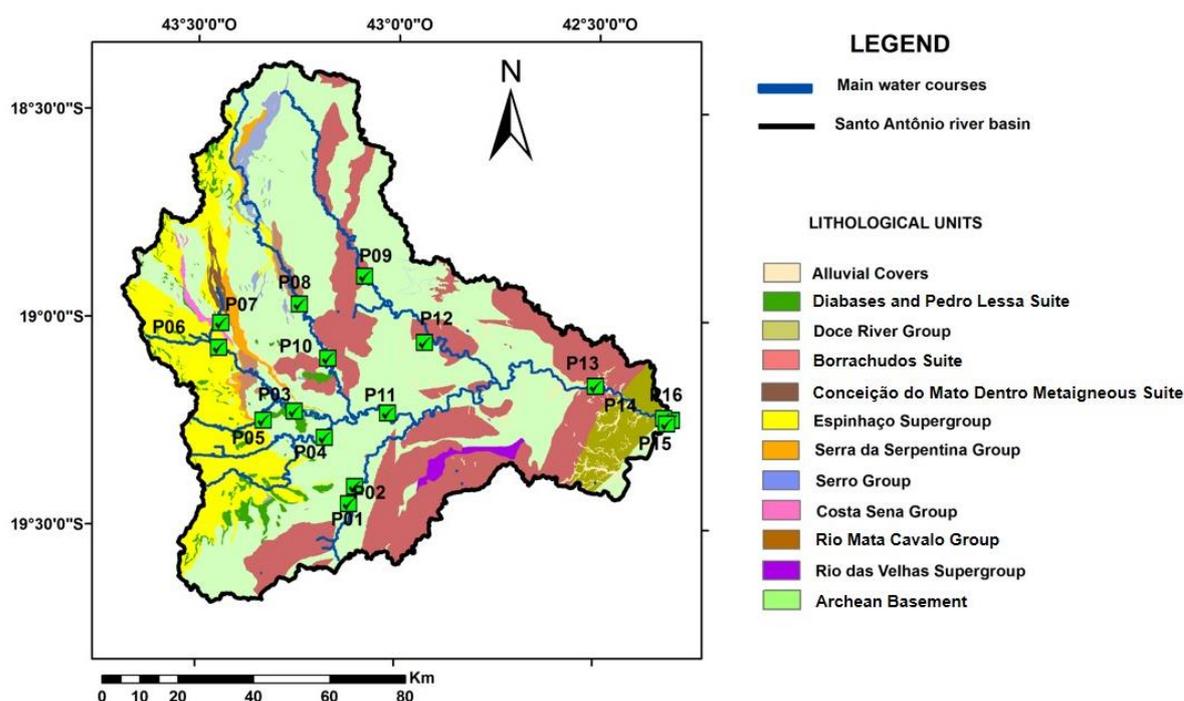


Figure 2: Lithological units around Santo Antônio river basin and sampling points in the study area (Source: CODEMIG, 2003; CPRM, 2019; INSTITUTO PRÍSTINO, 2019).

Table 1 describes the concentrations of some trace elements in the main lithologies found in the study area, which are described in ppm (Cr, Cu, Ni, Pb e Zn).

Table 1: Chemical composition of the main lithologies forming the basement of the Santo Antônio river basin area. (Cr, Cu, Ni, Pb e Zn in ppm).

Unit	Rock	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Observations
A.B.C. - Gouveia Complex	Granite with migmatitics intercalations	6	-	3	-	-	Sample located in 7.913.300N/657.800E coordinates (HERRGESELL, 1984)
A.B.C. - Basal Complex	granodiorite	-	31	-	284	256	Sample GU-100 of Guanhões Batholith next to Senhora do Porto (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1989)
Borrachudos suite	ortogneiss	-	-	-	30	78	Sample AK048 of OLIVEIRA (2002)
Borrachudos suite	granite	-	2	-	23	160	Sample GU-P-111B of Plutonito Senhora do Porto (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1989)
Borrachudos suite	granite	2	2,8	-	109	40	Sample 5218 collected in Dores de Guanhões - (FERNANDES <i>et al.</i> , 1994)
Espinhaço Supergroup	ferruginous phyllite	48	40	11	-	-	Sample MR-361 of HERRGESELL (1984)
Serra da Serpentina Group	Itabirite	6	3	12	1	24	Sample FS-SS-3 of DUSSIN (1985)
Serra da Serpentina Group	ferruginous phyllite	10	57	32	11	72	Sample FS-SS-5 of DUSSIN (1985)
Diabases, metabasics rochas and Pedro Lessa suite	metadiabases	147	88	97	-	126	Average between 8 Samples de metadiabaseses [M96, 396, 79, 376-A, 9, 7, 328 e 393-A], GUIMARÃES (1992)
Diabases, metabasics rocks and Pedro Lessa suite	metabasites	295	95	132	21	82	Sample MI04 of (GROSSI-SAD <i>et al.</i> , 1989)

2. Materials and methods

2.1. Sampling plan

The geological map for the Santo Antônio river basin was made with the help of ArcGIS 10.3® software by importing data from the survey carried out by (CODEMIG, 2003) in reference to the Geological Map of the State of Minas Gerais, scale of 1: 100,000. The geological map for the basin was carried out using shapefiles from Baldim, Belo Horizonte, Conceição do Mato Dentro, Coronel Fabriciano, Dom Cavati, Guanhões, Ipatinga, Itabira, Presidente Kubistchek, Rio Vermelho and Serro leaves, provided by (CODEMIG, 2003).

The geographic coordinates of the sampling stations were acquired by the Global Positioning System (GPS), model GPS II, brand GARMIN, UTM coordinate system, Datum SIRGAS 2000, Fuso 23S. Sixteen sediment samples were collected along the basin during the basin's dry period: 09/23 to 09/25, in 2019 (Fig.3).



Figure 3: The photo on the left side refers to Sampling Point P03, located in the city of Santo Antônio do Rio Abaixo-MG. The photo on the right side refers to Sampling Point P07, located in the city of Conceição do Mato Dentro-MG.

2.2. Preparation of samples

The material was collected at the sampling points with the aid of a Birge-Ekman dredger and a suitable stainless material sampler. After collection, each sample was stored in polyethylene bags, and the samples were dried in a natural way. Then, the sediments were sent to the sieving stage. The thinnest portion of the samples (less than 0.062 mm) were taken to the Environmental Sanitation laboratory of PROAMB/UFOP for partial digestion of the samples using the methodology described by (MOUTTE, 1990), which consists of the attack using hydrochloric and nitric acids (HCl/HNO₃, 3:1, 7.0 mL of concentrated HCl and 2.3 mL of HNO₃) for opening the system and extracting metals.

2.3. Chemical analysis

The concentrations of metals and metalloids were analyzed by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-OES), Spectro brand and the Ciros model, in the geology department of the Federal University of Ouro Preto.

2.4 Treatment of results

The data obtained in the laboratory chemical analyzes of sediments by ICP-OES were submitted to bivariate statistical analysis to obtain information on possible correlations between the elements, and the activities were carried out using Minitab19® software.

Information about the correlation between metals can be an important key to unravel the origin of the elements in the basin. The method used for this purpose was the non-parametric Pearson test. The data obtained from the chemical analyzes were previously log transformed to mitigate the effects of the anomalies. The results of that test are shown in table 2. Arsenic and

Cadmium were not considered in this test as they were not detected in all sampled points. As shown in table 2, Pearson's correlation coefficients showed a positive correlation, that is, ($\pm 1 \geq R^2 \leq \pm 0.7$) for the elements Cr and Ni ($R = 0.87$).

Table 2: Matrix of Pearson's correlation coefficient values considering log transformation of the data obtained during the basin's dry period.

	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Cr	1,00				
Cu	0,11	1,00			
Ni	0,87	-0,01	1,00		
Pb	0,08	0,04	0,15	1,00	
Zn	0,54	0,43	0,56	0,51	1,00

3. Results and discussions

As the study area does not contain data referring to the geochemical background, the discussion of the results was based on CONAMA Resolution 454/2012, whose concentration values are shown in table 3, below:

Table 3 – CONAMA (2012) Classification for selected dangerous chemical elements. Level 1 (threshold below the least likely adverse effects on the biota); Level 2 (threshold above the greatest probability of adverse effects on the biota). (Source: CONAMA, 2012).

Chemical Elements	Level 1 (mg/kg)	Level 2 (mg/kg)
Arsenium (As)	5,90	17,00
Cadmium (Cd)	0,60	3,50
Lead (Pb)	35,00	91,30
Cooper (Cu)	35,70	197,00
Cromium (Cr)	37,30	90,00
Nickel (Ni)	18,00	35,90
Zinc (Zn)	123,00	315,00

The distribution of elements along the basin are visible in (Fig.4) and the concentrations of chemical elements obtained in this study can be seen in table 4.

The yellow dots correspond to metal concentrations that are below level 1. The orange dots represent concentrations that are between level 1 and level 2, while the red dots correspond to concentrations above level 2, as reported by the resolution CONAMA 454/2012.

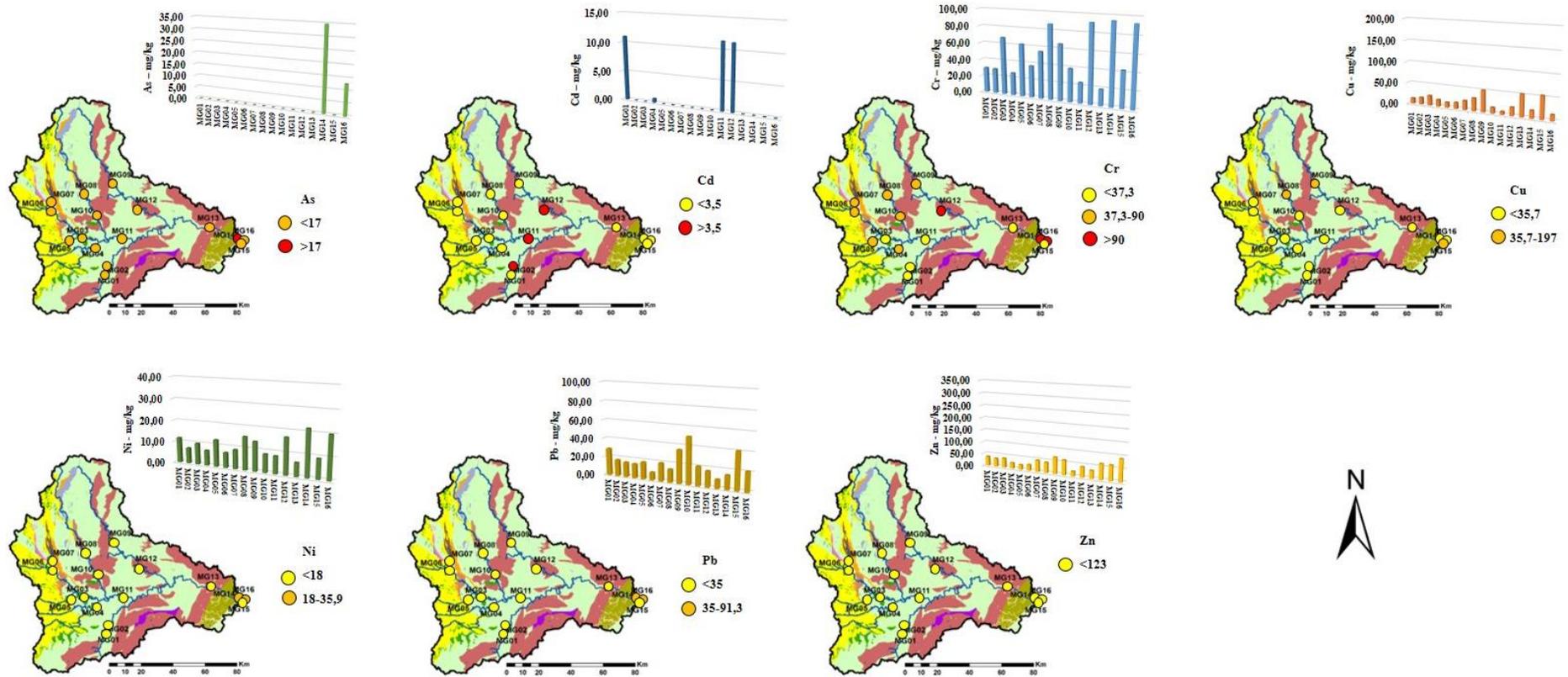


Figure 4: Element concentration verified in sediments during the 2019 dry season.

Table 4: Elements detected in the study area of the Santo Antônio river basin. The concentration values are expressed in mg/kg. (LQ=quantitation limit).

Sample	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	mg/kg						
P01	<LQ	11,05	29,85	12,57	11,78	28,50	39,00
P02	<LQ	<LQ	29,45	16,63	7,31	16,93	34,36
P03	<LQ	<LQ	67,88	23,72	9,97	15,39	38,75
P04	<LQ	0,72	26,64	16,40	7,13	14,68	23,88
P05	<LQ	<LQ	61,94	12,70	12,60	17,87	19,76
P06	<LQ	<LQ	37,49	14,87	7,13	7,83	24,53
P07	<LQ	<LQ	55,29	21,84	8,99	19,01	47,31
P08	<LQ	<LQ	86,95	30,51	15,49	13,42	43,56
P09	<LQ	<LQ	65,85	51,03	13,77	35,26	68,77
P10	<LQ	<LQ	39,05	14,15	8,58	49,87	61,45
P11	<LQ	11,42	24,30	7,24	8,23	20,08	20,22
P12	<LQ	11,29	91,54	19,95	17,06	16,47	43,01
P13	<LQ	<LQ	19,09	52,31	6,39	8,84	32,79
P14	34,69	<LQ	94,53	18,46	21,77	14,63	64,16
P15	<LQ	<LQ	43,04	53,93	9,28	40,30	63,52
P16	12,86	<LQ	92,82	14,56	20,10	20,73	91,82
LQ	7,58	0,49	1,08	1,23	3,02	7,08	0,31

According to the results presented, with the exception of Zn, the other metals presented concentrations above the limits required for level 1 of the standard. On the other hand, As, Cd and Cr, in some points, presented concentrations above the limit required for level 2 of the regulation. This information shows us that the concentrations of the aforementioned metals in the study area can cause damage to the aquatic ecosystem, according to CONAMA resolution 454/2012.

