



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CONTRIBUIÇÃO PARA A CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO SANTO ANTÔNIO - MG**

Ana Paula Gouveia Jácome

MONOGRAFIA n° 472

Ouro Preto, março de 2023

**CONTRIBUIÇÃO PARA A CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL
DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTO ANTÔNIO -
MG**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. José Alberto Naves Cocota Junior

Vice-Diretor

Prof. Cláudio Eduardo Lana

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Dr. Geraldo Magela Santos Sampaio

MONOGRAFIA

Nº 472

CONTRIBUIÇÃO PARA A CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTO ANTÔNIO - MG

Ana Paula Gouveia Jácome

Orientador

Prof. Dr. Hubert Mathias Peter Roeser

Co-Orientadora

Júlia de Vasconcellos Teixeira Gaspar

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2022/2.

OURO PRETO

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

J179c Jácome, Ana Paula Gouveia.
Contribuição para a caracterização ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Santo Antônio - MG. [manuscrito] / Ana Paula Gouveia Jácome. - 2023. 100 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Hubert Mathias Peter Roeser.
Coorientadora: Ma. Júlia de Vasconcellos Teixeira Gaspar.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Geoquímica ambiental. 2. Bacias hidrográficas. 3. Sedimentos (Geologia) - Sedimentos de fundo. I. Roeser, Hubert Mathias Peter. II. Gaspar, Júlia de Vasconcellos Teixeira. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 550.4:502.51

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

A. P.G. Jacome

Contribuição para a caracterização ambiental da bacia hidrográfica do Rio Santo Antonio - MG

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

Aprovada em 03 de março de 2023

Membros da banca

Prof. Dr. H. M. P. Roeser - Orientador Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. A. F. Santiago Universidade Federal de Ouro Preto
MS. M. G. B. Pimenta - Gerdau S. A.

Prof. Dr. H. M. P. Roeser , orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Hubert Mathias Peter Roeser, CHEFE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL/EM**, em 04/04/2023, às 16:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador **0504247** e o código CRC **BF7DC6FF**.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por cuidar de mim e guiar o meu caminho.

Aos meus pais pelo amor e apoio incondicional. Mãe, meu anjo na terra e agora no céu. Meu maior exemplo de persistência. Pai pelo carinho e simplicidade. Cassinha por estar comigo nos bons e maus dias. Sem vocês eu não teria conseguido!

Ao meu orientador, Hubert pela colaboração, atenção e generosidade.

A minha co-orientadora Júlia por toda contribuição prestada. Ao Marcos pela colaboração e sempre estar à disposição.

Aos amigos que fiz em Ouro Preto, em especial a Geo 12.2. Aos amigos de BH pela amizade duradoura. E aos amigos do Ciências sem Fronteiras por terem feito meus dias em Plattsburgh e NYC inesquecíveis!

Agradeço à Escola de Minas, DEGEO e Fundação Gorceix pelo ensino gratuito e de qualidade. Meu muito obrigada ao CEFET, à UFOP e ao CSF por me despertarem consciência crítica e me mostrarem o poder da educação de transformar realidades.

Minha gratidão eterna a todos vocês que acreditaram, torceram e sonharam junto comigo!

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ix
SUMÁRIO	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xvii
RESUMO	xix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS.....	5
1.2.1 Objetivos específicos	5
1.3 JUSTIFICATIVA	5
1.4 METODOLOGIA	6
1.4.1 Revisão bibliográfica e levantamento de dados	6
1.4.2 Trabalho de campo e amostragem	6
1.4.3 Preparação e análise granulométrica dos sedimentos	8
1.4.4 Caracterização geoquímica e mineralógica.....	8
1.4.5 Tratamento dos dados	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1 AMBIENTES FLUVIAIS	11
2.1.1 Erosão e intemperismo.....	11
2.1.2 Transporte Sedimentar	13
2.2 GEOQUÍMICA DOS SEDIMENTOS FLUVIAIS.....	14
2.2.1 Sedimentos Fluviais e sua Importância para os Ecossistemas Aquáticos.....	15
2.2.2 Contaminação dos Sedimentos	16
2.2.3 Fator de enriquecimento.....	17
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	19
3.1 LOCALIZAÇÃO.....	19
3.2 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	20
3.2.1 Hidrografia	20
3.2.2 Vegetação.....	21
3.2.3 Solos.....	22
3.2.4 Geologia	25
3.2.5 Uso e ocupação do solo.....	27
3.3 CARACTERIZAÇÃO SÓCIO ECONÔMICA	28

4	RESULTADOS.....	33
4.1	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	33
4.2	ANÁLISE MINERALÓGICA.....	34
4.3	CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA	36
4.3.1	Avaliação de possíveis anomalias	36
4.3.2	Fator de Enriquecimento (FE)	36
4.3.3	Avaliação dos elementos nos sedimentos.....	39
5	CONCLUSÕES.....	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - As doze bacias hidrográficas brasileiras. Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do IBGE (2021).	2
Figura 1.2 - Primeiro mapa que mostra a "Serra das Esmeraldas", 1627, elaborado por João Teixeira de Albernaz. Fonte: Bibliothèque Nationale de France (1627).	3
Figura 1.3 - As sub-bacias componentes da Bacia do Rio Doce no estado de Minas Gerais. Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do IBGE (2021).	4
Figura 1.4 - Pontos de amostragem na Bacia do Rio Santo Antônio. Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do IBGE (2021) e IDE-SISEMA/MG (2022).	7
Figura 3.1 - Mapa de localização da bacia do Rio Santo Antônio. Fonte: Elaborado pela autora com base em dados do IBGE (2021) e CPRM / Codemig (2014).	19
Figura 3.2 - Hidrografia da Bacia do Rio Santo Antônio. Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do IDE-SISEMA/MG (2022).	20
Figura 3.3 - Mapa de biomas do estado de Minas Gerais com a bacia do Rio Santo Antônio demarcada. Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do IBGE (2019).	21
Figura 3.4 - Mapa de vegetação na área da bacia do Rio Santo Antônio. Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do IDE-SISEMA/MG (2009).	22
Figura 3.5 - Mapa de solos na área da bacia do Rio Santo Antônio. Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados da FEAM/UFV (2010).	23
Figura 3.6 - Mapa de litologias na área da bacia do Rio Santo Antônio. Fonte: Elaborado pela autora com base em dados da CPRM / Codemig (2014).	25
Figura 3.7 - Uso e Cobertura do solo na Bacia do Rio Santo Antônio. Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do IBGE (2019) e IBGE (2020).	27
Figura 3.8 - Municípios que compõe a bacia do Rio Santo Antônio. Fonte: Elaborado pela autora com base em dados do IBGE (2021).	29
Figura 3.9 - Barragens de rejeitos de mineração nas proximidades da Bacia do Rio Santo Antônio. Fonte: Elaborado pela autora com base em dados da FEAM (2021) e disponibilizado pelo IDE-SISEMA (2021).	31
Figura 4.1 - Distribuição granulométrica dos sedimentos da Bacia do Rio Santo Antônio.	34

Figura 4.2 - Diagramas referente as análises químicas dos elementos metálicos maiores Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P e Ti presentes nos sedimentos da bacia do rio Santo Antônio.	37
Figura 4.3 - Diagramas referente as análises químicas dos elementos metálicos traços Ba, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V e Zn presentes nos sedimentos da bacia do rio Santo Antônio.	38
Figura 4.4 - Diagrama da variação de concentração de Al ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.	39
Figura 4.5 - Diagrama da variação de concentração de Ca ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.	40
Figura 4.6 - Diagrama da variação de concentração de K ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.	41
Figura 4.7 - Diagrama da variação de concentração de Mg ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.	42
Figura 4.8 - Diagrama de correlação das concentrações de K e Mg nos sedimentos ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.	42
Figura 4.9 - Diagrama da variação de concentração de Na ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.	43
Figura 4.10 - Diagrama da variação de concentração de Fe ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.	44
Figura 4.11 - Diagrama da variação de concentração de P ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.	45
Figura 4.12 - Diagrama da variação de concentração de Ti ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.	46
Figura 4.13 - Diagrama da variação de concentração de As ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.	47
Figura 4.14 - Diagrama da variação de concentração de Ba ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.	48
Figura 4.15 - Diagrama da variação de concentração de Cd ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.	49
Figura 4.16 - Diagrama da variação de concentração de Co ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.	50
Figura 4.17 - Diagrama da variação de concentração de Cu ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.	51
Figura 4.18 - Diagrama da variação de concentração de Cr ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.	52

Figura 4.19 - Diagrama da variação de concentração de Pb ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.	53
Figura 4.20 - Diagrama de correlação das concentrações de Ti e Pb nos sedimentos ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.....	53
Figura 4.21 - Diagrama da variação de concentração de Mn ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.	54
Figura 4.22 - Diagrama de correlação das concentrações de Fe e Mn nos sedimentos ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.....	54
Figura 4.23 - Diagrama da variação de concentração de Ni ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.	55
Figura 4.24 - Diagrama de correlação das concentrações de Cr e Ni nos sedimentos ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.....	56
Figura 4.25 - Diagrama da variação de concentração de Zn ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 - Diâmetro de peneiras utilizadas na análise granulométrica. Fonte: Elaborado pela autora com base na classificação de Wentworth (1922).	8
Tabela 2.1 - Valores de referência estabelecidos pela Resolução CONAMA no 454/2012 em mg/kg. Fonte: CONAMA (2012).	17
Tabela 2.2 - Classificação do fator de enriquecimento	18
Tabela 3.1 - Classes e porcentagem ocupada pelos solos na bacia do Rio Santo Antônio.	24
Tabela 3.2 - Composição litológica da área da Bacia Hidrográfica do Rio Santo Antônio. Fonte: adaptado com base nos dados da CPRM/COMIG (2014).....	26
Tabela 3.3 - Tabela dos municípios que integram a Bacia do Rio Santo Antônio com dados da população, IDHM e PIB per capita. Fonte: Elaborado pela autora com base em dados do IBGE.....	30
Tabela 4.1 - Composição mineralógica dos sedimentos da Bacia do Rio Santo Antônio.....	35
Tabela 4.2 - Resultado do fator de enriquecimento para os metais nos sedimentos de fundo da Bacia do Rio Santo Antônio.....	36

Resumo

A Bacia Hidrográfica do Rio Santo Antônio está totalmente inserida no território de Minas Gerais envolvendo total ou parcialmente 29 municípios, os quais reúnem cerca de 182 mil pessoas e cerca de 6% da população residente na porção mineira da bacia do rio Doce. Embora seja a bacia mais preservada da Bacia Hidrográfica do Rio Doce tem sofrido grandes impactos devido ao aumento populacional e às crescentes atividades de mineração. O presente estudo teve como principal objetivo fazer um diagnóstico ambiental através de análise granulométrica, mineralógica e geoquímica dos sedimentos de fundo, podendo então verificar a influência das atividades antrópicas e formações geológicas nos resultados dos parâmetros ambientais. Sendo assim, em uma campanha de campo, foram coletadas 16 amostras de sedimentos ao longo da bacia que posteriormente foram submetidas a análises de Difração de Raios X e ICP-OES. Os resultados obtidos foram comparados com a resolução CONAMA nº 454/2012 e foram usados para calcular o Fator de Enriquecimento. Paralelamente, a fim de se caracterizar a bacia foi feito o estudo da litologia, dos tipos de solo, da vegetação e do uso e ocupação do solo, assim como levantamento de dados socioeconômicos da região. Em posse dos resultados obtidos pelas análises e comparando com os estudos descritivos da área estudada concluiu-se que os elementos químicos presentes nos sedimentos da bacia do rio Santo Antônio são principalmente de fonte geogênica. Porém foi encontrado contaminação por As, Cd, Cr e P em alguns pontos da bacia, com destaque para os pontos onde ocorre confluência com o Rio Doce (P01 e P03) e em alguns pontos de amostragem localizados em zonas urbanas (P07, P13, P14 e P16). Tais contaminações indicam a fundamental importância dos órgãos públicos ambientais melhorarem o monitoramento nesses locais.

Palavras chave: Bacia do Rio Santo Antônio, Sedimentos de Fundo, Geoquímica Ambiental.

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

A água é um recurso de extrema importância para manutenção da vida e do meio ambiente tendo se consolidado como um dos assuntos prioritários na agenda mundial do século XXI. Quanto a esse recurso, o Brasil certamente pode ser considerado um país muito privilegiado. Aproximadamente 12% da disponibilidade de água doce do planeta está em território brasileiro e a Bacia Amazônica é considerada a maior bacia hidrográfica do planeta.

No entanto, a distribuição desse recurso é bastante desigual devido à grande variabilidade climática que caracteriza o país (ANA 2013). A região norte concentra 80% da água disponível no território nacional, porém sua população representa apenas 5% da população brasileira. Enquanto que, as regiões costeiras próximas ao Atlântico têm 45% da população brasileira e apenas 3% da disponibilidade hídrica do país (ANA 2007). As águas no território brasileiro encontram-se divididas em doze bacias hidrográficas (Figura 1.1).

Dentre essas, destaca-se a Bacia Hidrográfica Atlântico Sudeste. Ela ocupa aproximadamente 2,5% do território nacional e abrange cinco estados: Espírito Santo Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro e São Paulo. É a área mais povoada e onde concentra-se grande diversidade de atividade econômica, tornando-a uma das regiões economicamente mais desenvolvidas do país (ANA 2021).

O objeto de estudo desse trabalho é a sub-bacia do Rio Santo Antônio a qual faz parte da Bacia do Rio Doce, localizada dentro da região hidrográfica do Atlântico Sudeste. A bacia do Rio Doce ocupa uma área de drenagem de 86.715 km² sendo que, aproximadamente 86% da sua área está no estado de Minas Gerais e o restante no Espírito Santo.

As nascentes do rio Doce situam-se no Estado de Minas Gerais, nas serras da Mantiqueira e do Espinhaço e suas águas percorrem cerca de 850 km, até atingir o oceano Atlântico no mar de Regência, município do Espírito Santo (PIRH Doce 2010). Seus principais afluentes são o Rio do Carmo, Piracicaba, Santo Antônio, Corrente Grande, Suaçuí Pequeno, Suaçuí Grande, São José e Pancas, Casca, Matipó, Caratinga, Manhuaçu, Guandu e Santa Joana.