3.1 Probable origin of elements

A probable origin was constructed for the elements found in the Santo Antônio river basin. The data presented in the table 1 support the discussion about the origin of the metals in the basin that will be presented follow.

3.1.1 Arsenic

Arsenic and iron are elements that have great chemical affinity, and that is why they are called siderophiles, according to GOLDSCHMIDT (1937). As was found only at a specific point in the Santo Antônio river basin, at its mouth (P14). The other point in the campaign at which the presence of the element in the sediments was evidenced was in the Doce river (P16). Thus, the mean concentration of the element in the sampled points is As (\bar{x} = 23.78 mg.kg⁻¹). It

is believed that the sediment contamination at the Santo Antônio river confluence is due to the direct influence of the Doce river, which contributed a large volume of sediment in its tributary through the rupture of the Fundão tailings dam, in Mariana-MG.

3.1.2 Cadmium

Cadmium is an element that has a strong chemical affinity with copper, and that is why this element is classified by GOLDSCHMIDT (1937) as calcophile. The occurrence of the element in the basin was detected at three specific points: at the point located in the Jirau stream, within the urban area of the city of Santa Maria de Itabira (P01); on the Santo Antônio river, in the urban area of the city of Ferros (P11); and on the Guanhães river, in the urban area of the city of Dores de Guanhães (P12). The mean concentration of Cd in the basin is (\bar{x} = 8.62 mg.kg⁻¹). A possible justification for the presence of cadmium being linked to the basin's urban areas is that this element has recurrent use in industry. The main activities or practices that exemplify its use in that sector are: anticorrosive in galvanized steel; pigmentation of plastics; compose the structure of batteries, rechargeable batteries and electronic components (CETESB, 2020).

3.1.3 Lead, copper and zinc

Lead and zinc are chemical elements that have similar behavior and chemical affinities with copper, being classified as chalcophile, according to GOLDSCHMIDT (1937). Figures 5, 6 and 7 show that these three elements have similar behavior between collection points P2 and P12. This fact may be related to the influence of the regional lithology represented by the granites and gneisses of the Archean basal complexes and the Borrachudos suite, as well as the metadiabases and metabasites of the Pedro Lessa suite, which, according to the rock chemical data presented in table 1, are the main sources of these elements in the basin.

At collection points P1, referring to the urban area of Santa Maria de Itabira, and at points P13 and P15 referring to the lower Santo Antônio river, they show the anthropogenic influence on the basin, in which the calcophiles elements mentioned do not show any correlation. Point P1 is drastically affected by the influence of domestic and industrial sewage in the urban area of the city. The influence of domestic and industrial waste also occurs at point P13, urban area of the city of Açucena. At points P14 and P15, which are located at the confluence of the Santo Antônio river, the sediments at the site receive the direct influence of the Doce river (P16), which contributed a large volume of sediments to its tributary through the rupture of the Fundão

tailings dam, in Mariana-MG in 2015, and therefore, dispersed the lithological influence of the cited chalcophiles elements.

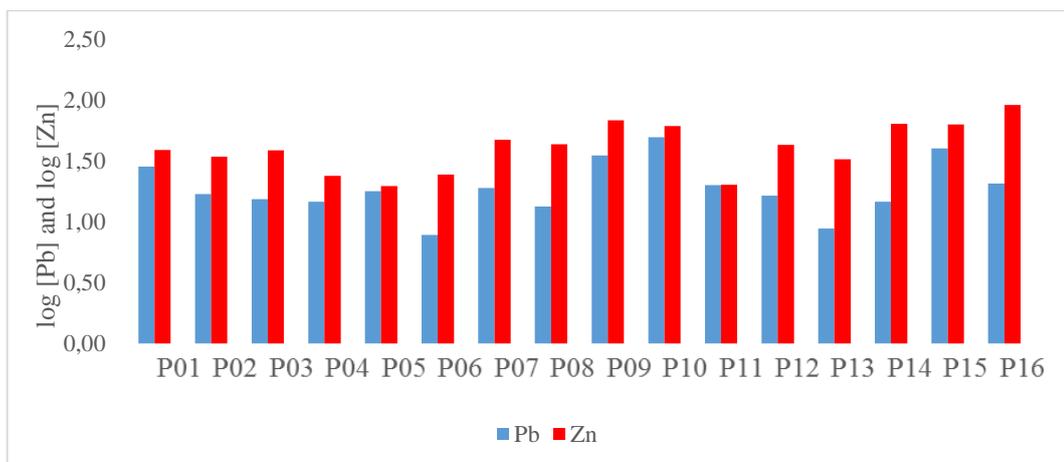


Figure 5: Correlation between Pb and Zn through log transformation of the primary element concentrations (Pb-Zn, $R = 0.51$).

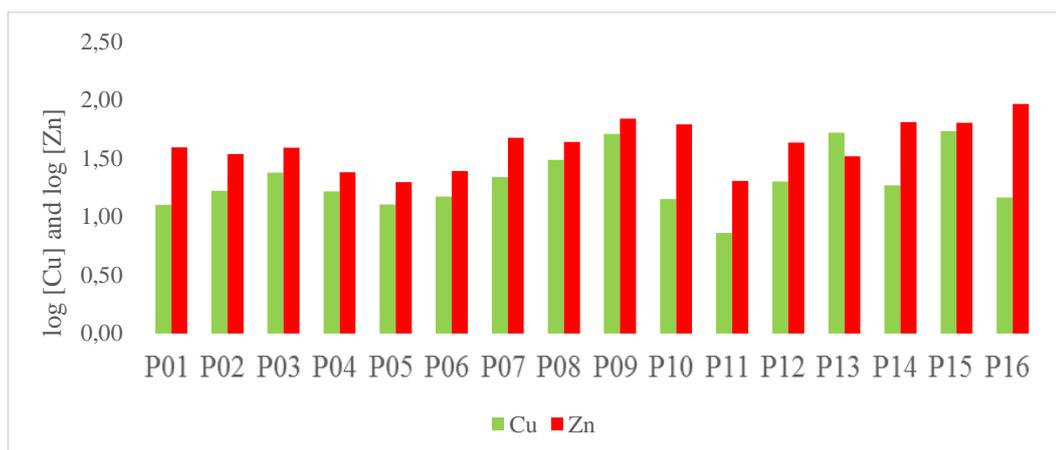


Figure 6: Correlation between Cu and Zn after the log transformation of the primary element concentrations (Cu-Zn, $R = 0.43$).

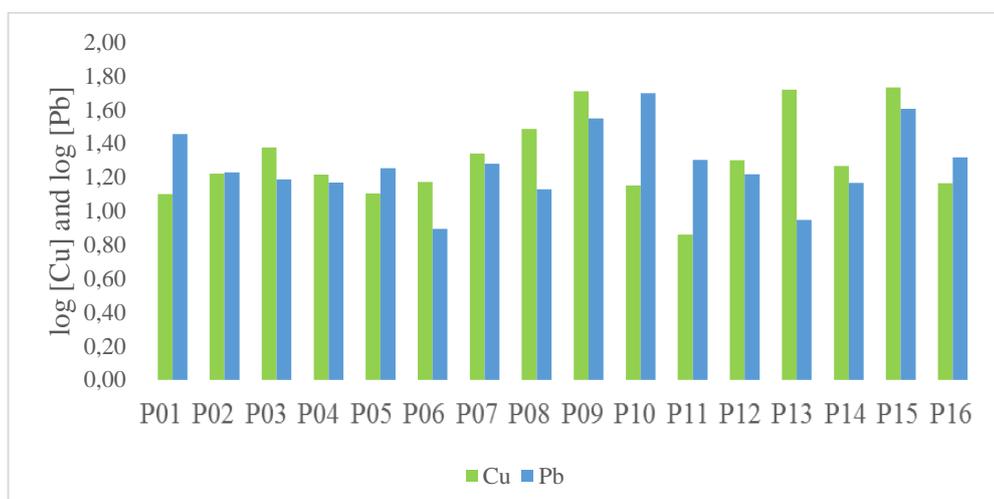


Figure 7: Correlation between Cu and Pb through log transformation of the primary element concentrations (Cu-Pb, $R = 0.04$).

Given the variations in the points mentioned for the behavior of the elements Cu, Pb and Zn, there is a Pearson correlation for them (Pb-Zn, $R = 0.51$); (Cu-Zn, $R = 0.43$); (Cu-Pb, $R=0.04$).

3.1.4 Chromium and nickel

Chromium and nickel are elements that have great affinity with iron, thus, they are grouped in the class of siderophiles elements, according to GOLDSCHMIDT (1937). The correlation between Cr and Ni in sediments is very strong throughout the basin, as evidenced by Pearson's non-parametric test ($R = 0.90$), and this correlation is visually corroborated by (Fig.8).

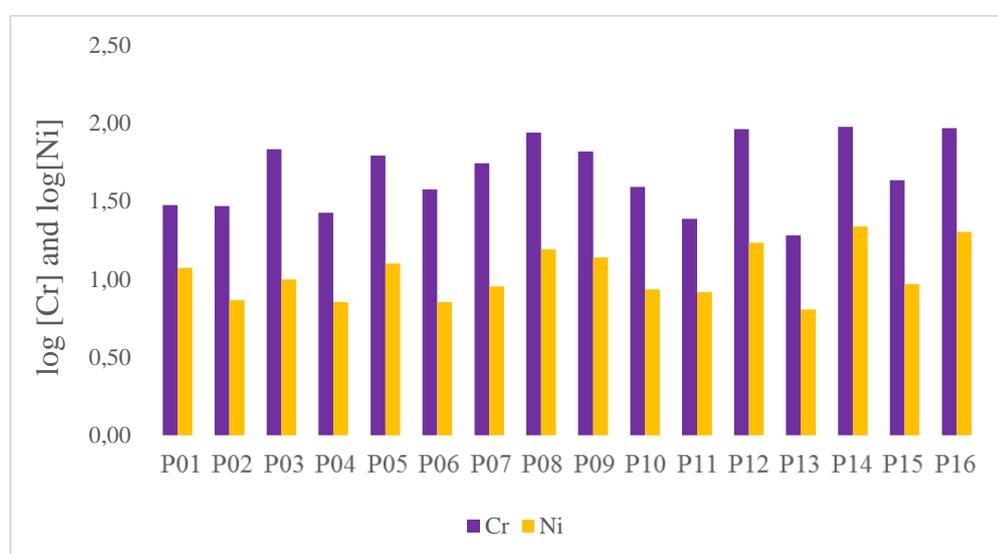


Figure 8: Correlation between Cr and Ni through log transformation of primary element concentrations ($R = 0,90$).

The correlation between Cr and Ni may be related to the influence of regional lithology. According to the data presented here, the main source of elements in the basin are the metabasites and metadiabases of the Pedro Lessa suite. However, other lithologies found in the basin are carriers of these elements, such as the phyllites of the Espinhaço Supergroup and the phyllites and itabirites of the Serra da Serpentina Group.

It was found that the average concentration of chromium in the basin is ($\bar{x} = 54.11 \text{ mg.kg}^{-1}$), higher than level 1 of CONAMA regulation 454/2012. We believe that this is a typical case of inadequacy of the standard reference values for Cr, as the high concentration of the element is related to the local geology.

However, at three sampling points the Cr concentrations were higher than the limits established for level 2 of the norm ($> 90 \text{ mg.kg}^{-1}$): in the Guanhães river, in Dores de Guanhães-

MG (P12), and at the confluence of the Santo Antônio river with the Doce river (P14 and P16). In this case, variations in element concentration are linked to anthropogenic interference, such as the entry of household waste and industrial activities into aquatic systems.

4. Conclusions

The association between the Goldschmidt classification, the Pearson's non-parametric test and the rock chemical data found in the literature allowed us to understand the probable origins of metals in the basin's sediments.

The positive correlations between copper, zinc and lead at various sampling points prove the influence of local lithology on the chemical composition of sediments in the basin. The concentration of chromium in most sampling points had concentrations higher than levels 1 and level 2 of the CONAMA 454/2012 legislation, with the largest oscillations being due to points sampled close to urban areas or at the mouth of the Santo Antônio river, which was affected by the collapse of the mining tailings dam, located in Mariana-MG.

The positive correlations between chromium and nickel throughout the basin prove the influence of local lithology on the chemical composition of sediments in the basin. Some points had chromium concentrations higher than levels 1 and 2 of the CONAMA 454/2012 legislation, and the average concentration of the element in the basin is 54.11 mg.kg^{-1} , already higher than the level of the legislation in force, which is of 37 mg.kg^{-1} , which allows us to question whether the reference values of the legislation are the most adequate for the Brazilian territory.

About As and Cd elements, the sampling campaign revealed points of concern in some parts of the basin.

Although As was found only at a specific point in the Santo Antônio river basin, at its mouth (P14), As is detected above the limit established by CONAMA regulation 454/2012 at the confluence of the Santo Antônio river with the Doce river. This concentration is of concern given that arsenic is a carcinogen, and the local population consumes fish locally.

The Cd was found above the limit established in the Jirau stream, in Santa Maria de Itabira downtown, in the Guanhões river, in Dores de Guanhões downtown, and in the Santo Antônio river, in Ferros downtown. This fact is worrying as Cd is harmful to human health and accumulates in the body causing a series of disorders such as increased blood pressure, growth retardation, anemia and death (REIMANN & CARITAT, 1998; SANTOS, 2008).