O início da ocupação regional se deve principalmente à busca por ouro e outros materiais preciosos no XVII. Assim, já existiu um mapa de 1627 (Figura 1.2), do cartógrafo português João Teixeira de Albernaz, que menciona ocorrência de esmeraldas nas proximidades do Rio Doce. Tais pedras preciosas foram realmente encontradas na região cerca de 350 anos depois. Os rios Doce, Piracicaba, Santo Antônio, Caratinga, e Suaçuí eram pontos de referência para os bandeirantes que

circulavam pela região. Nas margens destes rios se formaram as primeiras vilas onde, mais tarde, vieram a se desenvolver cidades. Atualmente, a região tem uma população da ordem de 3,6 milhões de habitantes, distribuídos em 225 municípios, sendo 200 mineiros e 25 capixabas (ANA 2016). Cerca de 70% da população mora em área urbana, com destaque para as cidades de Governador Valadares e Ipatinga (PIRH Doce 2010).

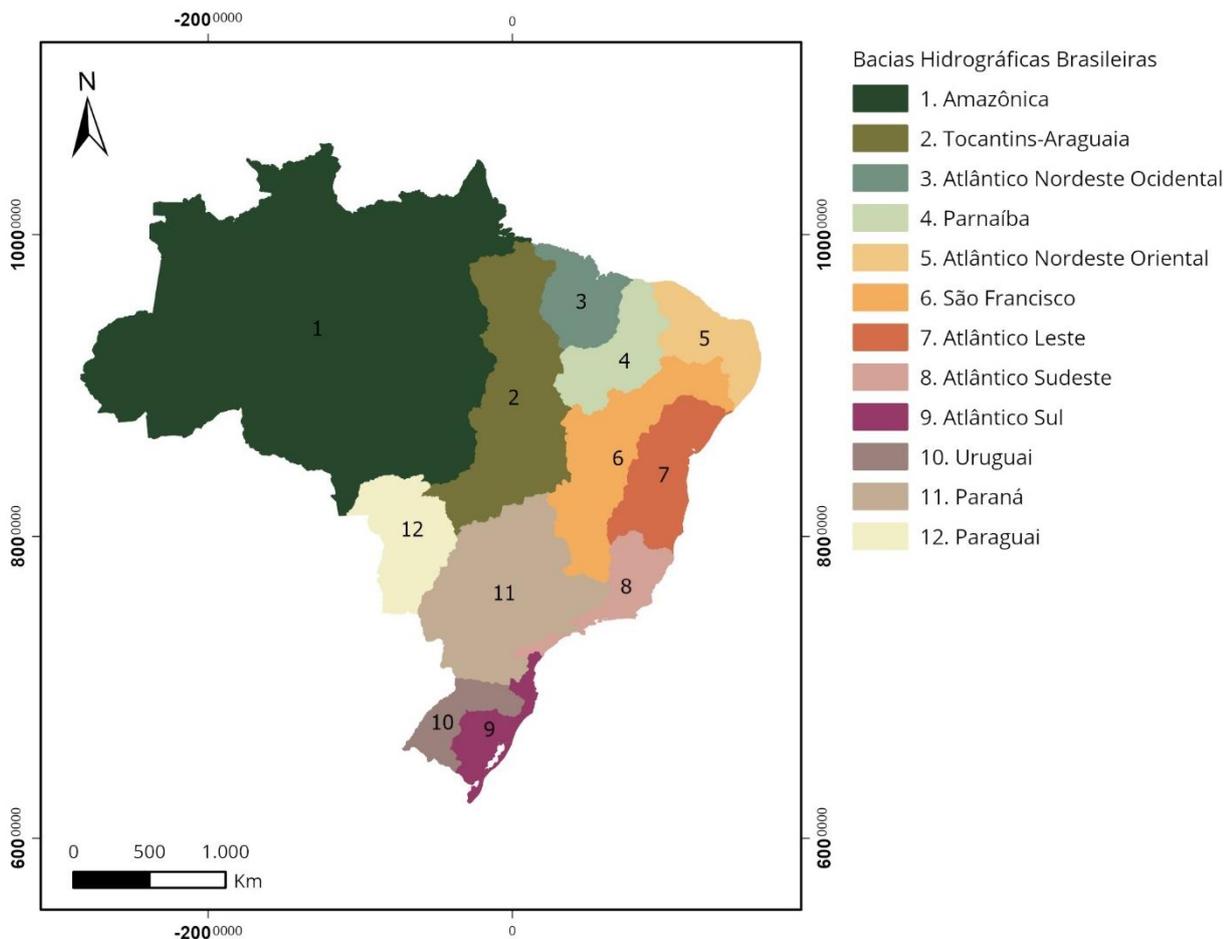


Figura 1.1 - As doze bacias hidrográficas brasileiras. Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do IBGE (2021).

A atividade econômica na área é diversificada e os recursos hídricos da bacia do rio Doce fornecem a água necessária aos usos doméstico, agropecuário, industrial e geração de energia elétrica, desempenhando um papel fundamental na economia do leste mineiro e do noroeste capixaba. Cabe destacar que na região está instalado o maior complexo siderúrgico da América Latina, além da forte atuação de empresas de mineração e reflorestadoras (PIRH Doce 2010).



Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Figura 1.2 - Primeiro mapa que mostra a "Serra das Esmeraldas", 1627, elaborado por João Teixeira de Albernaz. Fonte: Bibliothèque Nationale de France (1627).

O Rio Doce ganhou grande notoriedade, em novembro de 2015, após ser atingido pela lama de rejeitos de minério oriunda do rompimento da barragem de Fundão, pertencente à empresa Samarco Mineração. Aproximadamente 34 milhões de metros cúbicos de sedimento atingiram o Rio Doce e manaram até sua foz, fazendo deste o maior acidente ambiental da história do Brasil (ANA 2016).

No estado de Minas Gerais, as sub-bacias componentes da Bacia do Rio Doce foram divididas em seis unidades de planejamento e gestão formando Comitês de Bacia estruturados (Figura 1.3), conforme descrito abaixo (PIRH Doce 2010):

- DO1 – Comitê de Bacia Hidrográfica do rio Piranga;
- DO2 – Comitê de Bacia Hidrográfica do rio Piracicaba;
- DO3 – Comitê de Bacia Hidrográfica do rio Santo Antônio;
- DO4 – Comitê de Bacia Hidrográfica do rio Suaçuí;
- DO5 – Comitê de Bacia Hidrográfica do rio Caratinga; e
- DO6 – Comitê de Bacia Hidrográfica Águas do rio Manhuaçu.

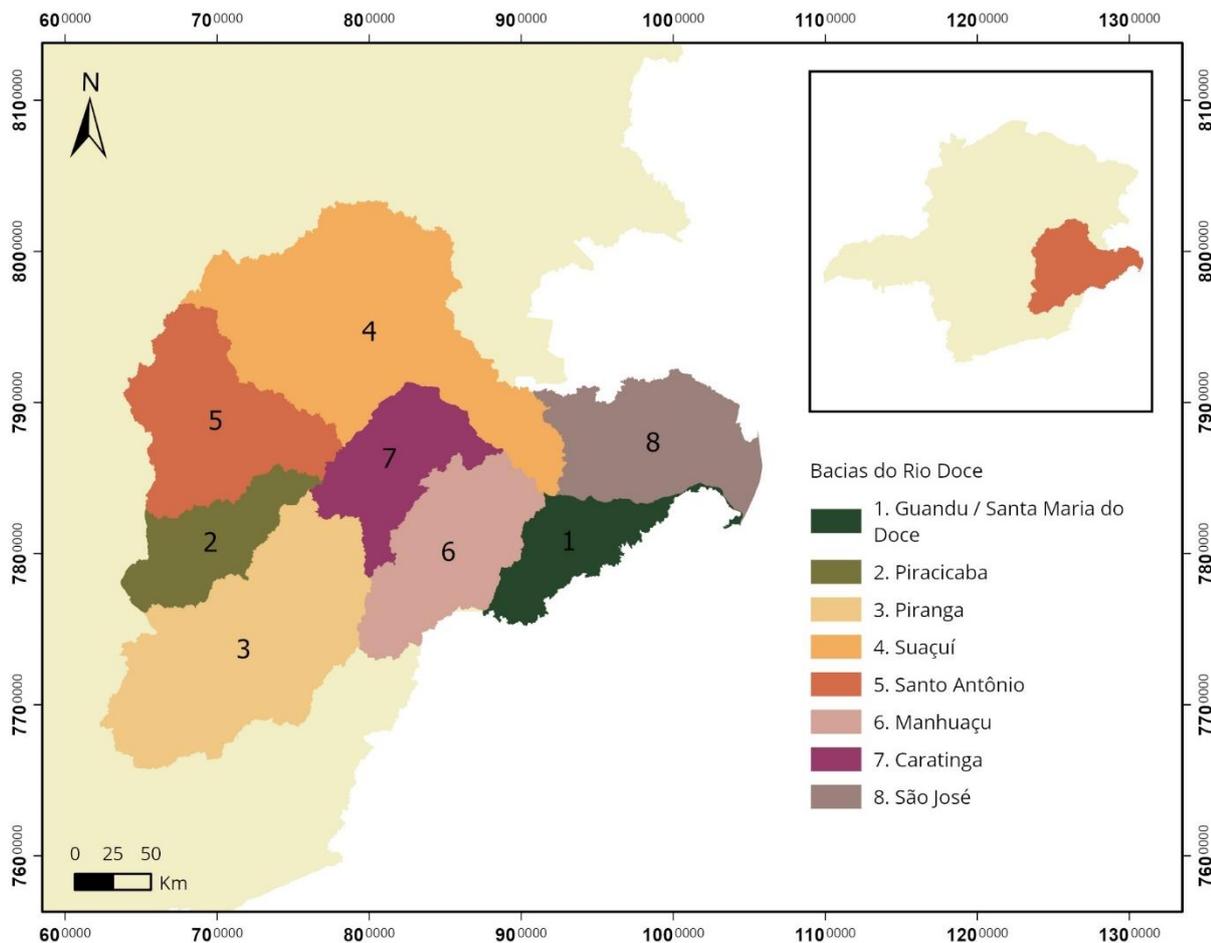


Figura 1.3 - As sub-bacias componentes da Bacia do Rio Doce no estado de Minas Gerais. Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do IBGE (2021).

A região de estudo deste trabalho, a Bacia Hidrográfica do Rio Santo Antônio, pertence ao comitê DO3. Ela ocupa uma área de 10.429,46 km² e os principais cursos d'água da bacia, além do rio Santo Antônio, são os rios Guanhães, Peixe, Tanque e Preto do Itambé. (PARH Santo Antônio 2010).

A Bacia Hidrográfica do Rio Santo Antônio está totalmente inserida no território de Minas Gerais envolvendo total ou parcialmente 29 municípios mineiros, os quais reúnem cerca de 182 mil pessoas, conforme contagem de população do IBGE (2010), o que equivale a cerca de 6% da população residente na porção mineira da bacia do rio Doce.

Atualmente tem-se dentro dos limites da bacia atividades antrópicas tais como: atividades industriais, pecuária, mineração e produção de cana de açúcar, café e milho (PARH Santo Antônio 2010).

A bacia do Rio Santo Antônio tem sofrido ao longo do tempo processos físicos tais como: erosão e intemperismo, e também, a poluição de sua água devido à urbanização e aumento populacional das cidades que compõem a bacia (PARH Santo Antônio 2010).

Diante disso, o estudo dos sedimentos de fundo se torna importante, a fim de se poder qualificar e quantificar contaminação decorrida de ação antrópica ou anomalias ocasionadas por condições geológicas. Para tanto, a análise geoquímica se torna uma ferramenta indispensável uma vez que, permite estudar a distribuição e comportamento dos elementos químicos no meio ambiente assim como, determinar valores de background para uma dada região.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é contribuir para um diagnóstico ambiental por meio da análise geoquímica e mineralógica dos sedimentos de fundo da bacia hidrográfica do Rio Santo Antônio.

1.2.1 Objetivos específicos

- Verificar a influência das atividades antrópicas e formações geológicas nos resultados dos parâmetros ambientais.
- Confrontar os valores coletados por meio deste estudo com os valores guias para a qualidade de sedimentos de fundo estabelecidos pelas legislações vigentes e pela literatura.

1.3 JUSTIFICATIVA

Ao longo do século XX a Bacia do Rio Santo Antônio sofreu com grande aumento da sua população, urbanização das cidades e construção de pequenas hidrelétricas. Atualmente, suas águas são principalmente destinadas para o uso doméstico, irrigação, dessedentação animal e atividade industrial (PARH Santo Antônio 2010). Considerando a sua imensa importância para a região e todos os processos que a bacia vem sofrendo é de extrema importância o estudo da qualidade dos sedimentos. Além disso a investigação dos pontos de degradação e de poluição permitem a identificação das fontes de riscos ambientais, em especial à saúde humana.

A Bacia do Rio Doce recebeu por muito tempo somente atenção secundária em termos de estudos hidrogeoquímicos. Com a ruptura da barragem de rejeitos de mineração da Samarco em 2015 este cenário mudou, atraindo pesquisadores do mundo inteiro interessados em estudar a bacia. Hoje,

no entanto, essa onda se achatou novamente e ainda há uma grande carência de informações e dados, principalmente referente das bacias de seus afluentes.

Assim, a escassez de estudos ambientais na Bacia do Rio Santo Antônio, principalmente geoquímicos, também justifica a realização deste trabalho. Uma vez que, servirá de acervo para auxiliar estudos ambientais na região e também poderá ser útil para um futuro gerenciamento e planejamento ambiental da bacia. Os dados obtidos neste estudo podem servir como instrumento comparativo para estudos realizados futuramente na Bacia do Rio Doce.

1.4 METODOLOGIA

1.4.1 Revisão bibliográfica e levantamento de dados

A fim de se compreender melhor os aspectos geológicos, ambientais e socioeconômicos da região de estudo foram lidos artigos e relatórios governamentais além de pesquisa em plataformas institucionais, tais como: Agência Nacional de Águas (ANA), Instituto Brasileiro de Estatística (IBGE), Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM) e Ministério do Meio Ambiente. Para o capítulo de referencial teórico pesquisou-se informações em artigos, livros e busca das legislações vigentes pertinentes ao tema abordado.

Diversas teses e dissertações desenvolvidas em outras sub-bacias da Bacia do Rio Doce sob supervisão do professor Dr. Hubert Mathias Roeser foram lidas e serviram como guia para a elaboração do presente trabalho. As dissertações de Gaspar (2021) e Pimenta (2021) desenvolvidas na própria Bacia do Rio Antônio também foram de suma importância.

Para aquisição, manipulação e integração de informações da região estudada utilizou-se software ArcGis® 10.3 e bases cartográficas encontradas nos sites do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), do Instituto Brasileiro de Estatística (IBGE), do Instituto Pristino, da Agência Nacional de Águas (ANA) e da Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema).

1.4.2 Trabalho de campo e amostragem

As amostras de sedimento de fundo foram coletadas através de uma campanha que ocorreu entre os dias 23 e 25 de setembro de 2019, época que corresponde ao período de estiagem na região. Foram coletadas dezesseis amostras em pontos previamente definidos pela coorientadora deste trabalho, Júlia de Vasconcellos Teixeira Gaspar. Na escolha dos pontos foram priorizados aspectos tais como: proximidade com espaços urbanos, nascentes e confluência de rios.

Foram coletadas 16 amostras sendo, seis em pontos do rio principal, oito em pontos dos seus principais afluentes e duas em pontos do Rio Doce (Figura 1.4). O Apêndice 1 contém as informações e descrições de cada ponto.

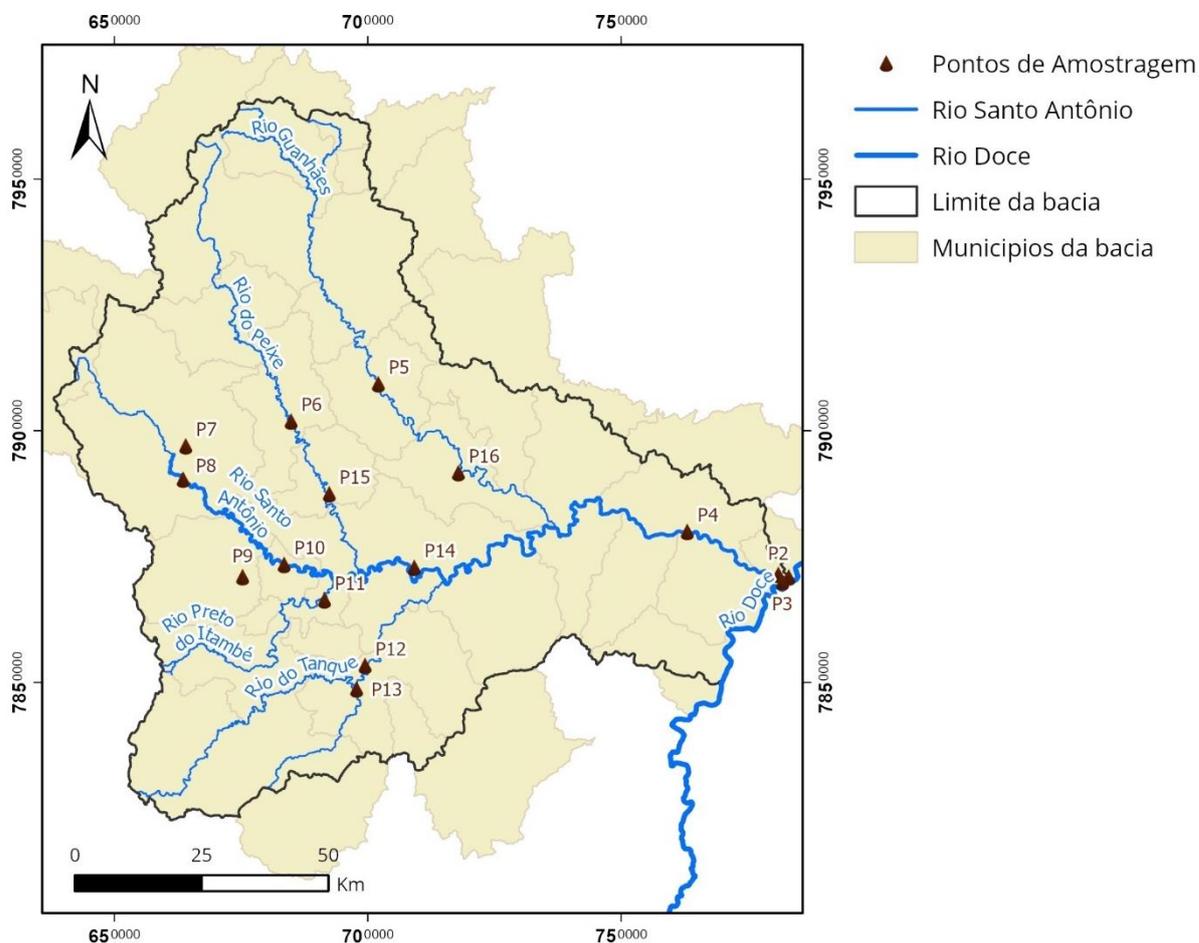


Figura 1.4 - Pontos de amostragem na Bacia do Rio Santo Antônio. Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do IBGE (2021) e IDE-SISEMA/MG (2022).

Tais pontos foram identificados através de um aparelho de *Global Positioning System* – GPS II da marca Garmim, usando sistema de coordenadas UTM.

Para cada ponto amostral coletou-se aproximadamente dois quilos da camada superficial dos sedimentos acumulados no fundo do rio. Para os locais onde a coleta foi feita sob alguma ponte utilizou-se uma draga tipo Birge-Ekman e para os pontos onde a amostragem foi feita pelas margens, contou-se com o auxílio de um coletor com haste alongada. Após a coleta, as amostras de sedimentos foram acondicionadas em sacos plásticos identificados e encaminhadas para posterior secagem.

1.4.3 Preparação e análise granulométrica dos sedimentos

As amostras coletadas foram levadas para o Laboratório de Saneamento Ambiental do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto e colocadas ao ar livre para secarem por completo. Após a secagem, as amostras foram homogeneizadas manualmente, quarteadas e finalmente separou-se dois quartis de cada amostra para peneiramento e análise granulométrica utilizando um conjunto de peneiras de diferentes malhas.

As amostras foram peneiradas por cerca de 15 minutos cada. Posteriormente, as frações retidas em cada peneira foram pesadas em balança analítica e armazenadas em sacos plásticos identificados com a granulometria correspondente. Os resultados foram classificados na escala de Wentworth (1922) representada na Tabela 1.1.

A fim de se evitar possíveis contaminações entre as amostras, ao fim de cada peneiramento, as peneiras foram lavadas e colocadas para secar a temperatura ambiente.

Tabela 1.1 - Diâmetro de peneiras utilizadas na análise granulométrica. Fonte: Elaborado pela autora com base na classificação de Wentworth (1922).

ABNT / Mesh	Ø (mm)	Granulometria (Wentworth 1922)
5	4	Seixo
10	2	Grânulo
18	1	Areia Muito Grossa
35	0,5	Areia Grossa
60	0,25	Areia Média
120	0,125	Areia Fina
230	0,0625	Areia Muito Fina
Fundo	Fundo	Silte / Argila

1.4.4 Caracterização geoquímica e mineralógica

1.4.4.1 Análise geoquímica via ICP-OES

Após a análise granulométrica foi separada uma pequena quantidade da fração mais fina das amostras (silte/argila) que foram levadas a uma estufa aquecida a 100°C durante duas horas para a completa evaporação da água restante. Cada amostra, então foi submetida ao método de digestão parcial proposto por Pueyo *et al.* (2001) seguindo os seguintes passos:

. Pesagem de 1g de sedimento (<0,0625 mm) na balança de precisão e acondicionamento em béqueres de 100mL;

. Adição de água destilada (0,5 a 1,0 mL);

- . Adição de 9,3 mL de água régia (7,0 mL de HCl 37 % p/p e 2,3 mL de HNO₃ 65% p/p);
- . Agitação para as amostras se homogeneizarem;
- . Descanso das amostras em béquer tampado com vidro de relógio e mantido à temperatura ambiente por 16 horas;
- . Aquecimento dos béqueres durante duas horas na placa aquecedora com temperatura entre 90° e 100°C;
- . Resfriamento das amostras até atingirem temperatura ambiente;
- . Filtragem das amostras utilizando filtro quantitativo Quanta JP41 e lavagem do resíduo com água deionizada, armazenando o filtrado em balão volumétrico até alcançar 50 mL.
- . Após a digestão parcial, as amostras foram acondicionadas em um recipiente plástico previamente higienizado e devidamente selado e levadas para o Laboratório de Geoquímica (LGQA) do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto. A mensuração da concentração de metais foi feita via Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), da marca Agilente 725.

1.4.4.2 Análise por Difração de raios X

Cerca de 1g das amostras foram enviadas para o Laboratório de Microscopia Ótica e Difração de Raios X do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Determinou-se a composição mineralógica por difração de raios X utilizando difratômetro *X'pert3 PANalytical*, com radiação CuK α .

1.4.5 Tratamento dos dados

Para melhor apresentação dos resultados das análises químicas dos sedimentos foram confeccionados gráficos usando o *software* Excel 2019. Para análise dos resultados provenientes da Difração de Raio X utilizou-se *software High Score X'Pert Plus*.

CAPÍTULO 2

REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 AMBIENTES FLUVIAIS

Em regiões continentais com grande afluência de água doce, a precipitação que não se infiltra no solo escoam superficialmente formando cursos d'água, configurando um ambiente fluvial. Os rios são deslocamentos da água doce, que possuem canais determinados e um curso contínuo para um lago, outro rio ou oceano (Teixeira *et al.* 2003). Com o passar do tempo, o escoamento superficial é capaz de promover o desgaste do relevo e esculpi-lo. São os desníveis no terreno que orientam os cursos d'água e determinam o escoamento, que se forma das áreas mais altas para as mais baixas capazes de formar um rio. Os rios se interligam a outros maiores formando uma bacia hidrográfica, que nada mais é, que uma área do terreno limitada por divisores onde toda a água captada converge a um mesmo curso formando um canal principal de maior volume (Grotzinger 2013). Um delimitador de bacias é chamado de divisor de águas (Teixeira *et al.* 2003). Nos rios, acontecem três tipos de processos: erosão, transporte e sedimentação.

2.1.1 Erosão e intemperismo

A erosão acontece em todas as etapas do rio, sendo que nas regiões denominadas cabeceiras, existe uma incidência maior desse processo, associado ao maior esforço no meio (Cunha 1996), proporcionado pelo intemperismo físico e químico das rochas ali presentes. Conforme apresenta Magalhães (2001), a erosão é denominada como um processo involuntário que ocorre na superfície e em profundidade, em determinados tipos de rochas e em específicas circunstâncias físicas, bem importantes. A erosão de um canal se dá de maneira distinta, conforme sua morfologia, ocasionando sedimentos com propriedades físicas e químicas específicas a cada padrão (Makkaveyev 1986).

As rochas aflorantes na superfície terrestre, independentemente de sua composição, sofrem constante desagregação e decomposição advindas de processos que podem ser químicos ou físicos (Bauman 2008). Estes processos são denominados como intemperismo. O processo de intemperismo físico, envolve a fragmentação das rochas sob uma condição de stress mecânico ocorrendo a decomposição dos minerais mais frágeis em partículas de menor granulometria. Este processo ocorre principalmente devido às tensões exercidas pela cristalização de minerais em fendas, ao alívio de pressão causada pela denudação e remoção de camadas de rochas sobrepostas e à expansão e contração térmica (Charlton 2007). A desintegração dos minerais em fragmentos menores durante o

intemperismo físico, favorece o aumento da superfície de contato tornando-os mais vulneráveis ao ar e a água, que são os principais agentes atuantes no intemperismo químico (Thornton 1984).

O intemperismo químico ocorre por meio de reações químicas como dissolução, oxidação, hidrólise, carbonatação e hidratação que causam mudança na estrutura molecular dos minerais formadores da rocha e decomposição dos minerais solúveis (Thornton 1984). Elementos químicos com maior mobilidade provenientes do intemperismo químico, tais como: Na, Ca, K e Mg, estão disponíveis nas águas subterrâneas ou nos cursos d'água na forma de cátions. Já elementos menos móveis como Fe, Al e Si, reagem para formar novos minerais estáveis em condições ambientais dependendo das condições físico-químicas do meio, tais como: pH, eh, saturação do meio, entre outras. A combinação de novos minerais e outros sedimentos forma o solo (Siegel 2002). Não é por acaso que os elementos Fe^{3+} , Al, Si e Ti formam minerais secundários numa combinação com oxihidróxidos, por exemplo: a gibbsita $Al(OH)_3$ e a goethita $(FeO(OH))$

A taxa e o tipo de intemperismo são controlados principalmente por quatro variáveis: clima, material parental, relevo e atividade orgânica. Segundo Leopold (1995), existe uma maior ocorrência de intemperismo físico em regiões frias, enquanto que o intemperismo químico é mais comum em regiões tropicais onde as temperaturas e o índice pluviométrico são mais elevados. A topografia afeta a temperatura e a disponibilidade de água tanto a nível regional quanto em escalas locais (Charlton 2008). A atividade orgânica também aumenta com a temperatura e leva à produção de maiores concentrações de CO_2 no solo e ácidos orgânicos. Estes, aumentam as taxas de carbonatação, solução e hidrólise. Minerais ricos em ferro e outros íons metálicos, tais como, olivina e piroxênio são muito suscetíveis à oxidação e a hidrólise, enquanto o quartzo, que contém poucos íons metálicos, intemperizam muito mais devagar. Rachaduras e fissuras nas rochas, aumentam a superfície de contato facilitando a penetração da água para ocorrências de intemperismo químico (Charlton 2008).

Minerais que não são dissolvidos e não são transportados em forma de íons podem sofrer desagregação da rocha de origem e serem transportados em fragmentos de diferentes granulometrias. As águas fluviais são, na maior parte, os agentes transportadores e erosivos também. Os rios são responsáveis por drenar água dos continentes para os oceanos e são o destino principal dos “produtos” do intemperismo (Leopold 1995).

A erosão fluvial é um fenômeno contínuo e espontâneo que ocorre devido à ação das correntes dos rios. Quanto maior for a velocidade e a turbulência de um canal mais material é retirado e maior será a erosão hídrica gerada (Christofolletti 1980). Segundo Charlton (2008), o processo de erosão fluvial se inicia assim que a energia gerada pelo fluxo de água ultrapassa a resistência do material do leito e das margens do rio.