5. Acknowledgments

The authors thank the Postgraduate Program in Geology of the IGC-UFMG, the NGqA at CPMTC/IGC/UFMG, the Postgraduate Program in Environmental Engineering/UFOP and DEGEO/EM/UFOP for their support in carrying of this work. This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

6. References

AMARAL, F. C. S., SANTOS, H. G., ÁGLIO, M. L. D., PEREIRA, N., OLIVEIRA, R. P., CARVALHO JUNIOR, W. D., 2004. Mapeamento de Solos e Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais. v.1, Rio de Janeiro: Embrapa Solos - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 95p.

ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO), 2018. Água e Esgotos. <http://atlasestgotos.ana.gov.br/> (Accessed: 13 February 2021).

ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO), 2020. Hidroweb: Séries Históricas. <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas/> (Accessed: 13 August 2020).

CALIJURI, M. C., CUNHA, D. G. F. 2013. Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão. Edição Única. Rio de Janeiro: Elsevier, 789p.

CBH SANTO ANTÔNIO - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTO ANTÔNIO, 2019. A bacia. <http://www.cbhsantoantonio.org.br/a-bacia>. (Accessed: 21 April 2019).

CCME, Canadian Council of Ministers of the Environment, 1999. Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Winnipeg, Manitoba, 35p.

CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment), 2005. Guidelines for Compost Quality. Canadian Environmental Quality Guidelines, Winnipeg, Manitoba. 26p.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais, 2020. Usinas do Rio Doce. http://www.cemig.com.br/ptbr/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/nossos_programas/ambientais/peixe_vivo/Paginas/usinas_rio_doce.aspx/ (Accessed: 05 September 2020).

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2020. Cádmiio. <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2018/05/C%C3%A1dmio.pdf/> (Accessed: 28 November 2020).

CODEMIG - COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS, 2003. Portal da Geologia. <http://www.portalgeologia.com.br/> (Accessed: 20 August 2019).

CONAMA- CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE, 2012. Resolução nº 454 de 01 de novembro de 2012. Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. Brasília, 18p.

COSTA, A. T., 2007. Registro histórico de contaminação por metais pesados, associadas à exploração aurífera no alto e médio curso da bacia do Ribeirão do Carmo, QF: um estudo de sedimentos de planícies de inundação e terraços aluviais. (Ph.D. Thesis) Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 255p.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS, 2019. Definição de Sedimentos. <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/sedimento.htm/> (Accessed: 22 April 2019).

EL-KAMMAR, A.M., BATAA H. A., EL-BADRY, A. M., 2009. Environmental geochemistry of river Nile bottom sediments between Aswan and Isna, Upper Egypt. *Journal of Applied Sciences and Resources*, v.5, n.6, 585-594.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2020. Mapa de relevo. <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/download/mg/se-23-z-d.htm/> (Accessed: 25 March 2020).

FÖRSTNER, U., 2004. Traceability of sediments analysis. *Trends in Analytical Chemistry*, v.23, n.3, 217-236.

GOLDSCHMIDT, V. M., 1937. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. *Journal of the Chemical Society*, v.1, 655-673.

GROTZINGER, J., JORDAN T., 2013. *Understanding Earth*. 6th Edition. Freeman. New York, 654p.

HORN, A. H., BAGGIO, H., SCHIMITH, R., 2014. Selected element distribution in bottom sediment samples from Três Marias Lake and its significance, Minas Gerais, Brazil. *Romanian Journal of Mineral Deposits*, v. 87, n. 2, 39–42.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA 2020. Cidades. <https://cidades.ibge.gov.br/> (Accessed: 22 September 2020).

IDESISEMA - MG – INFRAESTRUTURA DE DADOS ESPACIAIS DO SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS, 2019. Shapefile de Vegetação. <https://idesisema.meioambiente.gov.br/> (Accessed: 16 October 2019).

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2019. Precipitação referente ao ano de 2018. <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=desvioChuvaAnual/> (Accessed: 27 March 2019).

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2019. Temperatura média do ano de 2018. <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=anomaliaTempMediaAnual>. (Accessed: 27 March 2019).

INSTITUTO PRÍSTINO - ATLAS DIGITAL GEOAMBIENTAL, 2019. Sistema WebGis de livre acesso ao banco de dados ambiental. <https://institutopristino.org.br/atlas/> (Accessed: 16 October 2019).

MOUTTE, J., 1990. Procedure for multi acid digestion of rocks and minerals. *Géochimie. École des Mines de Saint Etienne, France.*

OVIEDO-PASTRANA, M. E., MOURA, A. C. M., SOCARRAS, T. J. O, HADDAD, J. P. A., 2014. Mapa do desenvolvimento da pecuária leiteira no estado de Minas Gerais, Brasil: nova abordagem na pecuária para integração espacial de variáveis produtivas. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, vol.66, n.4, 1147-1154.

PIRH - PLANO INTEGRADO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE, 2010. 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. Governador Valadares, Consórcio Ecoplan-Lume. 96p.

REIMANN, C., CARITAT, P., 1998. *Chemical Elements in the Environment - Factsheets for the Geochemist and Environmental Scientist*. 1th edition. Berlin, Springer-Verlag.

REIS, D. A. D., SANTIAGO, A.F., NASCIMENTO, L.P.D., OILVEIRA, E.G.D., MARQUES, L. D.S., ROESER, H. M. P., 2017. Influência dos fatores ambientais e antrópicos nas águas superficiais no rio Matipó, afluente do rio Doce. *REGA*, Porto Alegre, v. 14, n.2, 14p.

REIS, D. A. D., 2019. Contaminação química e microbiológica em águas e sedimentos da bacia do rio Gualaxo do Norte, sub-bacia do rio Doce, submetida a fatores de pressão antrópicos e ao rompimento da barragem de Fundão. (Ph.D. Thesis) Programa de pós-graduação em engenharia ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 193p.

RODRIGUES, A. S. L., NALINI JR, H. A., 2009. Geochemical background values and its implications in environmental studies. *Revista Escola de Minas*, v.62, n.2, 155-165.

ROESER, H. M. P., ROESER, P. A., 2010. O Quadrilátero Ferrífero-MG, Brasil: aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados. *Geonomos*, v.18, n.1, 33-37.

SALOMONS, W., FÖRSTNER, U., 1984. *Metals in the Hydrocycle*. Springer Science & Business Media, 349p.

SALOMONS, W., FÖRSTNER, U., 2010. Sediments and the “System”: from site-specific to regional-scale research. *Journal of Soils and Sediments*, v.10, n.8, 1436-1439.

SANTOS, A.C., 2008. Noções de Hidroquímica. In: Feitosa F.A.C., Manoel Filho J., Feitosa, E.C., Demétrio, J.G.A. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Rio de Janeiro, CPRM: LABHID, .325-357.

VIEIRA, F. A., 2006. Ictiofauna do Rio Santo Antônio, bacia do Rio Doce, MG: proposta de conservação. (Ph.D. Thesis) Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 101p.

VIEIRA, F. Distribuição, impactos ambientais e conservação da fauna de peixes da bacia do rio Doce. *MG Biota*, Belo Horizonte, v.2, n.5, 2009.

VINK R.J., BEHRENDT H., SALOMONS W., 1999. Development of the heavy metal pollution trends in several European rivers: an analysis of point and diffuse sources. *Water Sciences and Technologies*, v.39, n.12, 215–223.

ZHENG, N., WANG, Q., LIANG, Z., ZHENG, D., 2008. Characterization of heavy metal concentrations in the sediments of three freshwater rivers in Huludao City, Northeast China. *Environmental Pollution*, v.154, n.1, 135-142.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

A influência geogênica é a principal responsável pela composição das águas da bacia do rio Santo Antônio. Tais evidências foram comprovadas por meio da mineralogia dos sedimentos de fundo das drenagens, correlação estatística associada à classificação de Goldschmidt e comparação entre as concentrações das amostras de água e sedimentos com os dados encontrados na literatura sobre a litologia da área de estudo.

Os sedimentos de fundo das drenagens forneceram informações que ajudaram a entender um pouco melhor a dinâmica e o contexto ambiental da bacia. Observou-se pelas análises granulométricas que há predominância de sedimentos mais grosseiros, indicando o uma energia mais alta aplicada no sistema. Esse fato implica em uma baixa adsorção de metais potencialmente perigosos; maior oxigenação e presença de organismos nos interstícios das partículas; e por fim, degradação mais rápida da matéria orgânica proveniente do esgoto lançado ao longo da bacia com tratamento ineficiente.

Ademais, foram observadas concentrações anômalas de As e Cd nos sedimentos em pontos específicos da bacia, sendo estes oriundos da ação antrópica. O rompimento da barragem de rejeitos de fundão, em Mariana, é o evento responsável pelo transporte do elemento carcinógeno As para a desembocadura da bacia do Santo Antônio, o que se torna preocupante, pois no local há recorrente atividade de pesca. Já o Cd, que causa uma série de distúrbios no organismo humano, foi encontrado nos centros urbanos das cidades de Santa Maria de Itabira, Dolores de Guanhanes e Ferros. As chuvas do mês de fevereiro de 2021 elevaram o nível do leito do córrego Jirau, inundando suas margens e atingindo a cidade de Santa Maria de Itabira-MG, exemplificando o risco de contaminação que a população local esteve exposta.

As condições físico-químicas atuais do sistema aquático da bacia (Eh oxidante e pH neutro), culminam em uma baixa mobilidade de elementos pouco solúveis na água como Al e Fe, que se encontram precipitados na forma de óxidos e hidróxidos ou são adsorvidos às frações finas (argilas e silte) e uma grande mobilidade de elementos solúveis, tais como o Ca e Mg.

Os dados obtidos por meio das análises físicas e químicas “*in loco*”, análises químicas laboratoriais e o índice de geoacumulação mostram que a água da bacia do rio Santo Antônio, de modo geral, apresenta qualidade satisfatória para utilização do recurso para as mais variadas atividades as quais a população necessita, desde que se tenha uma gestão dos recursos hídricos da bacia. A influência antropogênica na bacia representada pela indústria, incluindo a

mineração, e pelo esgoto doméstico das cidades, pode ser facilmente remediada, desde que sejam coletados/tratados os efluentes ou resíduos emitidos por estas atividades.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S.; PEDROSA-SOARES, A. C.; PERES, G. G.; CRUZ, S. C. P.; WHITTINGTON A. 2006. Kinematic evolution of the Araçuaí – West Congo orogeny in Brazil and Africa: nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. **Precambrian Research**. 149, p. 43-64.

ALLOWAY B. J. **Heavy Metals in Soils - Environmental Pollution**. v. 22. Springer, Dordrecht, 2013.

ALMEIDA-ABREU, P. A.; KNAUER, L. G.; HARTMANN, M. B.; VIEIRA DOS SANTOS; G. G.; GUIMARÃES, M. L. V.; ABREU, F. R.; SCHRANK, A.; PFLUG, R. Estratigrafia, Faciologia e Tectônica do Supergrupo Espinhaço na Região de Serro. Conceição do Mato Dentro, Minas Gerais, Brasil. **Zentralblatt Geologie und Paläontologie. Teil I**, Stuttgart, v. 516, p. 857-873, 1989.

AMARAL, F. C. S.; SANTOS, H. G.; ÁGLIO, M. L. D.; PEREIRA, N.; OLIVEIRA, R. P.; CARVALHO JUNIOR, W. D. **Mapeamento de Solos e Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais**. v. 1, Rio de Janeiro: Embrapa Solos - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 2004.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Água e Esgotos**. 2018. Disponível em: Android/IOS, Água e Esgotos. Acesso: 13/02/2021.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Hidroweb: Séries Históricas**. 2020. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso: 13/08/2020.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Interpretação de dados de prospecção geoquímica com auxílio de estatística**. Porto Alegre: CPRM, 2010.

BALTAR, C. A. M.; SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C. D. **Titânio: minerais de titânio - Rochas e Minerais Industriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005.

BARROTE, V. R.; ROSIERE, C. A.; ROLIM, V. K.; SANTOS, J. O. S.; MCNAUGHTON, N. J. The Proterozoic Guanhões banded iron formations, Southeastern border of the São Francisco Craton, Brazil: evidence of detrital contamination. **Geologia USP. Série Científica**, São Paulo, v. 17, n.2, p. 303-324, 2017.

BASÍLIO, M. S.; FRIESE, K.; LENA, J. C. D.; NALINI JÚNIOR, H. A.; ROESER, H. M. P. 2005. Adsorção de As, Cu, Pb e Cr na avaliação da capacidade de fixação de metais por resíduo de mineradoras de ferro. **Química Nova**, 28, 822-828.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; BARROS, M. T. L. D.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N; JULIANO, N; EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. v. 2. São Paulo; Prentice Hall, 2002.

BRANDALISE, L. A.; HEINECK, C. A. **Folha Belo Horizonte, SE.23-Z-C-VI**. Estado de Minas Gerais. Escala 1:100.000 – Brasília: CPRM, 1999. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil.

BRANDÃO, C. J.; BOTELHO, M. J. C.; SATO, M. I. Z.; LAMPARELLI, M. C. **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos**. São Paulo: CETESB. 2011.

CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. Edição Única. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

CALMANO, W.; FÖRSTNER, U. **Sediments and Toxic Substances: Environmental Effects and Ecotoxicity**. Berlin: Springer, 1996.

CBH DOCE - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE. **A bacia**. 2019. Disponível em: <http://www.cbhdoce.org.br/institucional/a-bacia>. Acesso: 11/03/2019

CBH SANTO ANTÔNIO - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTO ANTÔNIO. **A bacia**. 2019. Disponível em: <http://www.cbhsantoantonio.org.br/a-bacia>. Acesso: 21/04/2019.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. **Usinas do Rio Doce**. 2020. Disponível em: http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/nossos_programas/ambientais/peixe_vivo/Paginas/usinas_rio_doce.aspx. Acesso em: 05/09/2020.