2.1.2 Transporte Sedimentar

Nos sistemas fluviais, os materiais erodidos são embarcados nos rios de cinco maneiras principais: por arraste, por saltação, por rolamento, por suspensão e por solução. Os procedimentos por arraste, saltação e rolamento, acontecem ao entrar em contato com leito do rio, e transfere sedimentos de maior granulometria, como areia e cascalhos. Grãos mais grossos se deslocam de modo intermitente e podem sofrer colisão entre si durante o processo de transporte causando fragmentação (Christofoletti 1980). Partículas argilosas e sílticas, são suficientemente leves, e facilita o transporte por carga de suspensão (Miall 1992). Esses sedimentos, se movem com a velocidade da água corrente enquanto a turbulência for suficiente para mantê-los suspensos, caso contrário serão precipitados (USGS 1963). E por fim, os íons provenientes do intemperismo químico são transportados por solução.

As propriedades dos sedimentos transportados pelos rios consistem especialmente de fatores como velocidade média do fluxo (que varia com a carga média), tipo de material geológico, tamanho e aspecto das partículas, geometria do canal, clima, vegetação e cobertura vegetal da bacia hidrográfica, principalmente das matas adjacentes aos cursos d'água (Mortatti *et al.* 2002). Esses princípios são altamente inter-relacionados e estudos geomorfológicos e hidrológicos expõem que essas relações são difíceis de compreender quando os mais diversos fatores variam espacial e temporalmente dentro da bacia hidrográfica.

O que define o meio de transporte do sedimento é a alteração do tamanho da partícula, peso e formato, tipo de escoamento, bloqueios no leito, e vários outros motivos de correlação, como declínio do rio, formato do canal e temperatura da água (Stevens & Yang 1989 in Vicq 2015). Já os sedimentos em suspensão condizem pelas porcentagens mais altas de material conduzido em um rio (Ward & Trimble 1995), sobretudo, em períodos chuvosos, impactando visualmente a turbidez das águas.

Cargas dissolvidas incluem componentes de intemperismo rochoso transportados em soluções químicas por rios e águas subterrâneas (Christofoletti 1999). A composição química da água do leito depende da litologia da bacia hidrográfica, vegetação e uso da terra (Silva *et al.* 2003). Uma carga suspensa ou destacada é transportada na mesma velocidade do fluxo de água. Uma carga sólida que é arrastada por colisão experimentalmente resistência ao atrito e, portanto, move-se a baixa velocidade.

As cargas sólidas em suspensão são constituídas por partículas de pequeno tamanho (siltes e argilas) que, devido ao seu mínimo tamanho, são mantidas em suspensão pela turbulência. Ward & Trimble (1995) declararam que em boa parte dos rios os sólidos suspensos retratam mais de 90% de todo o material transportado. Semelhante a Suguio & Bigarella (1979), as cargas saltantes e de arrasto na maioria das vezes, retratam entre 10 e 20% da carga em suspensão, exceto para os rios entrelaçados

onde a carga de sedimentos pode exercer 50% da carga total. Cargas de arrasto e saltante, formam materiais de leito de tamanho maior, como areia e cascalho, que rolam, empurram e saltam ao longo do leito.

No que diz respeito aos fatores que afetam o transporte de sedimentos fluviais, as condições locais, como composição geológica, tipo de uso da terra, relevo, tipo de solo, clima e atividades antrópicas são importantes em regimes hidrossedimentológico (Hasnain & Thayyen 1999). Carvalho (1994) descreve essas atividades em relação à intervenção humana. As atividades humanas têm um impacto significativo na erosão. O autor reitera que sob certas condições, as taxas de erosão por intermédio da intervenção humana, pode ser até 100 vezes maior que as intervenções geológicas.

2.2 GEOQUÍMICA DOS SEDIMENTOS FLUVIAIS

Förstner (2004) definiu sedimentos como fragmentos rochosos formados por mecanismos de intemperismo e erosão atuando sobre rochas e solos, agindo como o principal componente de uma matriz transportada por água ou facilmente conduzida. Suas propriedades consistem da natureza da rocha erodida, do agente de transporte, do seu tempo e dos estados físicos da bacia sedimentar. Eles são classificados por material, grau de arredondamento e textura.

Conforme aponta Torres *et al.* (2005), a geoquímica desempenha um instrumento importante no entendimento das técnicas superficiais e subsuperficiais que gerenciam a distribuição dos elementos químicos e da mineralogia. Em termos geológicos, a análise da composição química de sedimentos proporciona a obtenção de dados sobre as características da área fonte ou rochas parentais, e do seu estado químico, climáticas, intempéricas e tectônicas dominantes.

Na questão fluvial, os sedimentos são parte total, fundamental e dinâmica das bacias hidrográficas, agindo como nascentes de recursos energéticos para a biota, que por meio dos ciclos biogeoquímicos operam de maneira expressiva na atitude dos metais aportados para os rios. Formam-se ainda, como relevantes depósitos e fontes potenciais de dispensa de elementos característicos no meio aquático, possibilitando-os para integração pela biota (Apitz & White 2003; Vicq 2012).

Em seu estudo, Förstner (1989) observou que os sedimentos são importantes na avaliação da forma e intensidade dos impactos nos ecossistemas aquáticos devido à troca contínua de nutrientes e outras substâncias poluentes ou não poluentes com a coluna d'água. Além disso, Carvalho (1994) mencionou que analisando os sedimentos superficiais e estudando a relação entre os elementos-traço neles contidos, é possível estudar a história de ocupação das bacias hidrográficas e compreender a ascensão dos biosistemas aquáticos. Como os sedimentos podem armazenar nutrientes e outros poluentes (compostos orgânicos e metais) e fornecê-los à biota e aos sistemas aquáticos por meio de

ciclos biogeoquímicos, os estudos de sedimentos são importantes para avaliar a qualidade dos ecossistemas fluviais, identificando as fontes de poluentes e compreensão dos processos geoquímicos aquáticos (Soares 2004; Berbel 2008).

2.2.1 Sedimentos Fluviais e sua Importância para os Ecossistemas Aquáticos

As rochas e minerais da crosta terrestre são a principal fonte de elementos químicos para o meio ambiente, liberados e redistribuídos por diversos tipos de mecanismos. Para compreender essa dinâmica, precisamos entender que processos de alteração supergênicos podem levar à liberação de elementos tóxicos, principalmente metais pesados, no meio ambiente. Fatores que determinam o destino dos elementos tóxicos, isto é, se ele irá projetar uma fase insolúvel ou ser absorvido sobre a superfície, ou ainda se será conduzido e posteriormente, sugado pelas plantas, pelo solo e pelos sedimentos, consistem basicamente das circunstâncias geológicas, físico-químicas, climatológicos e biológicas do local (Alloway 1995).

Portanto, é fundamental estudar a interface entre rocha, biosfera e hidrosfera ao analisar o comportamento de tais elementos. Esta análise é uma técnica altamente complicada devido à natureza multicomponente de todos os compartimentos envolvidos, cujos equilíbrios químicos estão em contínua transformação (Sposito 2008). Os comportamentos químicos que acontecem nesses compartimentos determinados, validam a mobilização e arranjo dos elementos nos solos e sedimentos, havendo normalmente uma correlação significativa entre a concentração total de elementos nos sedimentos e a matriz encontrada (Roca *et al.* 2008).

De acordo com Swennen & Van der Sluys (2001), que analisaram a evolução histórica da acumulação de elementos característicos em sedimentos em Luxemburgo e na Bélgica, os sedimentos são uma técnica apropriada para analisar o legado das atividades humanas em relação ao meio ambiente, possibilitando uma confrontação entre os níveis dos componentes da era pré-industrial até as concentrações atuais. Carvalho (1994) pondera reafirmando que essa condição ressalta que é possível investigar o desenvolvimento histórico de um ecossistema aquático e dos ecossistemas terrestres adjacentes por meio do estudo das associações entre elementos característicos compreendidos nos sedimentos ou ainda, pesquisar o histórico atual de ocupação da bacia de drenagem por meio do estudo dos sedimentos superficiais.

Nos meios aquáticos, íons metálicos metalóides podem se difundir através das fases aquosa, coloidal e sólida em suspensão, e a maioria dessas espécies é agregada aos sedimentos de fundo (Filgueiras *et al.* 2004). Segundo aponta Forstner *et al.* (1995), os sedimentos em geral têm maior capacidade de reter produtos químicos orgânicos e inorgânicos. Segundo esses autores, menos de 1% das substâncias que entram nos sistemas hídricos são dissolvidas na água e mais de 99% se depositam

em compartimentos sedimentares. Gerrits & Edelenbos (2004), contestam essa informação, afirmando que mais de 90% dos metais estão presentes no meio fluvial são agrupados em sedimentos em suspensão. Ou seja, a contaminação de metais em sedimentos é mais profunda do que nas águas.

Algumas pesquisas (Eleutério 1997; Costa 2001; Lottermoser 2010) apresentaram esta assertiva e indicam que os metais são mais constantes como solutos do que como íons diluídos na solução. Hidróxidos de ferro, alumínio, substâncias húmicas e manganês são relativamente níveis minerais e orgânicos que confirmam a propriedade de absorção dos sedimentos, que representam um papel importante no acúmulo, deslocamento e flexibilidade de metais característicos em meios aquáticos (Moreira 2003).

2.2.2 Contaminação dos Sedimentos

A pesquisa ambiental de contaminação antropogênica por meio da geoquímica de sedimentos vem por meio da compreensão de que os sedimentos concentram uma grande parte das substâncias químicas e dos metais contaminadores do sistema hídrico (Gerrits & Edelenbos 2004). Os estudos de infecção em sedimentos iniciaram, conforme aponta Leão (2014), em 1973, pela Federal Water Quality Administration e posteriormente, pela United States Environmental Protection Agency, com o objetivo de normalizar o destino de materiais advindos de drenagem. Em 1993, a Ontário Ministry of the Environment and Energy (OMME 1993), progrediu com a definição de Valores Guia para a Qualidade de Sedimentos (VGQS), estabelecendo pontos de infecção e determinando valores do nível limite de efeito e do nível provável de efeito, sendo esses valores atribuídos por meio de técnicas analíticas.

No Brasil, a técnica de normatização para níveis de contaminação em sedimentos teve início no estado de São Paulo, onde a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), produziu pesquisas de contaminação em sedimentos empregando valores internacionais para contaminação (CETESB 1998). Posteriormente, em 2004, o Conselho Nacional de Meio Ambiente expôs a resolução CONAMA nº 344/2004 (CONAMA 2004) com princípios de sugestão para materiais fundamentados em normas canadenses e norte-americanas.

Os valores normatizados pela legislação brasileira, como foram fundamentados em valores estrangeiros, não representam o quadro natural de convergência destes componentes nos rios nacionais. Esta legislação foi substituída pela Resolução CONAMA nº 454/2012 (CONAMA 2012), mas manteve os valores citados na norma anterior. A Tabela 2.1 apresenta os valores máximos dos metais e As conforme a classificação em mg/kg. Sendo o nível 1 o limiar abaixo do qual há menor probabilidade de efeitos adversos à biota e o nível 2 o limiar acima do qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota.

Nos estudos dos rios, os valores geogênicos e de background se encontram bem maior do que os valores legislados (Costa 2007; Rodrigues 2012), sendo um indicativo que, é primordial uma análise local para a particularização destes valores em uma determinada bacia a ser analisada. Conforme Hursthouse (2001) estas desigualdades podem apontar uma falsa contaminação ou podem superestimar valores de contaminação em uma determinada área.

Tabela 2.1 - Valores de referência estabelecidos pela Resolução CONAMA no 454/2012 em mg/kg. 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	0,49	35,9	315

2.2.3 Fator de enriquecimento

O fator de enriquecimento (FE) é um índice quantitativo para medir a qualidade ambiental dos sedimentos. Foi inicialmente criado em 1974, com o objetivo de analisar o início dos elementos na água, na precipitação ou até mesmo na atmosfera (Duce *et al.* 1975). Com o passar dos anos, sua pesquisa foi ampliada para os solos, sedimentos de lagos, turfa, rejeitos e diversos outros objetos (Loska *et al.* 1997). Para Lu *et al.* (2012), fator de enriquecimento é uma técnica onde se pode diferenciar as fontes geogênicas e antropogênicas de algum tipo de contaminação. Segundo Tan *et al.* (2005), é relevante destacar a dimensão do fator de enriquecimento no reconhecimento de matrizes geológicas com relações de absorção de metais característicos, fortalecendo com análises geoquímicas e pesquisas ambientais.

Tal medida pode ser determinada de várias maneiras diferentes. No presente trabalho o fator de enriquecimento, da região para o período investigado, será calculado de acordo com a fórmula proposta por Yongming *et al.* (2006) representada abaixo pela seguinte equação:

$$EF = [(C_m / C_{VRL}) / (B_m / B_{VRL})]$$

Onde: C_m é a concentração de determinado elemento; C_{VRL} é a concentração do elemento de referência; B_m é o valor do background do elemento em estudo; B_{VRL} é o valor do background do elemento de referência. A Tabela 2.2 apresenta a classificação de contaminação conforme valores do fator de enriquecimento (FE).

Tabela 2.2 - Classificação do fator de enriquecimento

Classes do FE	Qualidade dos sedimentos
< 2	Deficiência de enriquecimento
2 - 5	Enriquecimento moderado
5 - 20	Enriquecimento significativo
20 - 40	Enriquecimento muito alto
> 40	Enriquecimento extremamente alto

CAPÍTULO 3

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo encontra-se na região leste do estado de Minas Gerais (Figura 3.1). Os municípios que pertencem a Bacia do Rio Santo Antônio estão localizados na mesorregião Vale do Rio Doce e, com maior relevância, à microrregião Itabira.

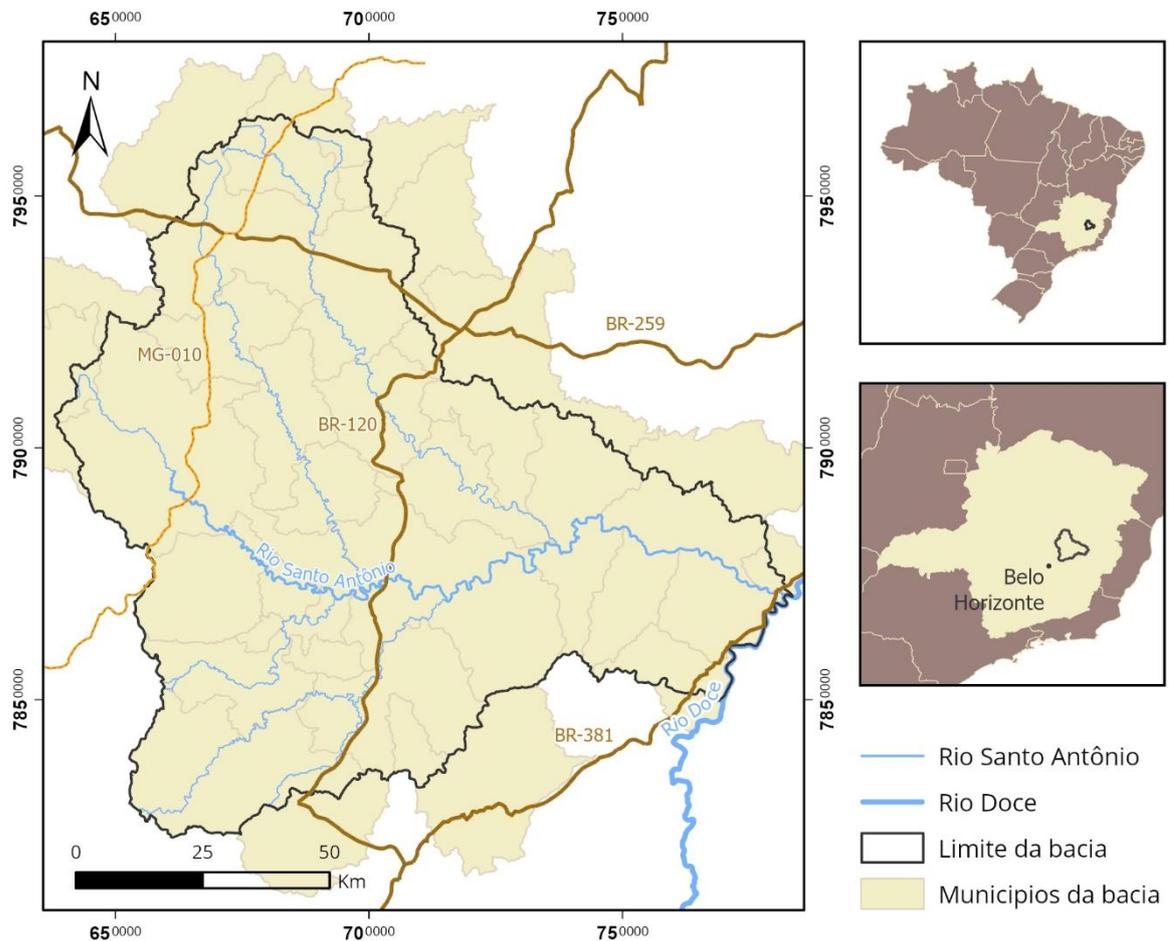


Figura 3.1 - Mapa de localização da bacia do Rio Santo Antônio. Fonte: Elaborado pela autora com base em dados do IBGE (2021) e CPRM / Codemig (2014).

3.2 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

3.2.1 Hidrografia

A sub-bacia hidrográfica do Rio Santo Antônio está inserida na Bacia do Rio Doce, ocupando cerca de 15% do seu território, equivalente a uma área de aproximadamente 10.429,46 km² (IGAM, 2020). O Rio Santo Antônio, o principal curso d'água da bacia, nasce na Serra do Espinhaço, no município de Conceição do Mato Dentro e percorre por volta de 280 km até desaguar no rio Doce, no município de Naque, no Vale do Aço. Destacam-se também os rios Guanhães e do Peixe, afluentes do Rio Santo Antônio pela margem esquerda, e rios do Tanque e Preto do Itambé, afluentes pela margem direita (Figura 3.2).

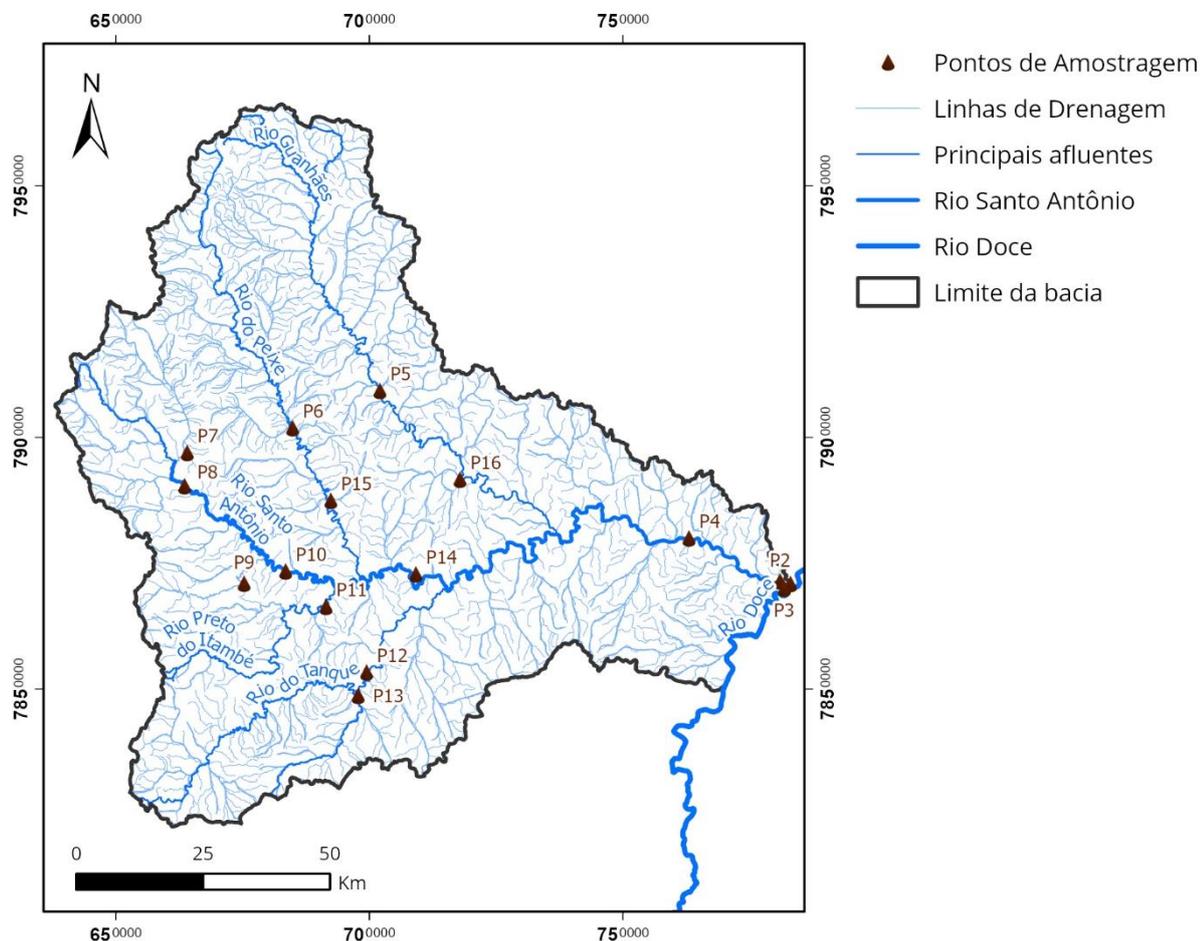


Figura 3.2 - Hidrografia da Bacia do Rio Santo Antônio. Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do IDE-SISEMA/MG (2022).

3.2.2 Vegetação

Aproximadamente 98% da Bacia do Rio Santo Antônio encontra-se inserida sobre o bioma da Mata Atlântica (IBGE 2019) e a área restante pertence ao Cerrado (Figura 3.3). Apesar do alto grau de devastação, a Mata Atlântica ainda é uma das regiões mais ricas do mundo em biodiversidade. Após séculos de exploração, hoje restam cerca de 22% de sua cobertura original e estima-se que ela abriga cerca de 20000 espécies vegetais, o que representa 35% das espécies existentes em todo Brasil (Ministério do Meio Ambiente 2015). O Cerrado também possui uma grande biodiversidade além de ser um importante produtor de recursos hídricos, no entanto é segundo bioma mais ameaçado do Brasil.

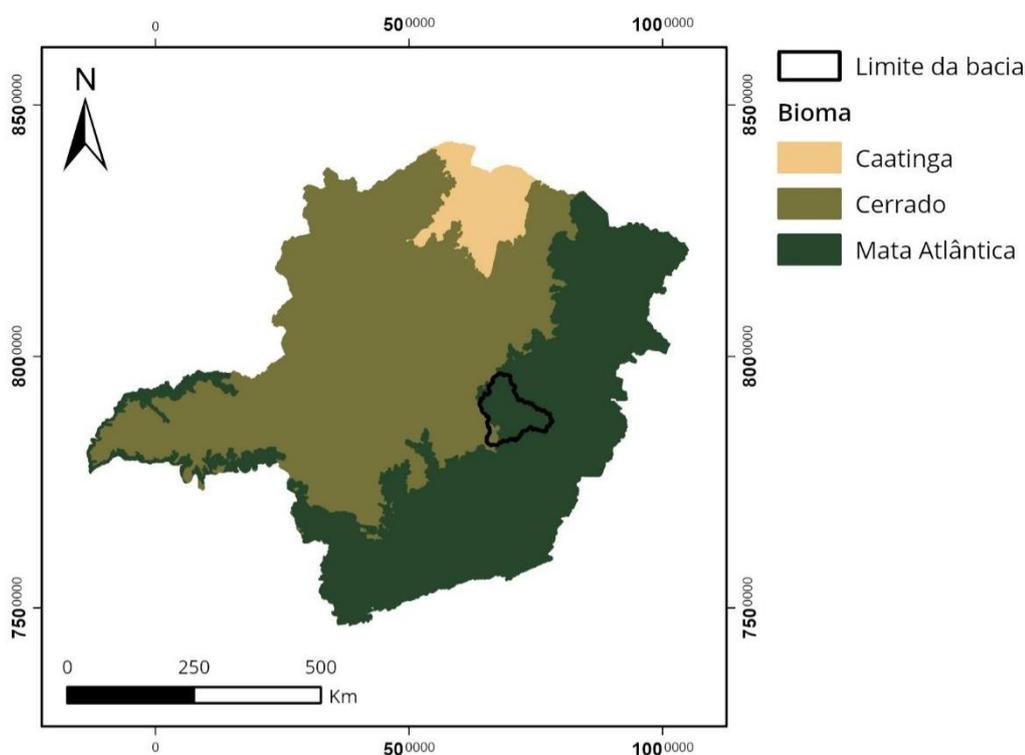


Figura 3.3 - Mapa de biomas do estado de Minas Gerais com a bacia do Rio Santo Antônio demarcada. Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do IBGE (2019).

Importante ressaltar a demarcação de 12 Unidades de Conservação dentro da bacia, sendo oito classificadas de uso sustentável, três de proteção integral e uma terra indígena (PARH Santo Antônio 2010).

A vegetação nativa predominante da área é classificada como Floresta Estacional Semidecidual (IDE/SISEMA 2009). Observa-se que a área urbanizada é pouco expressiva quando comparada ao tamanho da bacia (Figura 3.4), o que pode ser considerado como um fator importante para o atual estado de conservação ambiental da região. O PARH Santo Antônio (2010) reforça que a

Bacia do Rio Santo Antônio apresenta um dos melhores estados de conservação dentre as Unidades que compõem a bacia hidrográfica do Rio Doce.

Observa-se também na Figura 3.4 significativo plantio de Eucalipto na porção sul da bacia, o que provavelmente corresponde às áreas de reflorestamento próximas a região do Vale do Aço, que é um polo industrial que tem demanda por esta matéria prima. Na porção oeste da bacia ocorrem campo e campo rupestre na região da Serra do Espinhaço.

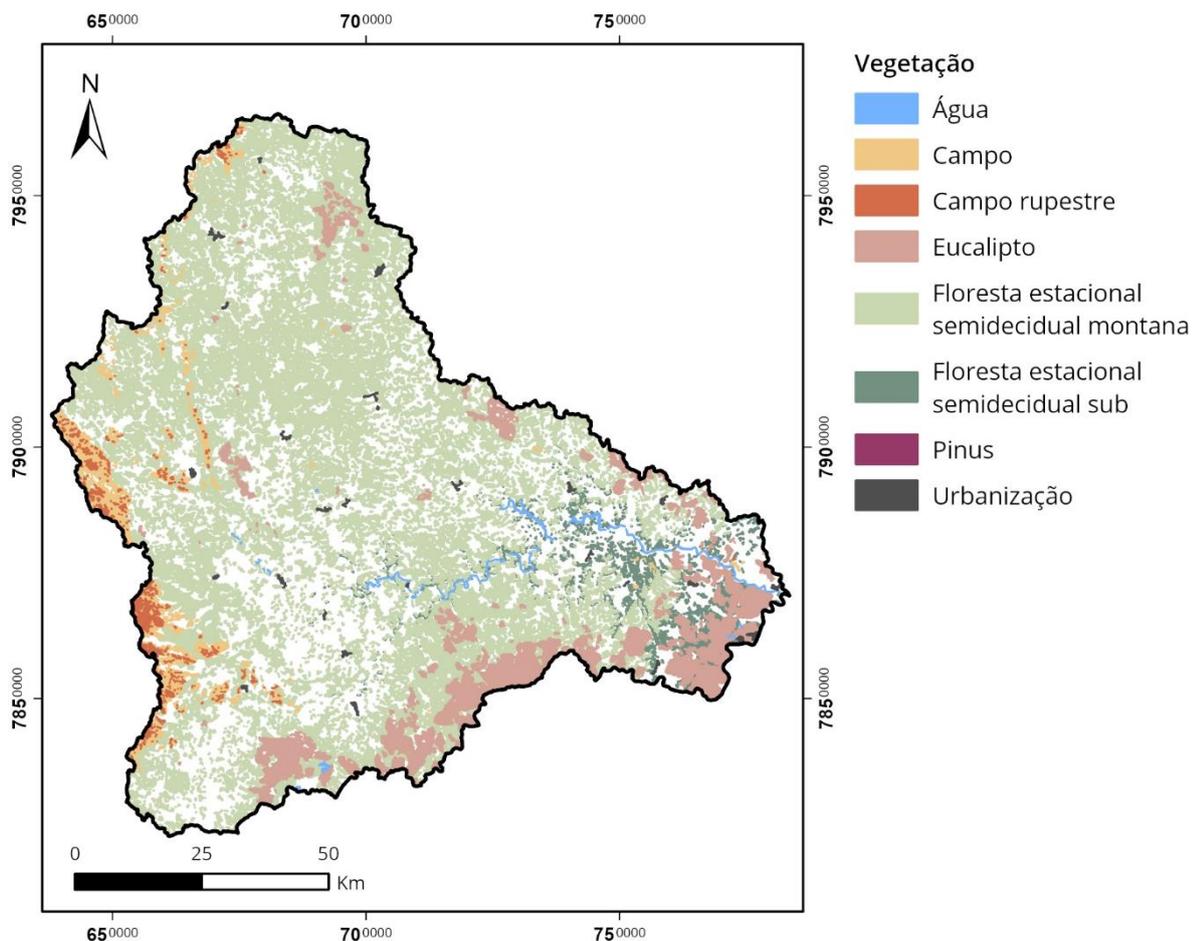


Figura 3.4 - Mapa de vegetação na área da bacia do Rio Santo Antônio. Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do IDE-SISEMA/MG (2009).