CETEC – FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Inventário Hidrelétrico da bacia do rio Doce**. Belo Horizonte: CETEC, 1989.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Avaliação do grau de contaminação do sedimento ao longo do canal de navegação do porto de Santos**. Relatório Técnico. São Paulo: CETESB, 1998.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Cádmio**. 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2018/05/C%C3%A1dmio.pdf>. Acesso: 28/11/2020.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Divisão de Toxicologia Humana e Saúde ambiental**. São Paulo: CETESB, 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2013/11/Aluminio.pdf>. Acesso: 28/12/2020.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mortandade de Peixes**. São Paulo: CETESB, 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/mortandade-peixes/alteracoes-fisicas-e-quimicas/oxigenio-dissolvido/>. Acesso: 28/12/2020.

CHAPADEIRO, E.; SOARES, L. E.; MAGALHÃES, M. M. J.; PEREIRA, B. A. M.; ROQUE, C. N.; PEREIRA, M. L. S. Geologia da Região de Morro Pilar - MG. Belo Horizonte, **Simpósio de Geologia de Minas Gerais - Anais**, v. IV, p. 80-103, 1987.

CLIMATEMPO. **Clima de Conceição do Mato Dentro-MG**. 2020. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/climatologia/4153/conceicaodomatodentro-mg>. Acesso: 04/09/2020.

CODEMIG - COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Portal da Geologia**. 2019. Disponível em: <http://www.portalgeologia.com.br/>. Acesso em: 20/08/2019.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. 2005. **Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. Ministério do Meio Ambiente**. Estabelece a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Data da legislação: 17/03/2005 - Publicação DOU nº 053, de 18/03/2005, p. 58-63 Status: Alterada pelas Resoluções nº 370, de 2006, nº 397, de 2008, nº 410, de 2009, e nº 430, de 2011. Complementada pela Resolução nº 393, de 2009. Brasília, 2005.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 020 de 1986. Ministério do Meio Ambiente**. Estabelece a classificação das águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional. Publicado no D.O.U. de 30/7/1986. Brasília, 1986.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 344 de 25 de março de 2004. Ministério do Meio Ambiente**. “Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos mínimos para a avaliação do material a ser dragado em águas jurisdicionais brasileiras, e dá outras providências”. - Data da legislação: 25/03/2004 - Publicação DOU nº 087, de 07/05/2004, p. 56-57. Brasília, 2004.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 454 de 01 de novembro de 2012. Ministério do Meio Ambiente**. Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. Data da legislação: 01/11/2012 - Publicação DOU, de 08/11/2012, Seção 1, p. 66. Brasília, 2012.

COSTA, A. T. **Registro histórico de contaminação por metais pesados, associadas à exploração aurífera no alto e médio curso da bacia do Ribeirão do Carmo, QF: um estudo**

de sedimentos de planícies de inundação e terraços aluviais. 2007. Tese de Doutorado, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS –. **Definição de Sedimentos.** 2019. Disponível em: <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/sedimento.htm>. Acesso: 22/04/2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE – DNIT. **Mapas rodoviários.** 2019. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/mapas-multimodais/shapefiles>. Acesso: 16/10/2019.

DUSSIN, I. A.; DUSSIN, T. M.; CHARVET, J.; COCHERIE, A.; ROSSI, P. Single-Zircon Dating Step-wise Pb-Evaporation of Middle Proterozoic Magmatism in the Espinhaço Range, Southeastern São Francisco (Minas Gerais – Brazil). **2º Simpósio do Craton São Francisco - Anais**, v. 1, Salvador, p. 39-42. 1993b.

DUSSIN, T. M. **Geologia e Geoquímica das Formações Ferríferas da Serra da Serpentina, Conceição do Mato Dentro - MG.** 1985. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 1985.

ELETROBRÁS - CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. **Diagnóstico das Condições sedimentológicas dos principais rios brasileiros.** Rio de Janeiro: ELETROBRAS, 1991.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Mapa de relevo.** 2020. Disponível em: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/download/mg/se-23-z-d.htm>. Acesso: 25/03/2020.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Laws regulations.** 2020. <https://www.epa.gov/laws-regulations/history-clean-water-act>. Acesso em: 22/08/2020.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **United States Environmental Protection Agency SW 846 (method 3051): microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils.** 1998. Disponível em: <https://www.caslab.com/EPA-Method..> Acesso em: 22/08/2020.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Water quality standards handbook.** 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov/wqs-tech/water-quality-standards-handbook> Acesso em: 22/08/2020.

FERNANDES, K. N. **Qualidade das águas nos Rios Gualaxo do Norte, Gualaxo do Sul e do Carmo - Afluentes do Alto Rio Doce (Watu): metais, metaloides e Índice de**

Qualidade das Águas antes e após o rompimento da barragem de rejeitos Fundão da Samarco/VALE/BHP Billiton, em Mariana, MG. 2017. 223f. Dissertação de Mestrado, Engenharia Ambiental – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

FERNANDES, M. L. S.; MARCIANO, V. R. P. O.; DE OLIVEIRA, R. C.; NEVES, J. M. C.; DILÁSCIO, M. V. Granitos Borrachudos: um exemplo de granitogênese anorogênica na porção central do Estado de Minas Gerais. **Geonomos**, v. 2, n. 2, p. 23-29, 1994.

FILHO, D. B. F.; PARANHOS, R.; DA ROCHA, E. C.; DA SILVA JÚNIOR, J. A.; NEVES, J. A. B.; SANTOS, M. L. W. D. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson: o retorno. **Leviathan**; São Paulo, v. 8, p. 66-95. 2014.

FOGAÇA, A. C. C. **Geologia e mineralizações auríferas na região de Costa Sena, MG: Uma abordagem preliminar.** 1982. Departamento de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 1982.

FÖRSTNER, U. **Contaminated Sediments.** v. 21. Berlin: Springer-Verlag, 1989.

FÖRSTNER, U. Traceability of sediments analysis. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 23, n. 3, p. 217-236. 2004.

FROHLICH, M. F.; NASPOLINI, B. F.; JUNIOR, I. V. A. evolução do processo de avaliação e gerenciamento de material relacionado às atividades de dragagem no Brasil: Uma análise comparativa entre as Resoluções CONAMA n° 344/04 e n° 454/12. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 1, p. 131-140, 2015.

GASPAR, J. V. T. **Contribuição para a Caracterização Ambiental Da Bacia Hidrográfica Do Rio Santo Antônio – MG.** 2021. Dissertação de Mestrado, Programa de pós-graduação em engenharia ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

GILBERTI, L. H. **Potencial para o uso de Baccharis dracunculifolia DC (Asteraceae) na fitorremediação de áreas contaminadas por arsênio.** 2012. 68p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

GOLDSCHMIDT, V. M. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. **Journal of the Chemical Society**, v. 1, p. 655-673. 1937.

GONTIJO, E. S. J.; FERNANDES, M. L.; WATANABE, C. H.; ALMEIDA, M. A. D.; FRIESE, K.; SILVA, G. A.; ROESER, H. M. P.; ROSA, A. H. Geochemical Study of waters in the eastern of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. 23th edition. **LAK**, Heidelberg, Alemanha. Anais. CD-ROM. 2014

GROSSI SAD, J. H.; CHIODI FILHO, C.; SANTOS, J. F.; MAGALHÃES, J. M. M.; CARELOS, P. M. Duas “suítes” graníticas do bordo sudeste do Craton São Francisco, em

Minas Gerais: Petroquímica e Potencial Metalogenético. **36º Congresso Brasileiro de Geologia - Anais**, Natal, v. 4, p. 1836-1841, 1990.

GROSSI SAD, J. H.; MAGALHÃES, J. M. M.; CARELOS, P. M. **Geologia do Distrito de Guanhões, Minas Gerais**. Belo Horizonte, DOCEGEO-GEOSOL, 1989.

GROSSI-SAD, J. H.; LOBATO, L. M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; SOARES-FILHO, B. S. **Projeto Espinhaço em Cd-Rom, Companhia Mineradora de Minas Gerais**. Belo Horizonte, Codemig, 1997.

GROTZINGER, J.; JORDAN T. **Entendendo a Terra**. 6ª Edição. Freeman, 2013.

GUIMARÃES, M. L. V. **Petrogênese das rochas Pré-Cambrianas da região Itabira/Morro do Pilar, borda sudeste da Serra do Espinhaço Meridional - MG**. 1992. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

HANDZLIK, F.; FITZNER, K. Semiconducting Properties of anodic oxids films grown on titanium in ringer and PBS Solutions. **Archives of Metallurgy and Materials**. Krakov. v. 55. n. 2. p. 521-532. 2010. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/270881888>. Acesso: 21/01/2021.

HERGESELL, G. **Das Präkambrium am Ostrand der nördlichen Serra do Cipó - Serra do Espinhaço, Minas Gerais, Brasilien**. 1984. Dissertação de Mestrado, Universidade de Freiburg, Alemanha, 1984.

HOFFMANN, C. The Archean Peraluminous Gouveia Granite, its structure, geochemistry, and phase petrology (Serra do Espinhaço, Minas Gerais, Brazil). **Neues Jahrb Mineral**. Freiburg, n. 146, p.151-169, 1983.

HOROWITZ, A.; DANTAS, H. S. Geoquímica dos elementos menores nos solos de Pernambuco. II. Cobalto na zona Litoral-Mata. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 3, n. 1, p. 173-182, 1968.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades**. 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 22/09/2020.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Monitoramento da cobertura e uso da terra do brasil 2000 – 2010 – 2012 – 2014 em grade territorial estatística**. Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 2017. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101469.pdf>. Acesso em: 20/08/2019.

IDESISEMA - MG – INFRAESTRUTURA DE DADOS ESPACIAIS DO SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS.

Shapifile de Vegetação. 2019. Disponível em: idesisema.meioambiente.gov.br. Acesso: 16/10/2019.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Índice de qualidade das águas.** 2019. Disponível em: <http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/sem-categoria/319-indice-de-qualidade-das-aguas-iqa>. Acesso em: 05/04/2019.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Bacia do Rio Santo Antônio.** 2020. Disponível em: <http://comites.igam.mg.gov.br/conheca-a-bacia-do3>. Acesso em: 20/08/2020.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Precipitação referente ao ano de 2018.** 2019. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=desvioChuvaAnual>. Acesso 27/03/2019.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Temperatura média do ano de 2018.** 2019. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=anomaliaTempMediaAnual>. Acesso 27/03/2019.

INSTITUTO PRÍSTINO. ATLAS DIGITAL GEOAMBIENTAL. **Sistema WebGis de livre acesso ao banco de dados ambiental.** 2019. Disponível em: < <https://institutopristico.org.br/atlas/> >. Acesso: 16/10/2019.

LIMA, E. D. A. M. **Avaliação da qualidade dos sedimentos e prognóstico geoquímico ambiental da zona estuarina do rio Botafogo, Pernambuco.** 2008. Tese de Doutorado, Centro de Tecnologia e Geociências Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2008.

LIMA, G. F. C. **Análise geoquímica de metais pesados em sedimentos de corrente na represa da CEMIG-Três Marias/MG: distribuição e influência dos processos naturais e antropogênicos.** 2020. Dissertação de Mestrado, IGC-UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

LOSKA, K.; WIECHULA, D. Application of Principal Component Analysis for the Estimation of Source of Heavy Metal Contamination in Surface Sediments from the Rybnik Reservoir. **Chemosphere**, v. 51, n. 8, p. 723-733, 2003.

MALAVOLTA, E. **Nutrição mineral e adubação da laranjeira.** 2ª edição. São Paulo; Ultrafertil, 1979.

MILANEZ, B.; LOSEKANN, C. **Desastre no Vale do Rio Doce: antecedentes, impactos e ações sobre a destruição.** 1ª edição. Rio de Janeiro: Letra e Imagem Editora e Produções LTDA, 2016.

MISRA, K. C. **Introduction to geochemistry: principles and applications**. 1ª edição. Oxford: Wiley-Blackwell, 2012.

MÜLLER, G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. **Geojournal**. v. 2, p. 108-118, 1969.

MUNIZ, D. H. F.; OLIVEIRA-FILHO, E. C. Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde e o meio ambiente. **Universitas: Ciências da saúde**, v. 4, n. 1, p. 83-100, 2006

NASCIMENTO, L. P. **Análise ambiental da bacia hidrográfica do Rio do Peixe, Quadrilátero Ferrífero**. 2016. 171p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

NASCIMENTO, M.; LOUREIRO, F. E. L. **Fertilizantes e sustentabilidade: o potássio na agricultura brasileira, fontes e rotas alternativas**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.

NOCE, C. M.; MACHADO, N.; TEIXEIRA, W. Complexo Belo Horizonte e a evolução arqueana do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Sociedade Brasileira de Geologia - Anais da sbg**, Camboriú: p.68-69, 1994.

OLIVEIRA, A. A. K. **Estruturação e alteração metassomática do ortognaisse Açucena (Suíte Borrachudos) na região de Ipatinga, Minas Gerais**; 89p; Dissertação (Mestrado em Programa de Pós Graduação em Geologia) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

OLIVEIRA, A. A. K.; LEITE, A. D. S. **Projeto Leste: Folha Ipatinga–SE23-ZD-II**. Escala 1:2000. v. 100. Belo Horizonte, CEME/COMIG/CPRM, 2000.

OMEE – ONTÁRIO MINISTRY OF THE ENVIRONMENT AND ENERGY. **Guidelines and Criteria for Water Quality Management in Ontario**. Toronto: Ontário Ministry of the Environment and Energy, 1974.

OMEE – Ontário Ministry of the Environment and Energy. **Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontário**. Toronto: Ontário Ministry of the Environment and Energy, 1993.

OSTRENSKY, A.; BORGHETTI, J. R.; SOTO, D. **Estudo setorial para consolidação de uma aquicultura sustentável no Brasil**. Curitiba: Grupo Integrado de Aqüicultura e Estudos Ambientais (GIA), 2007.

OVIEDO-PASTRANA, M. E.; MOURA, A. C. M.; SOCARRAS, T. J. O; HADDAD, J. P. A. **Mapa do desenvolvimento da pecuária leiteira no estado de Minas Gerais, Brasil: nova abordagem na pecuária para integração espacial de variáveis produtivas**. Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia - online, vol.66, n.4, pp.1147-1154, 2014.

Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-09352014000401147&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 13/02/2021.

PAYE, H. S.; MELLO, J. W. V.; ABRAHÃO, W. A. P.; FILHO, E. I. F.; DIAS, L. C. P.; CASTRO, M. L. O.; MELO, S. B.; FRANÇA, M. M. Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 2041-2051, 2010.

PEDROSA-SOARES, A. C.; DARDENE, M. A.; HASUY, I. **Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais**. Escala 1:1.000.000. Belo Horizonte, COMIG, 1994.

PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; ALKMIM, F. F.; SILVA, L. C.; BABINSKI, M.; CORDANI, U.; CASTAÑEDA, C. Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977. **Geonomos**, v. 15, n. 1, p. 1-16, 2007.

PIRH - PLANO INTEGRADO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE. **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**. Governador Valadares, Consórcio Ecoplan-Lume, 2010.

POMBO, L.; SALGADO, V.; VOLKWEISS, S.; KLAMT, E. Adsorção de níquel por dois solos: terra bruna estruturada similar e podzólico vermelho-amarelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 24, n. 5, p. 593-598, 1989.

REIMANN, C.; CARITAT, P. **Chemical Elements in the Environment - Factsheets for the Geochemist and Environmental Scientist**. 1ª edição. Berlin, Springer-Verlag. 1998.

REIS, D. A. D. **Contaminação química e microbiológica em águas e sedimentos da bacia do rio Gualaxo do Norte, sub-bacia do rio Doce, submetida a fatores de pressão antrópicos e ao rompimento da barragem de Fundão**. 2019. Tese de doutorado. Programa de pós-graduação em engenharia ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2019.

REIS, G. B.; ABREU, V. O.; FRAGA, M. S.; TOZI, T.; SILVA, D. D. Proposta de enquadramento de corpos hídricos em classes de uso na bacia hidrográfica do Rio Santo Antônio (MG). **Nativa**, Sinop, v. 7, n. 2, p. 189-196, 2019.

ROESER, H. M. P.; NALINI JR. H. A.; LENA, J. C. de; FRIESE, K. **Influência da Geodiversidade da Composição das Águas e Sedimentos do Alto Rio Doce - Um Balanço de 15 anos de Pesquisas Hidrogeoquímicas**. 4º Encontro Técnico Científico em Suporte à Gestão das Águas da Bacia do Doce. 2009. Anais. Disponível em:

<http://reductidoce.hospedagemdesites.ws/sistema/arquivos/artigos/57/114204140409influencia_geodiversidade_doce.pdf>. Acesso em: 22/02/2021.

ROESER, H. M. P.; NALINI JR. H. A.; LENA, J. C. de; FRIESE, K. The influence of regional lithology on the composition of waters and sediments in the Upper Rio Doce Basin. 22th edition, **LAK**, Heidelberg, Alemanha. Anais. 2011.

ROESER, H. M. P.; ROESER, P. A. O Quadrilátero Ferrífero-MG, Brasil: aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados. **Geonomos**, v.18, n.1, p.33-37, 2010.

SALOMONS, W. Biogeochemistry of contaminated sediments and soils: perspectives for future research. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 62, n. 1-3, p. 37-40, 1998.

SALOMONS, W.; FÖRSTNER, U. Metals in the Hydrocycle. **Springer Science & Business Media**, 2012.

SALOMONS, W.; FÖRSTNER, U. Sediments and the —Systeml: From site-specific to regional-scale research: A story of joy in researching dirt. **Journal of Soils and Sediments**, v. 10, n. 8, p. 1436–1439, 2010.

SALOMONS, W.; STIGLIANI, W. **Biogeochemistry of pollutants in soils and sediments**. Springer: Berlin, 1995.

SANTOS, A. C. Noções de Hidroquímica. In: Feitosa F.A.C., Manoel Filho J., Feitosa, E.C., Demétrio, J.G.A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro, CPRM: LABHID, p.325-357, 2008.

SIEGEL, F. R. **Environmental geochemistry of potentially toxic metals**. v. 32. Berlin: Springer, 2002.

SILVA, L. C.; MCNAUGHTON, N. J.; ARMSTRONG, R.; HARTMANN, L. A.; FLETCHER, I. R. The Neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections: a zircon-based U–Pb geochronologic subdivision for the Brasiliano/Pan-African systems of orogens. **Precambrian Research**, v. 136, n. 3-4, p. 203-240, 2005.

SIQUEIRA, H. D. O. **Estudos na conservação de espécies de peixes do rio Santo Antônio, bacia do rio Doce**. 2019. Dissertação de Mestrado. Instituto de Biociências. Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2019.

SOUZA, V. L.; LIMA, V. L.; HAZIN, C. A.; FONSECA, C. K.; SANTOS, S. O. Biodisponibilidade de metais-traço em sedimentos: uma revisão. **Brazilian journal of radiation sciences**, v. 3, n. 1A, p. 01-13. 2015.

TAKENO, N. **Atlas of Eh-pH diagrams - Intercomparison of thermodynamic databases**. Geological survey of Japan open file report, n. 419, v.102. 2005.

TEIXEIRA, W.; CARNEIRO, M. A.; NOCE, C. A.; MACHADO, N.; SATO, K.; TAYLOR, P. N. Pb, Sr and Nd isotope constraints on the Archean evolution of gneissic granitoid complexes in the southern Sao Francisco craton, Brazil. **Precambrian Research**, v. 78, p. 151–164, 1996.

TESSIER, A.; RAPIN, F.; CARIGNAN, R. Trace metals in oxic lake sediments: possible adsorption onto iron oxyhydroxides. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 49, n. 1, p. 183-194, 1985.

THOMPSON, R.; WASSERMANN, H. **Sediment Quality Guidelines (SQGs): A Review and Their Use in Practice**. 2015. Disponível em: <https://www.geoengineer.org/education/web-class-projects/cee-549-geoenvironmental-engineering-fall-2015/assignments/sediment-quality-guidelines-sqgs-a-review-and-their-use-in-practice>. Acesso em: 17/09/2020.

VALE. **Nossa História**. 2014. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/72-anos-itabira-minas-gerais-nascia-vale.aspx>. Acesso em: 22/12/2020.

VASCONCELLOS, F. A. **Região metropolitana do Vale do Aço: evolução urbana, planejamento e desafios contemporâneos**. 2014. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica Ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto. 2014.

VIEIRA, F. A. **ictiofauna do Rio Santo Antônio, bacia do Rio Doce, MG: proposta de conservação**. 2006. Tese de Doutorado, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

VIEIRA, F. Distribuição, impactos ambientais e conservação da fauna de peixes da bacia do rio Doce. **MG Biota**, Belo Horizonte, v.2, n.5, 2009.

VIEIRA, V. S. 2007. **Significado do Grupo Rio Doce no Contexto do Orógeno Araçuaí**. 2007. Tese de Doutorado, IGC-UFMG, Belo Horizonte, 2007.

WENTWORTH, C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **The journal of geology**, v. 30, n. 5, p. 377-392, 1922.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for Drinking-water Quality**. 4^a edition. Geneva: WHO, 2011.

YSI. **Measuring ORP on YSI 6-Series Sondes: Tips, Cautions and Limitations**. Tech note, YSI Environmental, p. 5. 2001

APÊNDICES

Apêndice 1: Informações fisiográficas dos pontos de amostragem.

Nomenclatura dos pontos amostrados	Coordenadas geográficas dos pontos na bacia	Tipo de amostra coletada	Localização dos pontos
MG01	0697774E - 7848661S. Altitude: 506m	Água e sedimentos	Ribeirão Jirau (ponte - Santa Maria de Itabira)
MG02	0699446E - 7853311S. Altitude: 477m	Água e sedimentos	Rio do Tanque (ponte na estrada entre S. S. do Rio Preto para Santa Maria do Itambé)
MG03	0683478E - 7873386S. Altitude: 490m	Água e sedimentos	Rio Santo Antônio (ponte - Santo Antônio do Rio Abaixo)
MG04	0691438E - 7866346S. Altitude: 464m	Água e sedimentos	Rio Preto do Itambé (ponte – São Sebastião do Rio Preto)
MG05	0675291E - 7870954S. Altitude: 533m	Água e sedimentos	Rio Preto (ponte – próximo a Morro do Pilar)
MG06	0663555E - 7890326S. Altitude: 599m	Água e sedimentos	Rio Santo Antônio (ponte – estrada para Conceição do Mato Dentro)
MG07	0664073E - 7896937S. Altitude: 628m	Água e sedimentos	Rio Santo Antônio (ponte – Conceição do Mato Dentro)
MG08	0684854E - 7901853S. Altitude: 549m	Água e sedimentos	Rio do Peixe (ponte - Dom Joaquim)
MG09	0702070E - 7909270S. Altitude: 575m	Água e sedimentos	Rio Guanhães (ponte – Senhora do Porto)
MG10	0692389E - 7887416S. Altitude: 521m	Água e sedimentos	Rio do Peixe (ponte – próximo à Carmésia)
MG11	0708159E - 7872800S. Altitude: 411m	Água e sedimentos	Rio Santo Antônio (ponte - Ferros)
MG12	0717855E - 7891624S. Altitude: 491m.	Água e sedimentos	Rio Guanhães (ponte - Dolores de Guanhães)
MG13	0763007E - 7879943S. Altitude: 211m.	Água e sedimentos	Rio Santo Antônio (ponte entre Belo Oriente e Açucena)
MG14	0783027E - 7870883S. Altitude: 203m.	Água e sedimentos	Rio Santo Antônio (próximo à confluência entre o rio Santo Antônio e o Rio Doce)
MG15	0780971E - 7871399S. Altitude: 192m.	Água e sedimentos	Rio Santo Antônio (anterior à confluência entre o Rio Santo Antônio e o Rio Doce)
MG16	0781783E - 7869939S. Altitude: 204m.	Água e sedimentos	Rio Doce (posterior à confluência entre o Rio Santo Antônio)

Apêndice 2: Os parâmetros físicos coletados “*in loco*”.

Análises físicas “ <i>in situ</i> ”																	
Parâmetros	Unidades	Resultado por amostra															
		MG01	MG02	MG03	MG04	MG05	MG06	MG07	MG08	MG09	MG10	MG11	MG12	MG13	MG14	MG15	MG16
Oxigênio Dissolvido	mg L ⁻¹	6,38	8,35	8,17	8,14	7,92	7,35	1,88	7,98	8,03	8,23	8,4	7,54	8,27	7,81	7,71	7,86
% Saturação	%	81,5	106,2	106,5	103,4	98,9	92,6	23,4	99,3	104,3	108,2	109,7	88,1	100,2	99,9	101,6	100,8
Temperatura da água	°C	22,2	24,6	26	25	23,5	23,6	23	25,6	24,6	25,4	26	20,4	23,5	25,3	27,7	26,7
ORP	mV	-23,4	-40,9	-52,4	-27	-15,7	-20,95	-22	-39,9	-38,9	-38,4	-42,9	-21,6	-26,9	-38,1	-2,6	-42,6
Eh	mV	176,6	159,1	147,6	173	184,3	179,05	178	160,1	161,1	161,6	157,1	178,4	173,1	161,9	197,4	157,4
pH		7,73	8,07	8,29	7,79	7,57	7,85	7,7	8,04	8,03	8,02	8,1	7,7	7,8	8,01	7,31	8,09

Apêndice 3: Resultados da análise de água realizada por ICP-OES.