3.2.3 Solos

Na bacia do rio Santo Antônio predominam Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo, Neosolo Litólico e Argissolo Vermelho que totalizam 92,5% da área da bacia, conforme pode ser visualizado no mapa de solos da Figura 3.5 e na Tabela 3.1.

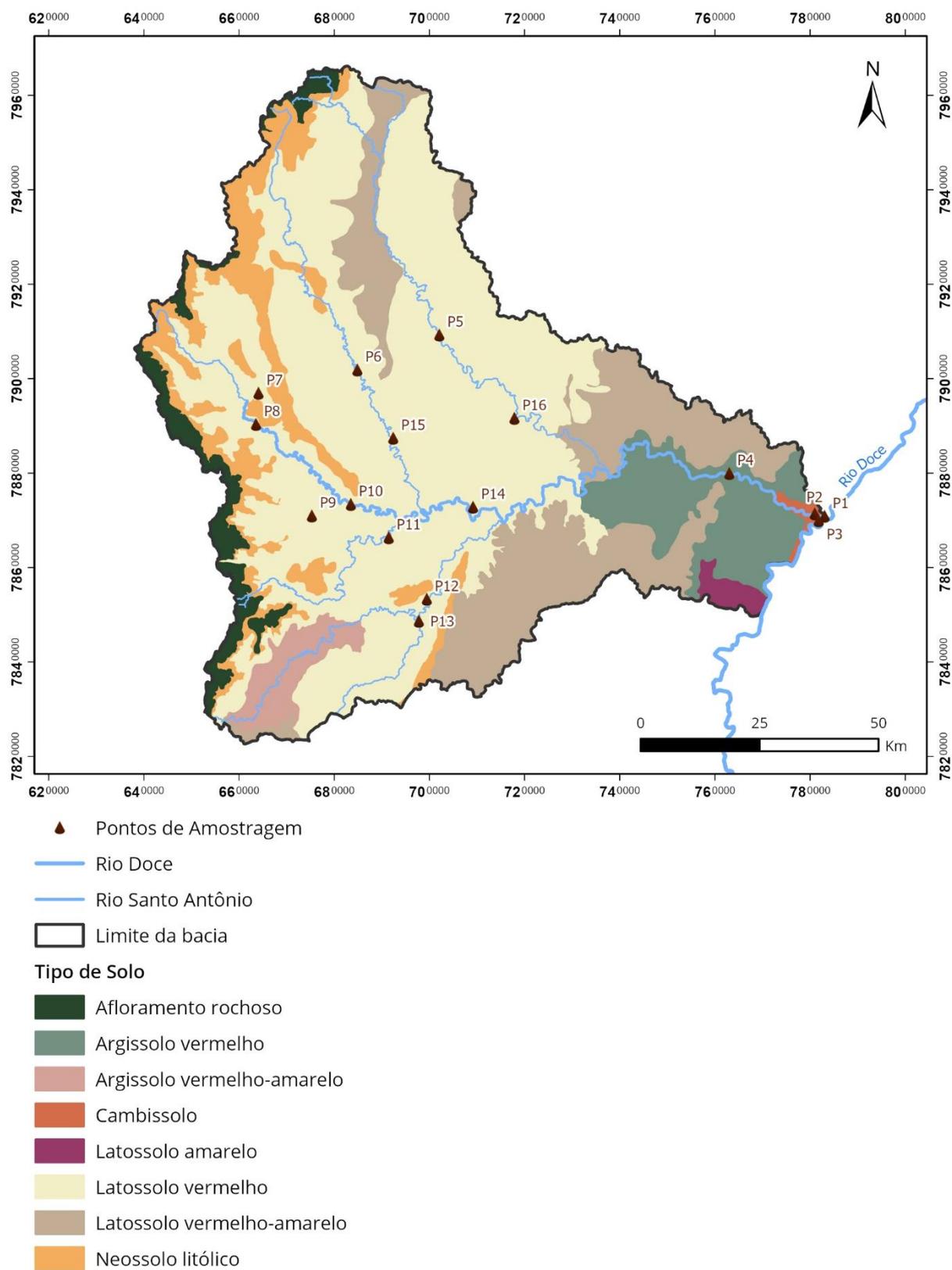


Figura 3.5 - Mapa de solos na área da bacia do Rio Santo Antônio. Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados da FEAM/UFV (2010).

Tabela 3.1 - Classes e porcentagem ocupada pelos solos na bacia do Rio Santo Antônio.

Classe	Porcentagem
Afloramento rochoso	3,5
Argissolo vermelho	7,7
Argissolo vermelho-amarelo	2,6
Cambissolo	0,5
Latossolo amarelo	0,8
Latossolo vermelho	55,0
Latossolo vermelho-amarelo	19,4
Neossolo litólico	10,4

Os latossolos ocorrem em 75,2% da área da bacia, sendo o latossolo vermelho o predominante. São solos de intemperização intensa e comumente associados a relevos planos e suavemente ondulados, apresentando alto potencial para o uso agrícola apesar da baixa fertilidade e baixa retenção de umidade. O SiBCS (Santos et al., 2018) caracteriza os latossolos como: argilas com predominância de óxidos de ferro, alumínio, silício e titânio, argilas de baixa atividade, fortemente ácidos e baixa saturação de bases.

Os latossolos podem ser diferenciados com base na combinação de características como: teor de Fe_2O_3 , cor do solo e relação K_i (SiO_2/Al_2O_3). O latossolo vermelho tem maior relação Al_2O_3/Fe_2O_3 e menor porcentagem de Fe_2O_3 livre (Vieira 1988). A coloração se deve a predominância de hematita enquanto que no latossolo amarelo prevalece goethita.

A segunda classe proeminente na área é o neossolo litólico. Segundo o SiBCS (Santos et al., 2018) são solos pouco evoluídos e sem a presença de horizonte diagnóstico. São solos rasos e normalmente associados a relevos mais declivosos. Os teores de fósforo são baixos em condições naturais e a fertilidade está condicionada à soma de bases e à presença de alumínio.

Na bacia também ocorre em menor predominância argissolos e cambissolo. O SiBCS (Santos et al., 2018) define argissolos pela presença de horizonte diagnóstico B textural, apresentando acúmulo de argila em profundidade. Ocorrem normalmente em paisagens mais acidentadas e podem apresentar baixa fertilidade devido a altos teores de alumínio, baixa saturação de bases e serem normalmente ácidos.

Cambissolo é um tipo de solo considerado pouco desenvolvido, apresentando características do material originário evidenciado pela presença de minerais primários (Santos et al., 2018). As características do cambissolo podem variar bastante de uma região para a outra devido à heterogeneidade do material de origem, das formas de relevo e das condições climáticas.

3.2.4 Geologia

As litologias predominantes na Bacia Santo Antônio estão demonstradas no mapa da Figura 3.6 e resumidas na Tabela 3.2.

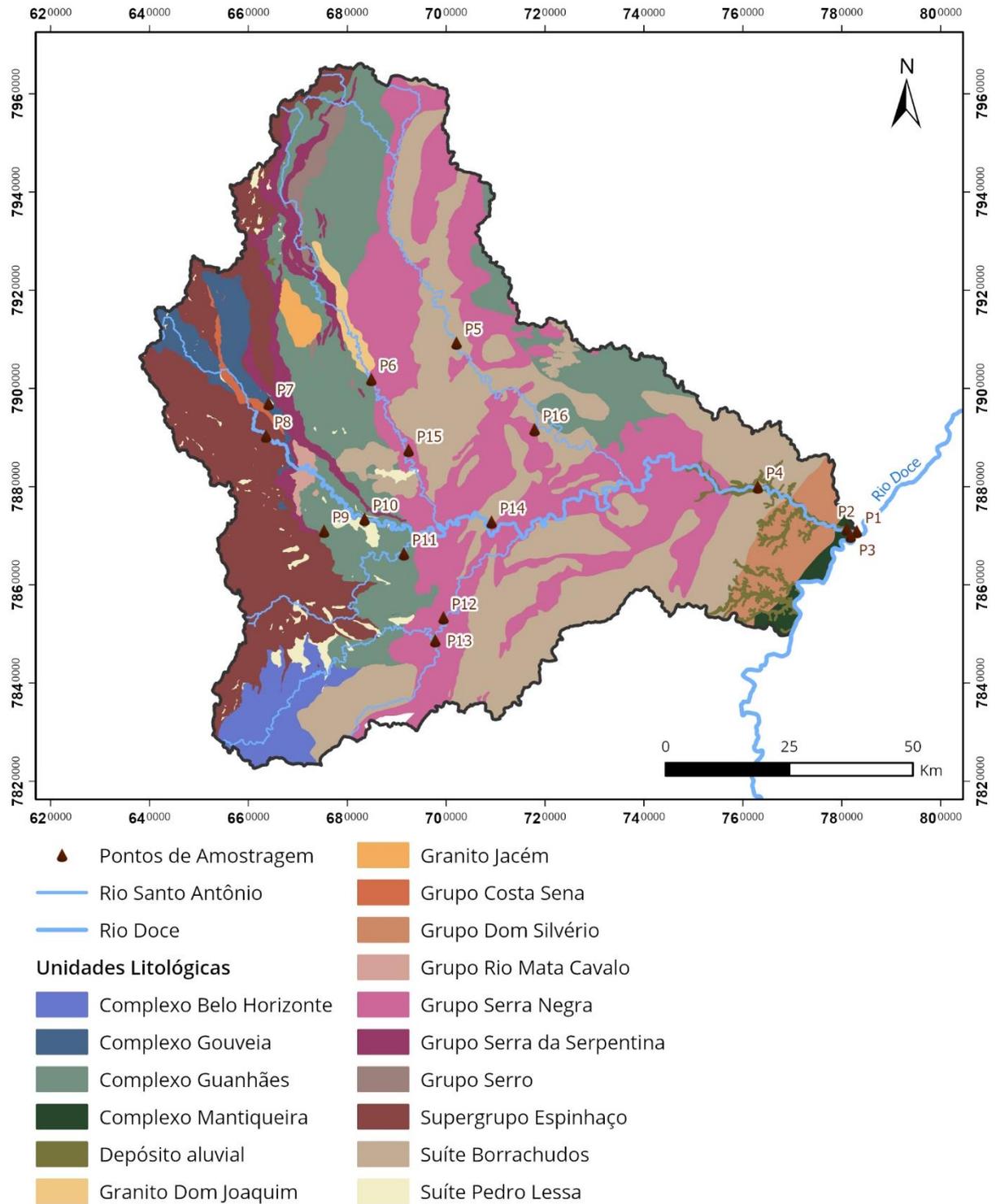


Figura 3.6 - Mapa de litologias na área da bacia do Rio Santo Antônio. Fonte: Elaborado pela autora com base em dados da CPRM / Codemig (2014).

Tabela 3.2 - Composição litológica da área da Bacia Hidrográfica do Rio Santo Antônio. Fonte: adaptado com base nos dados da CPRM/COMIG (2014).

Unidade estratigráfica		Litotipos	Percentual de unidades	
Suíte Borrachudos		Quartzo monzonito, álcali-feldspato granito, ortogneisse granítico alcalino	27,1	
Complexo Basal Arqueano	Complexo Belo Horizonte	Ortogneisses bandados tipo TTG, com intercalações de anfibolito e metaultramáfica	3,0	23,9
	Complexo Gouveia		2,1	
	Complexo Mantiqueira		0,7	
	Complexo Guanhães	Ortogneisse tonalítico a granítico	18,0	
Grupo Serra Negra		Formação ferrífera bandada predominante intercaladas em gnaiss bandado tipo TTG. Ocorrência eventual de quartzito puro, quartzito laminado argiloso e localmente ferruginoso, calcissilicática laminada e anfibolito e rochas metaultramáficas	22,5	
Supergrupo Espinheiro, Grupo Diamantina	Formação Sopa-Brumadinho	Metaconglomerado, quartzito, metapelito	13,9	
Grupo Dom Silvério		Xisto aluminoso, metamáfica, metaultramáfica, gondito, clacissilicática	3,0	
Grupo Serra da Serpentina	Formação Jacém	Quartzito com intercalações subordinadas de filito	2,7	
Suíte Pedro Lessa		Soleiras e diques máficos - metagabro e metadiabásio	2,3	
Grupo Serro		Rocha metaultramáfica e metamáfica tholeiíticas. Quartzito, metabasalto komatiítico, metavulcânica félsica, formações químico-exalativas, FFB e xisto	1,3	
Granito Dom Joaquim		Granito	0,7	
Granito Jacém		Granito	0,6	
Grupo Rio Mata Cavalo		Rocha metaultramáfica e metamáfica tholeiíticas. Quartzito, metabasalto komatiítico, metavulcânica félsica, formações químico-exalativas, FFB e xisto	0,5	
Grupo Costa Sena		Xisto predominante; metavulcânica máfica, formação ferrífera bandada, formações sulfetadas	0,4	
Depósito aluvial		Sedimentos clásticos inconsolidados	1,1	

3.2.5 Uso e ocupação do solo

Conforme ilustrado no mapa da Figura 3.7 o uso e ocupação do solo na Bacia do Rio Santo Antônio é marcado predominantemente pela agropecuária. Observam-se ainda áreas significativas de vegetação florestal na porção central da Bacia, o que corresponde a áreas remanescentes de Mata Atlântica. Na parte Sul da bacia, região próxima ao Vale do Aço, observa-se forte ocorrência de silvicultura devido as áreas reflorestadas com Eucalipto.

Embora integre 29 municípios a Bacia do Rio Santo Antônio, possui mancha urbana pouco expressiva, conforme já dito anteriormente, pode ter contribuído na conservação de ecossistemas naturais.

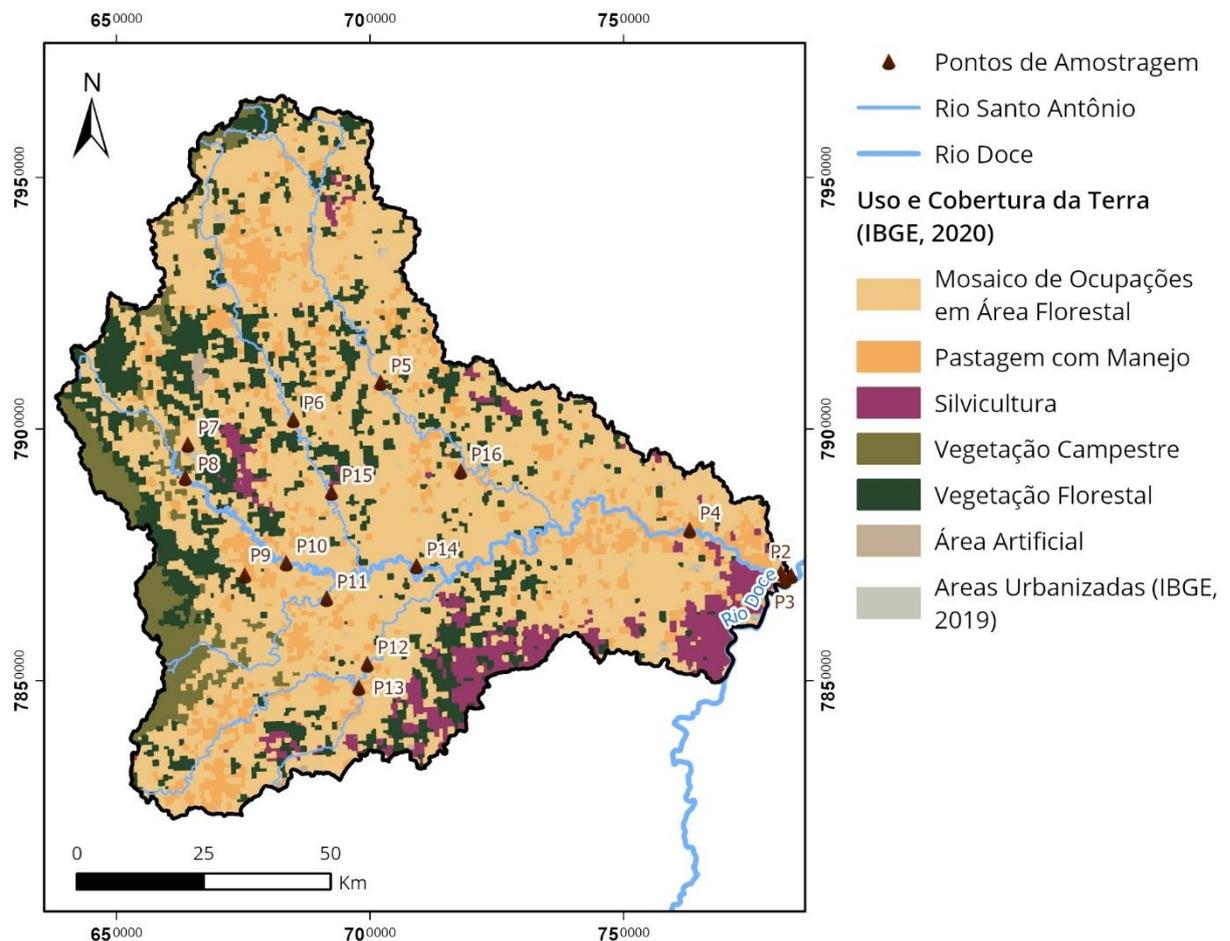


Figura 3.7 - Uso e Cobertura do solo na Bacia do Rio Santo Antônio. Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do IBGE (2019) e IBGE (2020).

3.3 CARACTERIZAÇÃO SÓCIO-ECONÔMICA

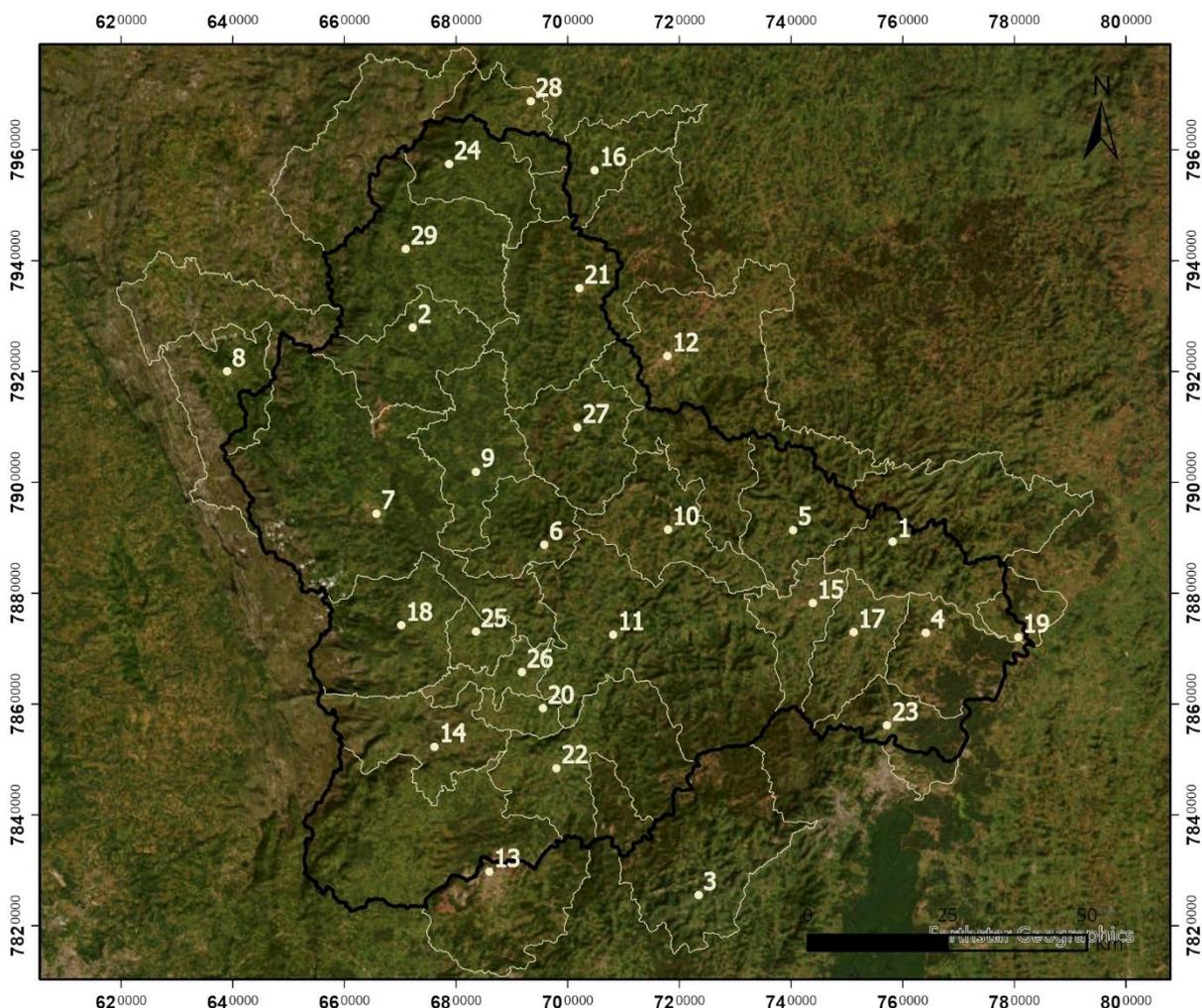
A Bacia do Rio Santo Antônio integra total ou parcialmente 29 municípios mineiros: Açucena, Alvorada de Minas, Antônio Dias, Belo Oriente, Braúnas, Carmésia, Conceição do Mato Dentro, Congonhas do Norte, Dom Joaquim, Dolores de Guanhanes, Ferros, Guanhanes, Itabira, Itambé do Mato Dentro, Joanésia, Materlândia, 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. O mapa da Figura 3.8 mostra a distribuição deles dentro da bacia.

A população total dos municípios integrantes da bacia foi estimada em cerca de 381000 pessoas segundo dados do IBGE de 2021. Considerando que apenas 17 municípios estão totalmente inseridos da Unidade de Planejamento, o PARH Santo Antônio (2010) contabilizou a população da bacia em torno de 182 mil pessoas (Tabela 3.3). Ainda conforme o PARH Santo Antônio (2010) aproximadamente 63% da população da bacia vive em zona urbana.

A Tabela 3.3 mostra alguns outros dados dos municípios inseridos na bacia. O IDHM variou de 0,557 a 0,756 e o PIB per capita alterou entre R\$ 8909,47 e R\$ 239.333,24.

O PARH Santo Antônio (2010) ressalta que na bacia qual predomina o setor de serviços, respondendo por 44% do PIB, seguido do setor industrial, que corresponde a 38%. A representatividade do PIB Industrial nesta Unidade de Planejamento está bastante relacionada à extração de minério de ferro pela Vale S. A. em Itabira e pela *Anglo-American* em Conceição do Mato Dentro, bem como pela produção de celulose pela CENIBRA em Belo Oriente. O mapa da Figura 3.9 mostra a localização das barragens pertencentes as duas mineradoras. Observa-se a proximidade da Vale com o Córrego Jiral que deságua no Rio Tanque e da Anglo American com a cabeceira do Rio Santo Antônio.

Observa-se que alguns dos maiores índices de IDHM e PIB per capita estão justamente nos municípios onde estão as companhias citadas. Na bacia, o índice de tratamento de esgotos é muito baixo, sendo coletado cerca 59,3% do esgoto produzido conforme dados apresentados pelo PARH Santo Antônio (2010).



Municípios da Bacia do Rio Santo Antônio

- 1. Açucena
- 2. Alvorada de Minas
- 3. Antônio Dias
- 4. Belo Oriente
- 5. Braúnas
- 6. Carmésia
- 7. Conceição do Mato Dentro
- 8. Congonhas do Norte
- 9. Dom Joaquim
- 10. Dolores de Guanhanes
- 11. Ferros
- 12. Guanhanes
- 13. Itabira
- 14. Itambé do Mato Dentro
- 15. Joanésia
- 16. Materlândia
- 17. Mesquita
- 18. Morro do Pilar
- 19. Naque
- 20. Passabém
- 21. Sabinópolis
- 22. Santa Maria de Itabira
- 23. Santana do Paraíso
- 24. Santo Antônio do Itambé
- 25. Santo Antônio do Rio Abaixo
- 26. São Sebastião do Rio Preto
- 27. Senhora do Porto
- 28. Serra Azul de Minas
- 29. Serro

Figura 3.8 - Municípios que compõe a bacia do Rio Santo Antônio. Fonte: Elaborado pela autora com base em dados do IBGE (2021).

Tabela 3.3 - Tabela dos municípios que integram a Bacia do Rio Santo Antônio com dados da população, IDHM e PIB per capita. Fonte: Elaborado pela autora com base em dados do IBGE.

Município	População residente dentro da bacia (PIRH 2010)	População total estimada (IBGE 2021)	IDHM (IBGE 2010)	PIB per capita (IBGE 2020)
Açucena	7367	9270	0,610	14.790,41
Alvorada de Minas	3482	3605	0,572	16937,26
Antônio Dias	747	9233	0,645	42.370,18
Belo Oriente	21369	27277	0,686	69.522,13
Braúnas	5208	4737	0,624	42.615,85
Carmésia	2550	2660	0,650	13.128,47
Conceição do Mato Dentro	14200	17438	0,634	239.333,24
Congonhas do Norte	507	5047	0,568	8.909,47
Dom Joaquim	4530	4436	0,622	11.956,53
Dores de Guanhães	5528	5139	0,636	35.985,28
Ferros	11387	9576	0,603	14.200,74
Guanhães	2035	34818	0,686	22.967,65
Itabira	6018	121717	0,756	56.164,20
Itambé do Mato Dentro	2434	2032	0,634	15.377,32
Joanésia	5628	4382	0,626	23.828,86
Materlândia	506	4415	0,597	12.213,89
Mesquita	6493	5489	0,656	9.356,97
Morro do Pilar	3474	3126	0,597	12.765,26
Naque	5629	7104	0,675	11.821,29
Passabém	1801	1619	0,642	13.382,83
Sabinópolis	13504	15364	0,638	13.189,94
Santa Maria de Itabira	10445	10867	0,648	17.404,04
Santana do Paraíso	22765	36048	0,685	21.964,52
Santo Antônio do Itambé	4517	3763	0,558	11.420,27
Santo Antônio do Rio Abaixo	1753	1756	0,669	15.871,23
São Sebastião do Rio Preto	1700	1478	0,632	15.725,92
Senhora do Porto	3517	3516	0,565	11.518,37
Serra Azul de Minas	781	4292	0,557	8.961,35
Serro	12517	20915	0,656	12.988,02