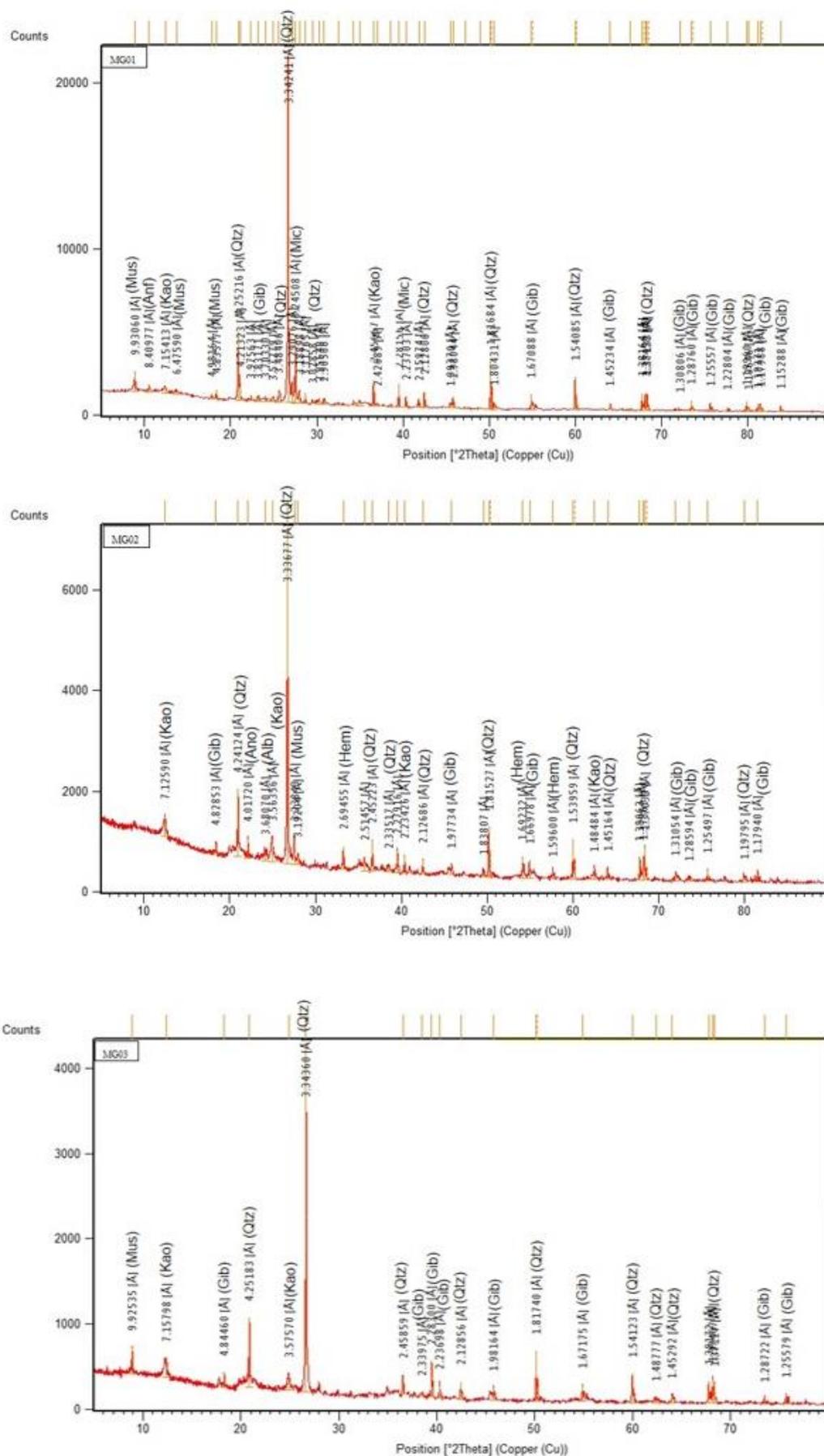
Elementos (ppm)		Mg	Al	Ca	Cr	Fe	Co	Cu	Cd	Ti	Mn	Ni	Zn	Ba	Pb
Limite de Detecção do ICP-OES		0,0004	0,0159	0,0103	0,0068	0,0037	0,0016	0,0064	0,002	0,0013	0,0003	0,0219	0,0027	0,0077	0,0272
Variáveis estatísticas	Amostras														
Média	MG01	1,323	0,0159	4,123	0,0068	0,4168	0,0016	0,0064	0,002	0,0013	0,0003	0,0219	0,0027	0,0077	0,0272
Desvio Padrão	MG01	0,0459	0,0157	0,107	0,0059	0,0128	0,001	0,0009	0,0015	0,0005	0,0029	0,0175	0,0016	0,0062	0,0023
Desvio Padrão Relativo	MG01	3,47	98,276	2,594	86,329	3,062	62,401	14,079	75,913	36,891	1014,7	79,568	60,673	79,762	8,467
Média	MG02	0,911	0,0159	1,987	0,0068	0,4565	0,0016	0,0064	0,002	0,0013	0,0003	0,0219	0,0027	0,0077	0,0272
Desvio Padrão	MG02	0,0006	0,0051	0,0115	0,0024	0,003	0,0034	0,0012	0,0014	0,0007	0,0004	0,0124	0,0026	0,0047	0,0011
Desvio Padrão Relativo	MG02	0,064	31,763	0,58	35,076	0,664	214,179	19,303	70,922	53,898	154,868	56,587	96,669	60,911	4,149
Média	MG03	2,018	0,0503	5,78	0,0068	1,025	0,0016	0,0064	0,002	0,0013	0,0262	0,0219	0,0027	0,0077	0,0272
Desvio Padrão	MG03	0,0552	0,0021	0,2232	0,0045	0,0356	0,0013	0,0021	0,0002	0,001	0,003	0,0089	0,0006	0,0004	0,0149
Desvio Padrão Relativo	MG03	2,733	4,232	3,86	66,283	3,475	80,004	33,121	11,717	78,635	11,543	40,399	22,25	5,369	54,952
Média	MG04	1,092	0,0159	2,182	0,0068	0,582	0,0016	0,0064	0,002	0,0013	0,0003	0,0219	0,0027	0,0077	0,0272
Desvio Padrão	MG04	0,0025	0,0047	0,0194	0,0043	0,0011	0,0011	0,0022	0,0015	0,0008	0,003	0,0018	0,0009	0,0059	0,0026
Desvio Padrão Relativo	MG04	0,226	29,422	0,89	62,862	0,196	69,9	35,117	73,5	64,034	1040,72	8,22	34,278	76,959	9,656
Média	MG05	0,907	0,0159	1,723	0,0068	0,1344	0,0016	0,0064	0,002	0,0013	0,0003	0,0219	0,0027	0,0077	0,0272
Desvio Padrão	MG05	0,0022	0,0151	0,0156	0,0012	0,0016	0,0003	0,0009	0,0007	0,0011	0,0004	0,0133	0,0015	0,0066	0,0187
Desvio Padrão Relativo	MG05	0,242	94,845	0,905	17,392	1,174	21,638	14,941	36,577	83,145	140,001	60,501	56,958	85,609	68,732
Média	MG06	0,82	0,0159	2,083	0,0068	0,502	0,0016	0,0064	0,002	0,0013	0,0003	0,0219	0,0027	0,0077	0,0272
Desvio Padrão	MG06	0,044	0,008	0,0612	0,0044	0,0127	0,0004	0	0,0002	0,0019	0,003	0,0159	0,0018	0,0091	0,0062
Desvio Padrão Relativo	MG06	5,368	50,006	2,939	64,775	2,525	22,4	0,622	11,808	152,633	1048,15	72,467	66,73	118,122	22,709
Média	MG07	1,381	0,0159	7,23	0,0068	1,863	0,0016	0,0064	0,002	0,0013	0,042	0,0219	0,0027	0,0077	0,0272
Desvio Padrão	MG07	0,1444	0,0013	0,0238	0,0023	0,0083	0,0127	0,0024	0,0012	0,0084	0,0001	0,0024	0,0046	0,0436	0,0039
Desvio Padrão Relativo	MG07	10,46	8,072	0,329	33,254	0,448	810,043	37,112	60,942	660,522	0,264	11,071	171,904	564,005	14,508
Média	MG08	0,909	0,0159	2,702	0,0068	0,2766	0,0016	0,0064	0,002	0,0013	0,0003	0,0219	0,0027	0,0077	0,0272
Desvio Padrão	MG08	0,0235	0,0011	0,0035	0	0,0008	0,0002	0,0009	0,0018	0,001	0,0055	0,0173	0,0014	0,0063	0,0007
Desvio Padrão Relativo	MG08	2,584	7,144	0,13	0,675	0,284	15,727	14,199	92,419	75,071	1903,65	78,729	51,545	82,149	2,45

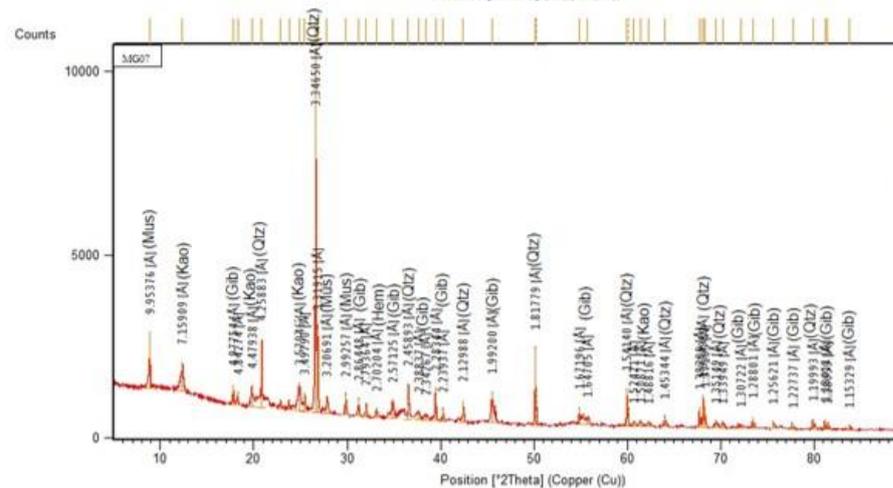
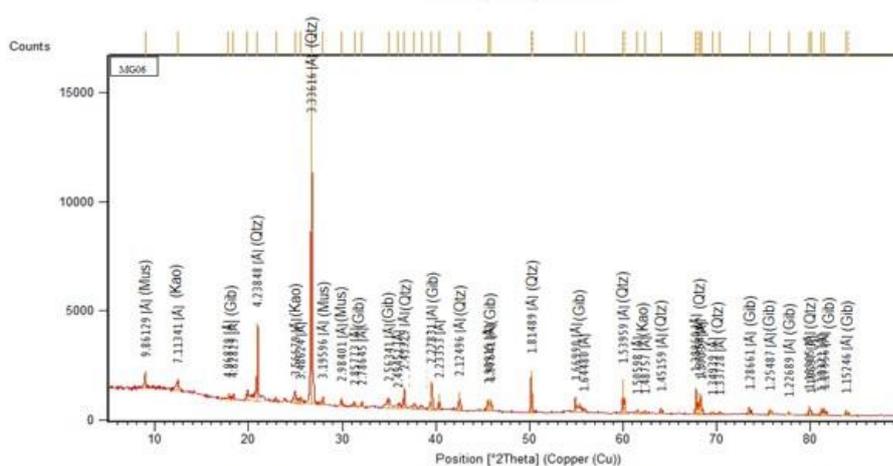
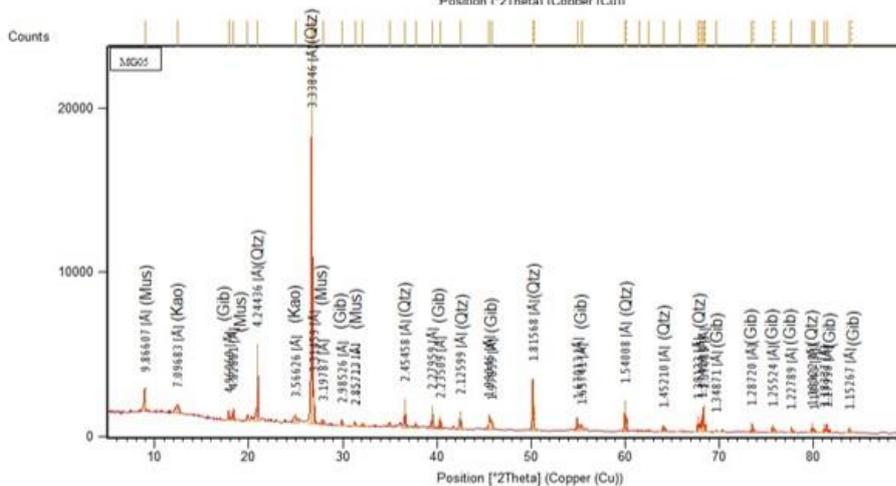
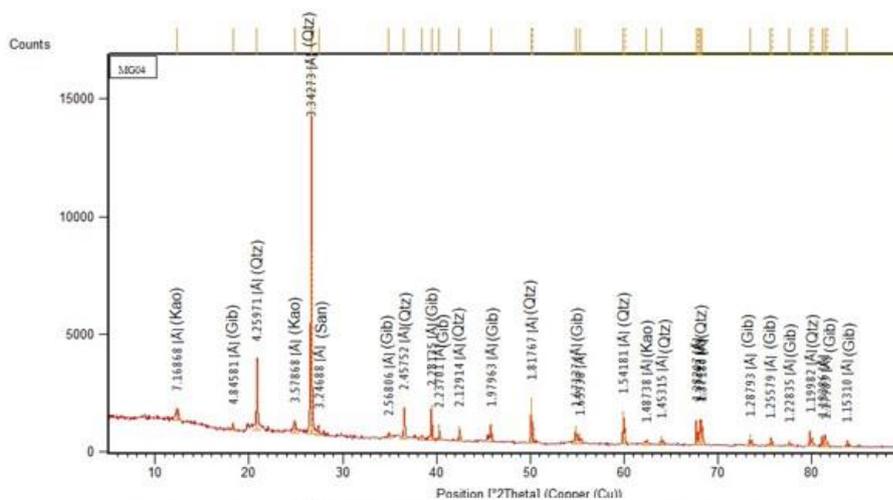
Média	MG09	1,191	0,0159	2,828	0,0068	0,87	0,0016	0,0064	0,002	0,0013	0,016	0,0219	0,0027	0,0077	0,0272
Desvio Padrão	MG09	0,0279	0,0083	0,336	0,0114	0,018	0,0006	0	0,0003	0,0024	0,0002	0,0144	0,0044	0,0078	0,028
Desvio Padrão Relativo	MG09	2,342	51,822	11,881	167,956	2,067	37,746	0,251	12,96	191,93	1,53	65,617	162,819	101,239	103,183
Média	MG10	0,786	0,0159	2,189	0,0068	0,2274	0,0016	0,0064	0,002	0,0013	0,0003	0,0219	0,0027	0,0077	0,0272
Desvio Padrão	MG10	0,0632	0,0362	0,2754	0,0322	0,0297	0,0011	0,0006	0,0131	0,0045	0,0056	0,1183	0,0008	0,0053	0,0162
Desvio Padrão Relativo	MG10	8,038	227,104	12,581	475,137	13,076	73,077	9,867	665,338	351,133	1922,85	539,224	30,519	68,248	59,61
Média	MG11	0,836	0,0159	1,877	0,0068	0,1519	0,0016	0,0064	0,002	0,0013	0,0003	0,0219	0,0027	0,0077	0,0272
Desvio Padrão	MG11	0,021	0,0012	0,0432	0,0068	0,0034	0,0007	0,0025	0,0021	0,0003	0,0008	0,0018	0,002	0,0007	0,0035
Desvio Padrão Relativo	MG11	2,513	7,668	2,302	99,806	2,235	44,926	39,82	108,797	26,928	266,374	8,08	73,323	8,65	12,956
Média	MG12	0,981	0,0159	2,71	0,0068	0,3565	0,0016	0,0064	0,002	0,0013	0,0189	0,0219	0,0027	0,0077	0,0272
Desvio Padrão	MG12	0,021	0,0027	0,0346	0,0012	0,0034	0,0011	0,0022	0,001	0,0017	0,0012	0,0019	0,0062	0,0047	0,0072
Desvio Padrão Relativo	MG12	2,145	17,112	1,277	17,099	0,963	72,95	34,194	50,834	131,804	6,282	8,667	230,193	61,209	26,615
Média	MG13	0,966	0,0159	2,563	0,0068	0,0672	0,0016	0,0064	0,002	0,0013	0,0003	0,0219	0,0027	0,0077	0,0272
StdDev	MG13	0,0887	0,0503	0,3567	0,043	0,0212	0,0013	0,0032	0,0022	0,0097	0,0081	0,0177	0,0042	0,0079	0,0357
Desvio Padrão Relativo	MG13	9,18	315,532	13,918	634,341	31,529	82,705	50,268	112,269	760,932	2802,51	80,659	156,547	101,657	131,521
Média	MG14	1,392	0,0159	3,293	0,0068	0,1935	0,0016	0,0064	0,002	0,0013	0,0003	0,0219	0,0027	0,0077	0,0272
Desvio Padrão	MG14	0,0077	0,0149	0,0383	0,0047	0,0005	0,0012	0,0008	0,0004	0,0002	0,0009	0,0044	0,0001	0,0028	0,024
Desvio Padrão Relativo	MG14	0,556	93,432	1,164	69,792	0,265	75,27	11,863	19,779	16,663	312,216	20,214	2,663	36,511	88,263
Média	MG15	1,033	0,0159	2,336	0,0068	1,115	0,0016	0,0064	0,002	0,0013	0,1985	0,0219	0,0027	0,0077	0,0272
Desvio Padrão	MG15	0,0181	0,0007	0,0586	0,0034	0,0093	0,0003	0,0009	0,0003	0,0011	0,0002	0,0075	0,0009	0,003	0,0047
Desvio Padrão Relativo	MG15	1,755	4,601	2,51	49,453	0,838	17,03	14,319	15,701	82,759	0,1	33,969	32,946	38,658	17,395
Média	MG16	1,989	0,0159	6,05	0,0068	0,232	0,0016	0,0064	0,002	0,0013	0,0003	0,0219	0,0027	0,0077	0,0272
Desvio Padrão	MG16	0,0304	0,0022	0,0605	0,0037	0,003	0,0021	0,0005	0,0008	0,002	0,0027	0,0053	0,0006	0,0095	0,0084
Desvio Padrão Relativo	MG16	1,527	13,722	1,001	53,93	1,297	131,379	7,892	41,293	159,333	936,026	24,1	23,754	122,835	30,788

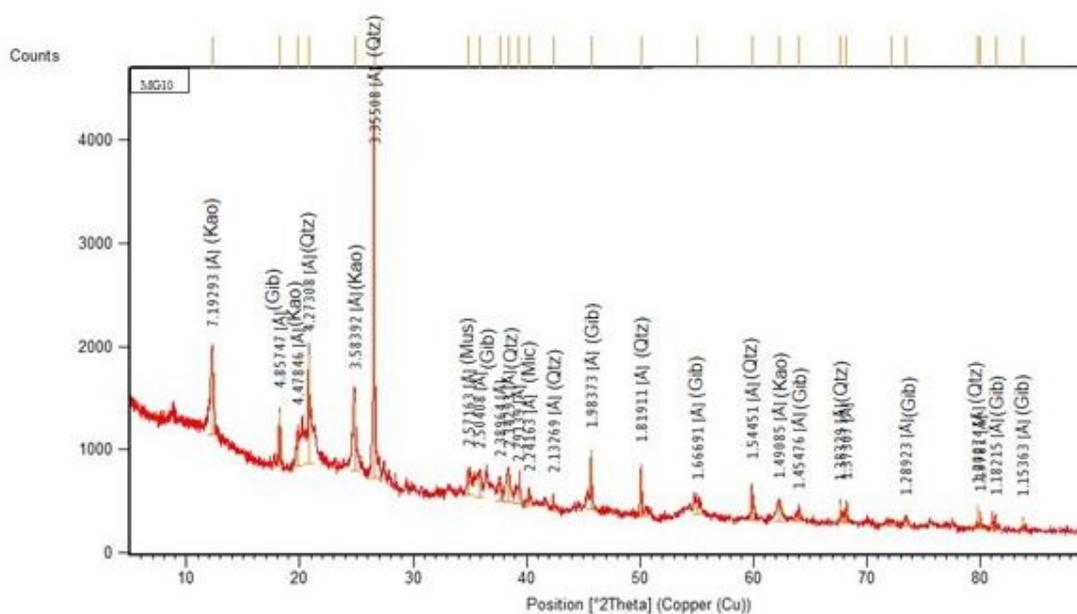
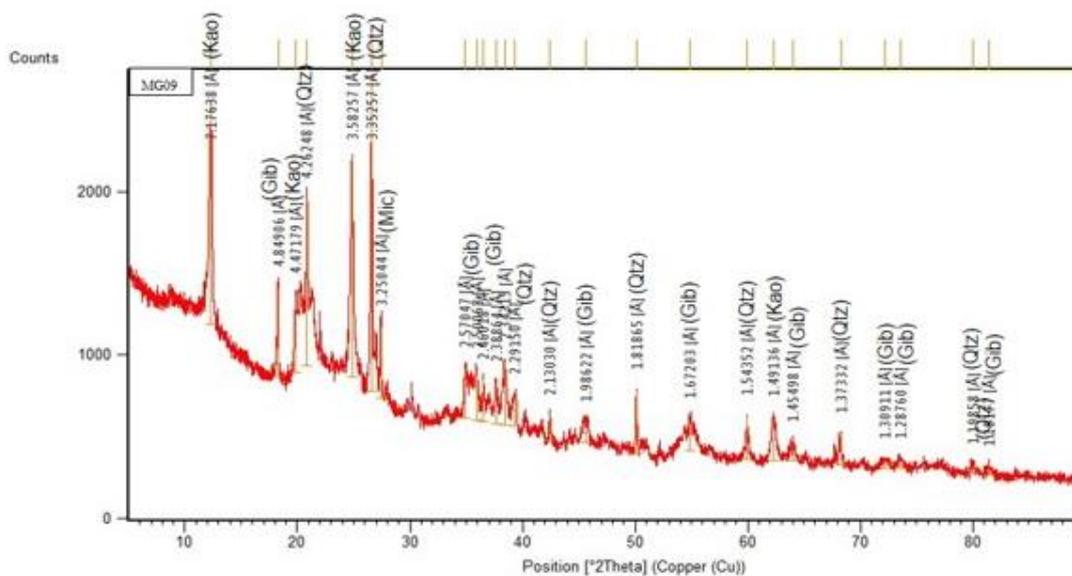
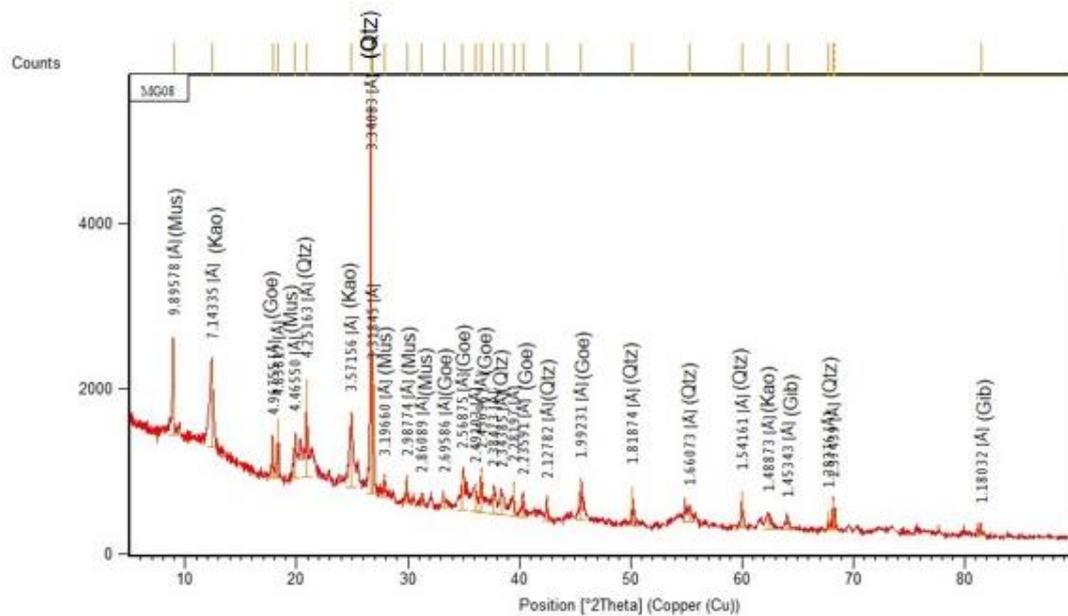
Apêndice 4: Resultados da análise de granulométrica dos sedimentos da bacia do rio Santo Antônio.

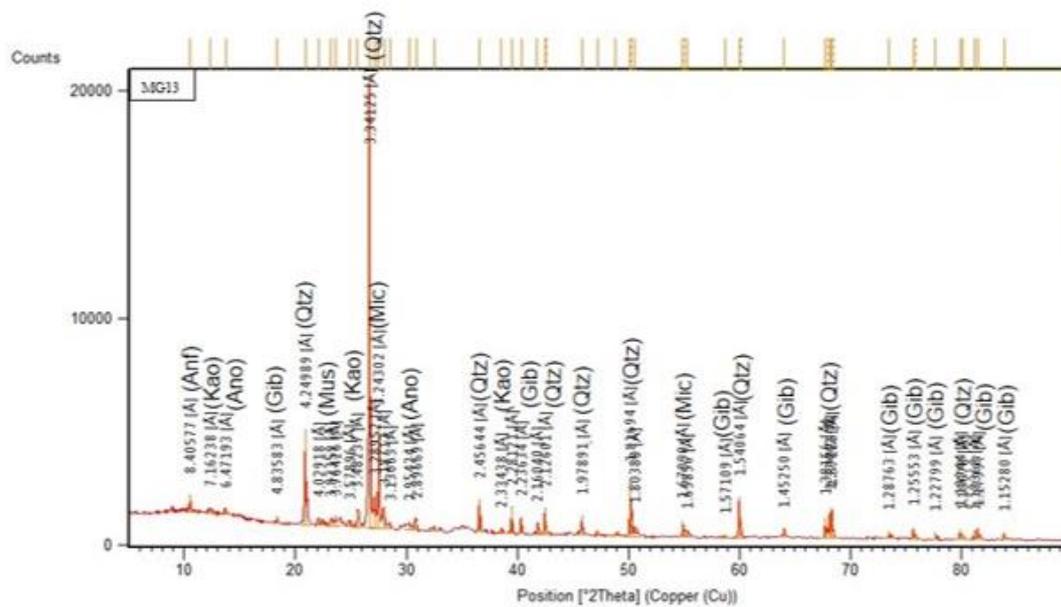
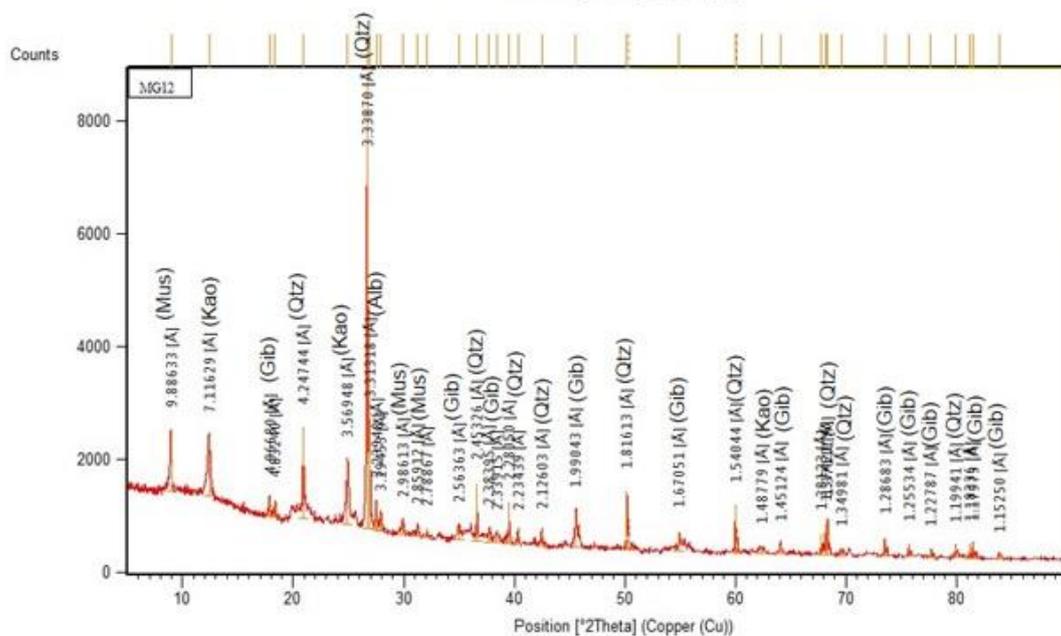
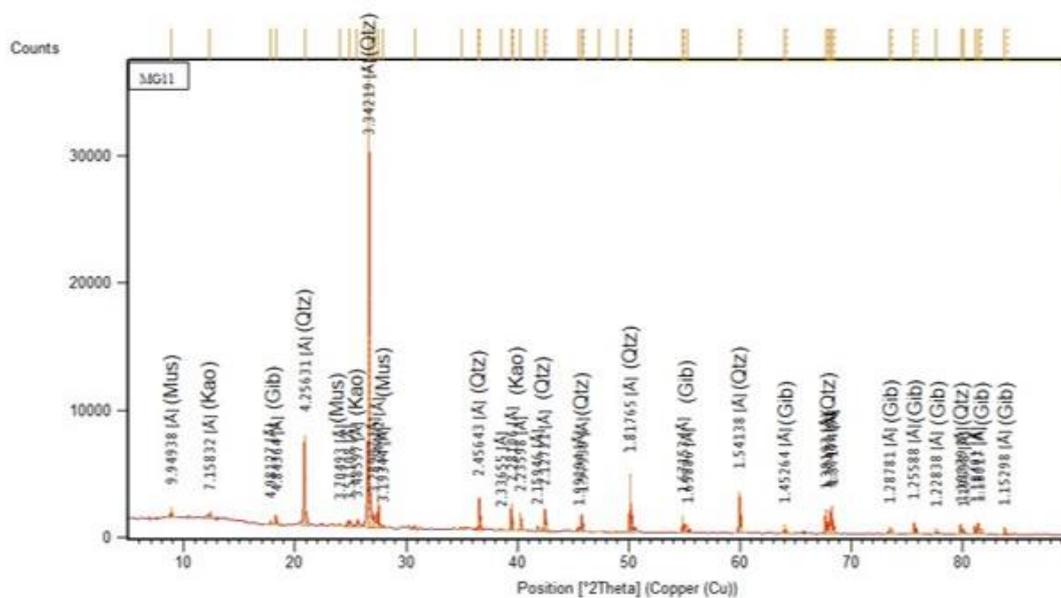
Ponto Amostrado	Areia muito grossa	Areia grossa	Areia média	Areia Fina	Areia muito fina	Silte/Argila
MG01	5,32	15,63	67,78	9,79	0,32	0,05
MG02	56,71	7,3	22,87	11,46	1,36	0,2
MG03	20,99	29,75	37,03	9,56	2,04	0,28
MG04	49,74	30,1	15,08	3,16	0,74	0,58
MG05	62,54	24,85	10,29	1,45	0,53	0,2
MG06	17,43	9,47	18,92	33,08	14,69	6,12
MG07	1,7	3,75	8,02	64,83	19,77	1,29
MG08	8,69	14,89	34,6	23,73	15,73	2,07
MG09	1,2	46,58	42,17	5,39	2,75	1,1
MG10	10,68	14,2	64,2	8,29	0,62	0,11
MG11	11,86	66,06	18,88	2,66	0,29	0,04
MG12	73,6	14,6	9,01	1,87	0,58	0,23
MG13	4,74	73,54	21,15	0,42	0,14	0,01
MG14	2,18	3,2	5,88	60,7	24,92	2,51
MG15	19,02	21,16	24,95	17,85	14,51	1,81
MG16	4,66	10,42	49,4	15,08	15,7	4,39

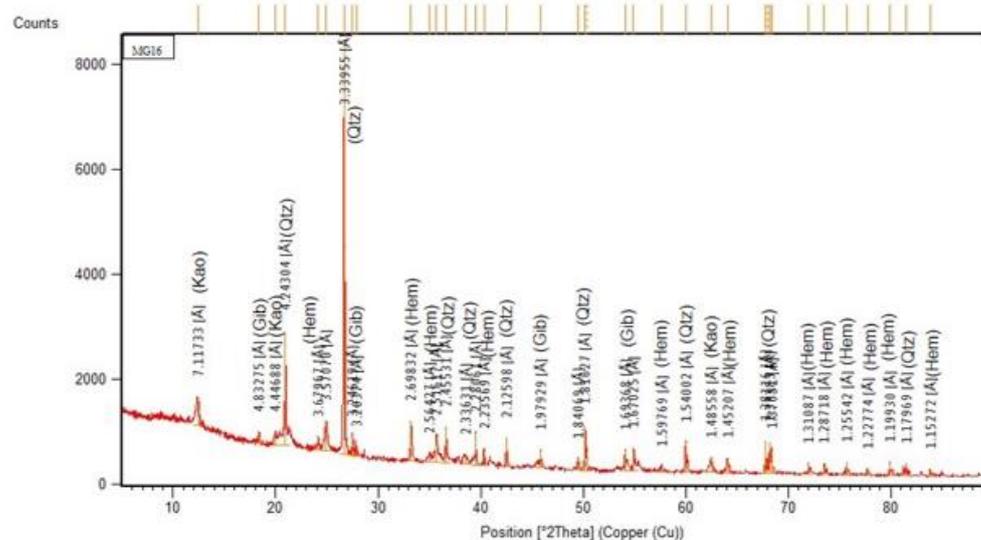
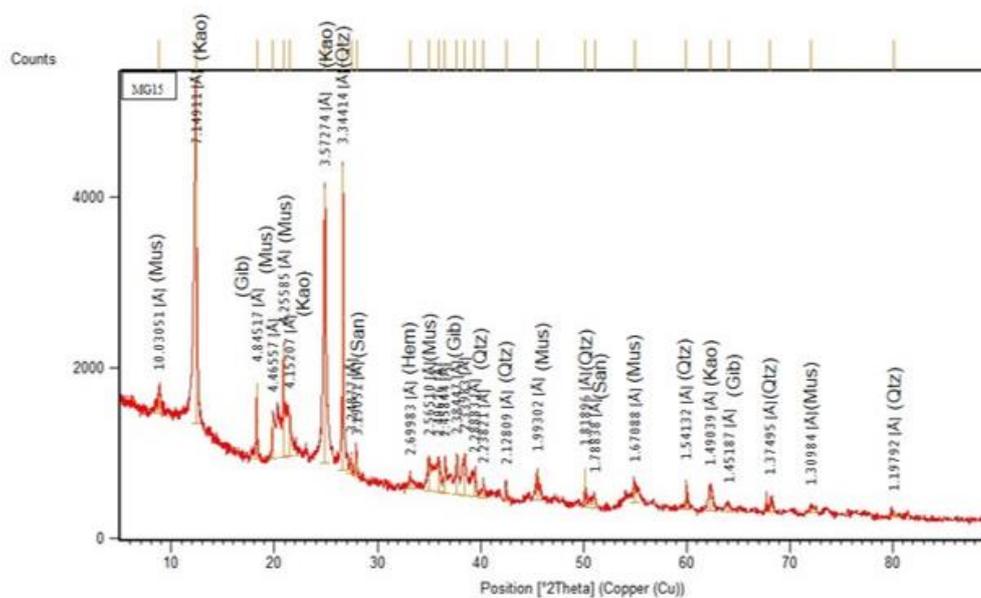
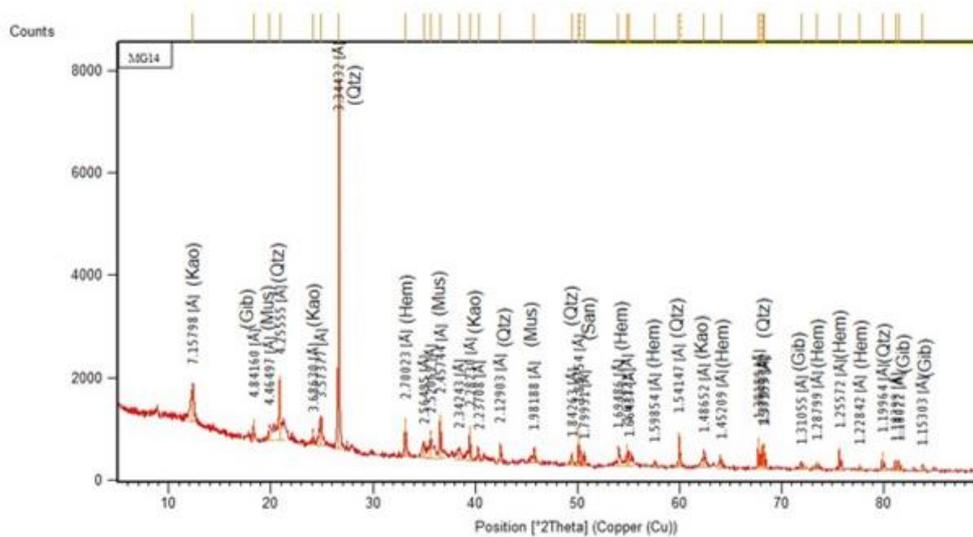
Apêndice 5: Difratogramas das amostras de sedimentos de fundo coletadas na bacia do rio Santo Antônio.











Apêndice 6: Resultados da análise de sedimentos referentes a análise química realizada por ICP-OES.

Amostra	As	Ba	Bi	Cd	Co	Cr	Cu	Li	Mo	Ni	Sc	Sr	Th	V	Y
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
MG01	<LQ	66,28	<LQ	11,05	13,97	29,85	12,57	3,98	<LQ	11,78	3,45	3,30	10,30	38,26	9,35
MG02	<LQ	74,71	<LQ	<LQ	7,91	29,45	16,63	2,25	<LQ	7,31	3,87	6,03	12,48	55,75	8,82
MG03	<LQ	59,86	<LQ	<LQ	7,71	67,88	23,72	2,38	<LQ	9,97	9,90	8,46	10,85	130,22	6,92
MG04	<LQ	80,35	<LQ	0,72	11,11	26,64	16,40	2,58	1,63	7,13	4,96	9,82	13,53	61,64	7,73
MG05	<LQ	101,60	<LQ	<LQ	9,31	61,94	12,70	2,42	<LQ	12,60	3,88	6,39	10,78	51,26	3,21
MG06	<LQ	52,57	<LQ	<LQ	5,81	37,49	14,87	2,21	<LQ	7,13	4,43	10,23	9,06	70,61	4,78
MG07	<LQ	73,67	<LQ	<LQ	4,14	55,29	21,84	<LQ	1,26	8,99	2,89	5,69	10,71	43,55	6,64
MG08	<LQ	117,75	<LQ	<LQ	12,24	86,95	30,51	3,52	1,67	15,49	7,43	5,31	16,38	84,06	13,71
MG09	<LQ	130,08	<LQ	<LQ	14,35	65,85	51,03	4,12	4,68	13,77	9,73	9,78	29,25	84,35	46,37
MG10	<LQ	159,23	<LQ	<LQ	20,90	39,05	14,15	4,20	3,34	8,58	7,31	5,72	35,70	61,74	32,92
MG11	<LQ	52,80	<LQ	11,42	9,29	24,30	7,24	<LQ	<LQ	8,23	2,46	3,21	11,21	27,04	12,52
MG12	<LQ	121,84	<LQ	11,29	13,09	91,54	19,95	3,96	<LQ	17,06	7,83	5,76	17,33	86,39	13,93
MG13	<LQ	58,09	<LQ	<LQ	7,50	19,09	52,31	<LQ	5,43	6,39	2,30	2,09	11,48	20,57	8,98
MG14	34,69	89,75	<LQ	<LQ	12,29	94,53	18,46	2,30	1,30	21,77	7,11	3,50	15,23	69,94	14,17
MG15	<LQ	111,09	<LQ	<LQ	12,58	43,04	53,93	3,91	6,27	9,28	9,82	4,86	28,72	77,74	38,00
MG16	12,86	90,63	<LQ	<LQ	9,69	92,82	14,56	2,26	1,58	20,10	5,32	4,78	14,43	53,16	17,53
LQ	7,58	0,545	4,9	0,49	1,56	1,08	1,23	2,09	1,22	3,02	0,25	0,305	4,44	0,63	0,19

LQ = Limite de Quantificação

Amostra	Zn	Mn	Sb	Al	Fe	Ca	K	Mg	Na	Zr	Pb	P	S	Si	Ti
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
MG01	39,00	267,09	<LQ	11789,45	21848,35	1220,69	2620,41	2082,61	175,25	1,97	28,50	319,24	114,88	413,31	759,55
MG02	34,36	834,80	<LQ	8923,36	42797,23	1883,48	930,56	991,00	130,69	0,96	16,93	467,93	223,73	421,62	600,94
MG03	38,75	396,48	<LQ	16274,23	40552,02	1573,96	997,81	921,31	65,11	1,53	15,39	418,07	208,35	639,33	636,15
MG04	23,88	855,96	<LQ	15085,51	22687,26	1895,32	949,63	1111,78	53,53	1,71	14,68	347,47	229,28	364,25	485,38
MG05	19,76	1546,18	<LQ	14411,55	28268,30	1108,04	713,69	961,30	64,00	1,20	17,87	371,54	350,99	329,48	294,38
MG06	24,53	232,68	<LQ	15302,35	26015,42	2105,32	589,89	552,26	58,12	1,55	7,83	397,54	275,11	340,37	225,20
MG07	47,31	240,60	<LQ	13984,41	34744,87	834,38	598,54	529,04	112,40	0,95	19,01	2639,86	898,85	427,45	197,85
MG08	43,56	472,63	<LQ	21654,93	44928,67	881,11	1344,70	1296,76	94,82	1,90	13,42	620,02	408,77	420,72	422,89
MG09	68,77	912,94	<LQ	20566,11	43681,02	1646,53	1243,83	963,88	105,00	3,52	35,26	550,46	417,08	740,63	1269,66
MG10	61,45	1162,67	<LQ	22168,38	78603,83	1079,04	1424,54	951,92	103,27	2,64	49,87	681,91	394,01	951,63	950,17
MG11	20,22	480,26	<LQ	12071,10	14291,86	945,46	1051,24	562,19	103,75	2,39	20,08	174,08	109,90	396,88	364,11
MG12	43,01	481,22	<LQ	23962,42	46442,38	873,38	1395,48	1345,34	82,25	1,94	16,47	637,09	388,36	439,03	411,92
MG13	32,79	388,11	<LQ	6669,25	12887,73	1143,18	1193,77	763,65	285,75	3,83	8,84	111,28	163,02	392,46	772,63
MG14	64,16	1048,66	<LQ	12030,17	105063,07	768,31	652,90	736,51	102,38	0,69	14,63	497,92	227,48	540,75	660,06
MG15	63,52	742,37	<LQ	23319,83	47502,52	948,44	1381,25	1064,46	73,40	3,35	40,30	519,51	330,57	525,91	1192,39
MG16	91,82	1193,67	<LQ	11135,80	103327,38	1017,90	662,11	733,87	92,19	<LQ	20,73	525,64	389,74	555,55	609,04
LQ	0,31	5,55	7,5	24,5	7,24	4,28	12,24	3,04	3,49	0,405	7,08	6,93	8,21	8,37	10,75

LQ = Limite de Quantificação