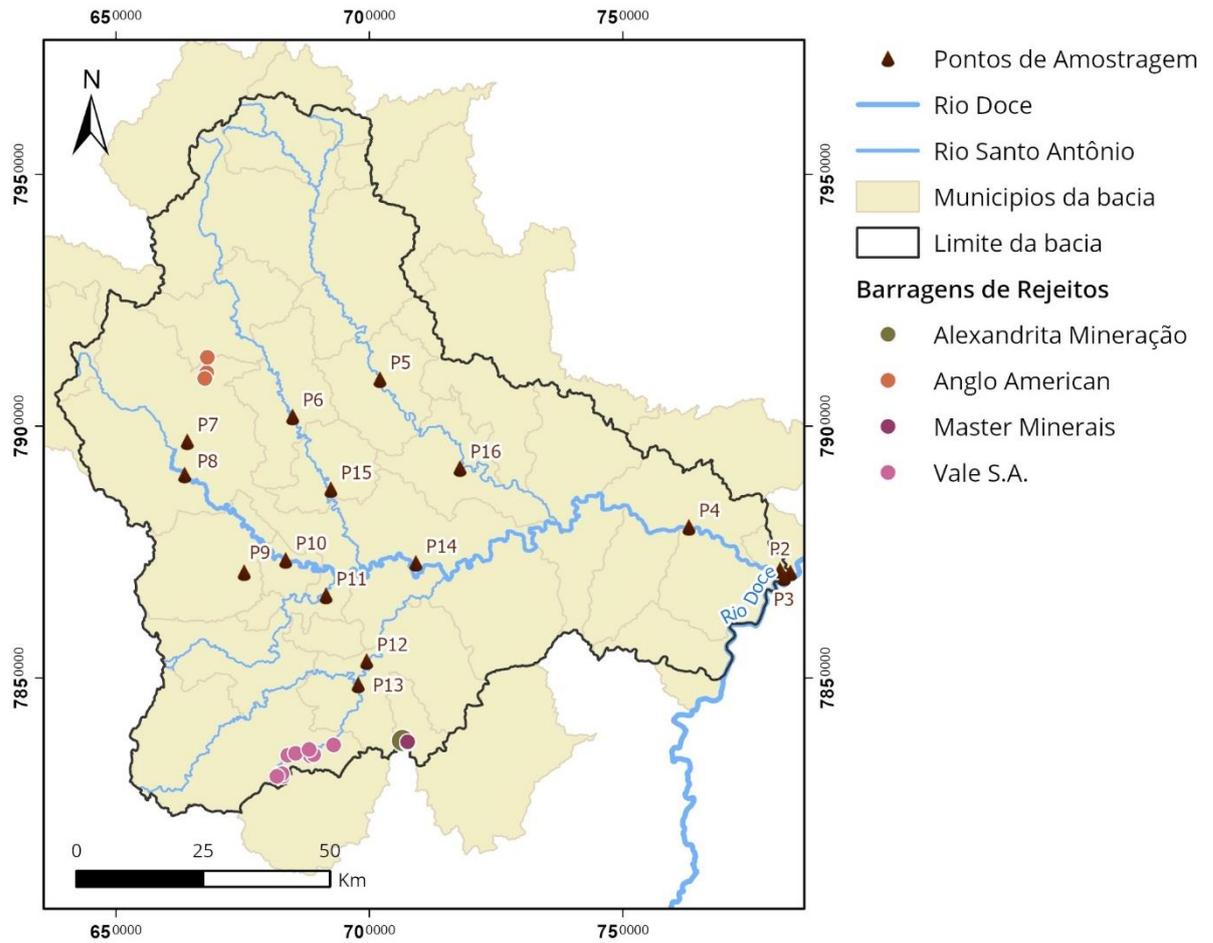


Figura 3.9 - Barragens de rejeitos de mineração nas proximidades da Bacia do Rio Santo Antônio. Fonte: Elaborado pela autora com base em dados da FEAM (2021) e disponibilizado pelo IDE-SISEMA (2021).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Os sedimentos podem ser considerados um dos mais importantes componentes de um ecossistema aquático pois além de serem fonte de recurso energético para a biota (Sednet 2003) eles também são uma ferramenta importante para determinar a distribuição dos contaminantes nesse ecossistema. Smith & Huck (1999), destacam a importância do estudo dos sedimentos, visto que reflete a dinâmica entre a água, solos e rochas de uma bacia além de serem necessários para determinar a influência das atividades humanas na mesma.

Sedimentos são diretamente afetados pela contaminação dos ambientes aquáticos, uma vez que possui grande capacidade de absorção/adsorção de metais pesados (Walling 2006). Segundo Costa (2001) sedimentos são mais susceptíveis a contaminação por metais do que a água pois têm uma maior capacidade de reter espécies químicas orgânicas e inorgânicas. De acordo com Förstner *et al.* (1995) cerca de 99% das substâncias que atingem um sistema aquático são estocadas no compartimento sedimentar. Lottermoser (2010) descreve que os metais são mais estáveis como solutos do que como íons dissolvidos na solução.

Os sedimentos contaminados podem causar inúmeros danos à saúde da população exposta. Logo, a análise completa dos sedimentos fluviais torna-se necessária para o entendimento dos processos geoquímicos que ocorrem em um ambiente aquático. No presente capítulo serão apresentados os resultados alcançados através da análise granulométrica, mineralógica e geoquímica realizadas com os sedimentos provenientes de 16 pontos ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio. Tais dados serão analisados em conjunto, comparados com os valores propostos na resolução CONAMA 454/2012 e será calculado o Fator de Enriquecimento a fim de se caracterizar os sedimentos da área de estudo e distinguir possíveis alterações antrópicas.

4.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica é um fator importante no estudo da distribuição de elementos nos sedimentos, uma vez que as concentrações dos metais reagem de maneira distinta em relação às diferentes granulometrias. Herut & Sandler (2006) associa a maior afinidade destes elementos pelas frações mais finas dos sedimentos devido a maior área superficial específica.

A distribuição granulométrica das amostras coletadas em 16 pontos da Bacia do Rio Santo Antônio está representada na Figura 4.1 e detalhada no quadro disposto no Apêndice 2.

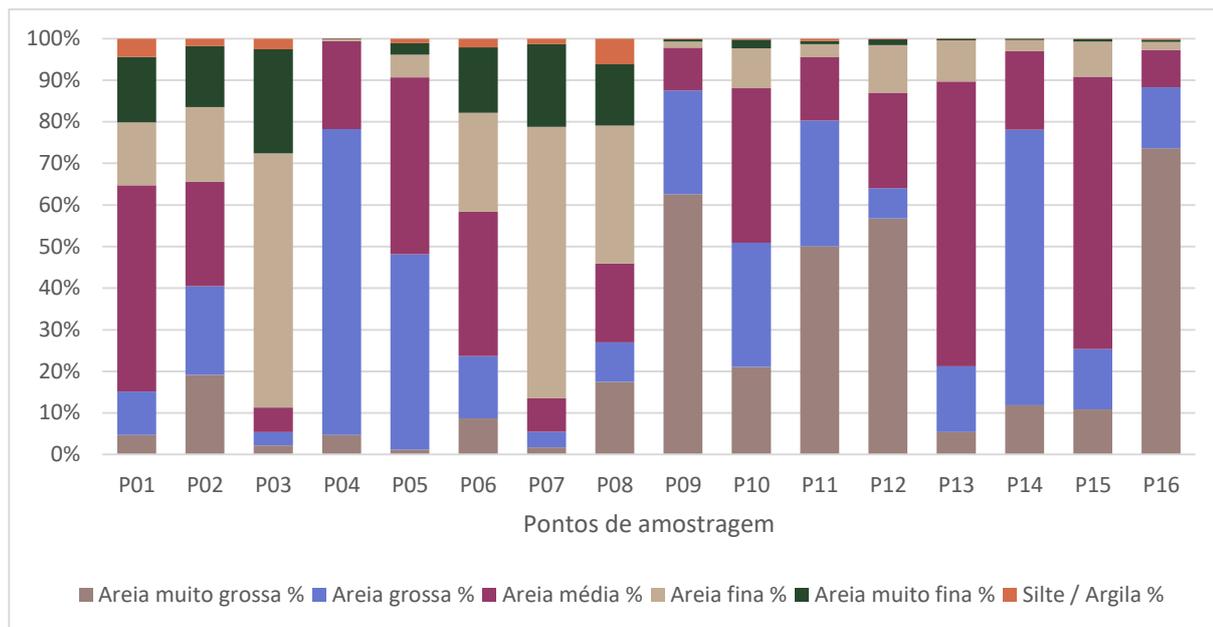


Figura 4.1 - Distribuição granulométrica dos sedimentos da Bacia do Rio Santo Antônio.

Observa-se que há predominância das frações mais grossas na grande maioria dos pontos amostrados. Pode se destacar também a maior ocorrência de sedimentos mais finos nos pontos P01, P02, P03, P06, P07 e P08, porém as frações areia fina e silte/argila não prevalecem em nenhuma das amostras. Considerando que as granulometrias silte e argila são os principais agentes naturais de transporte de metais em ambientes fluviais e a baixa predominância dessas frações nos pontos amostrados podemos considerar que a concentração de metais tóxicos nesses sedimentos é restrita.

4.2 ANÁLISE MINERALÓGICA

A composição mineralógica encontrada em cada um dos pontos amostrados ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio se encontra listada na Tabela 4.1. Os difratogramas referentes a cada amostra estão no Apêndice 3.

Foram identificados 11 diferentes minerais nas amostras coletadas: quartzo, caulinita, gibbsita, muscovita, hematita, sanidina, microclina, anfibólio, albita, anortoclásio e goethita.

Quartzo (SiO_2), caulinita ($\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$) e gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) foram encontrados em todas as amostras. O quartzo é um mineral muito resistente a alterações o que justifica sua vasta abundância na crosta terrestre. A caulinita e a gibbsita são neoformações provenientes do intemperismo químico de outros minerais ricos em alumínio, principalmente feldspatos.

Também se observa a ocorrência de feldspatos nas amostras analisadas tais como: microclina ($\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$), sanidina ($(\text{K},\text{Na})(\text{Al},\text{Si})_4\text{O}_8$) e anortoclásio ($(\text{Na},\text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$) além de plagioclásio como a

albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), que são minerais remanescentes das rochas originais. A predominância de rochas graníticas e gnáissicas na região corrobora com esse resultado.

A muscovita ($\text{KAl}_2[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}](\text{OH},\text{F})_2$) também foi observada na grande maioria das amostras. É um mineral muito resistente ao intemperismo e ao metamorfismo ocorrendo principalmente em rochas ácidas (granitos e pegmatitos) e xistos.

Hematita (Fe_2O_3) é um óxido de ferro muito comum, podendo ser produto do intemperismo da goethita. Está presente principalmente em rochas ígneas félsicas e formações ferríferas bandadas (BIFs) como as do Grupo Serra Negra.

Anfibólio ($\text{W}_{0-1}\text{X}_2\text{Y}_5\text{Z}_8\text{O}_{22}(\text{OH},\text{F})_2$) e goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) foram encontrados apenas em um ponto de amostragem. O anfibólio é um grupo mineral comum em rochas ígneas e metamórficas podendo estar associado a plagioclásios, feldspato potássico, quartzo, biotita ou muscovita (UNESP), como acontece no Ponto 4. A goethita, encontrada no ponto 6, é produto do intemperismo dos minerais ferruginosos como a siderita (FeCO_3), magnetita ((Fe_3O_4)) e pirita (FeS_2).

Tabela 4.1 - Composição mineralógica dos sedimentos da Bacia do Rio Santo Antônio.

Ponto de Amostragem	Análise Mineralógica
P01	quartzo, caulinita, gibbsita e hematita
P02	quartzo, caulinita, gibbsita, muscovita, hematita e sanidina
P03	quartzo, caulinita, gibbsita, muscovita, hematita e sanidina
P04	quartzo, caulinita, gibbsita, microclina, anortoclásio e anfibólio
P05	quartzo, caulinita, gibbsita e microclina
P06	quartzo, caulinita, gibbsita, muscovita e goethita
P07	quartzo, caulinita, gibbsita, muscovita e hematita
P08	quartzo, caulinita, gibbsita e muscovita
P09	quartzo, caulinita, gibbsita e muscovita
P10	quartzo, caulinita, gibbsita e muscovita
P11	quartzo, caulinita, gibbsita e sanidina
P12	quartzo, caulinita, gibbsita, muscovita, hematita, anortoclásio e albita
P13	quartzo, caulinita, gibbsita, muscovita, microclina e anfibólio
P14	quartzo, caulinita, gibbsita e muscovita
P15	quartzo, caulinita, gibbsita, muscovita e microclina
P16	quartzo, caulinita, gibbsita, muscovita e albita

4.3 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA

No presente trabalho, foram analisadas em ICP-OES, a fração granulométrica < 0,063mm, como já explicitado na metodologia. Os dados obtidos através da análise geoquímica dos sedimentos estão disponíveis no Apêndice 4.

4.3.1 Avaliação de possíveis anomalias

Para descobrir possíveis anomalias nos pontos estudados ao longo da bacia aplicou-se tratamento estatístico através de boxplots. Foram utilizados dados logtransformados a fim de se atenuar os efeitos de possíveis anomalias. Os diagramas da Figura 4.2 e Figura 4.3 mostram, respectivamente, a distribuição dos elementos maiores e menores da região estudada. Caso ocorram, os valores anômalos serão representados pelos outliers.

Observa-se que foram detectadas anomalias nos resultados das análises químicas de três elementos maiores: Mg, Na e P (Figura 4.2). Ocorrendo anomalia positiva em todos os três elementos citados e ocorrência de anomalia negativa apenas em P. Nenhum dos elementos traços avaliados apresentaram anomalias (Figura 4.3).

4.3.2 Fator de Enriquecimento (FE)

Optou-se em utilizar como background geoquímico as concentrações mínimas de cada elemento obtidas nas amostras de sedimento coletadas ao longo da bacia (Loska & Wiechula 2003) e o alumínio como elemento referência, dado que ele é um dos principais agentes de adsorção dos metais nos sedimentos, e possui baixa mobilidade na natureza.

Na Tabela 4.2 tem-se os resultados dos valores do FE para os pontos estudados no presente trabalho. Observa-se que o valor do $FE \leq 2$ representa contribuições geogênicas enquanto que $FE > 2$ representa influência antrópica.

Tabela 4.2 - Resultado do fator de enriquecimento para os metais nos sedimentos de fundo da Bacia do Rio Santo Antônio.

	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	Ti	Ba	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
Rio do Peixe	0,4	1,2	0,7	0,6	0,7	0,8	0,7	0,9	0,9	0,9	0,7	1,2	0,7	0,8	1,0
Rio Guanhães	0,5	0,8	0,6	0,6	0,6	0,7	0,9	0,8	0,7	1,1	1,1	1,0	0,8	0,6	1,0
Rio Preto do Itambé	0,9	0,7	0,6	0,9	0,6	0,7	0,6	0,8	0,8	0,9	0,7	2,7	0,8	0,6	0,6
Rio Tanque	1,9	2,0	1,1	1,4	2,2	1,5	1,5	1,1	1,0	1,0	1,3	3,1	1,0	1,0	1,6
Córrego Jirau	0,8	0,8	0,7	0,6	1,2	1,4	0,9	0,6	0,6	0,9	1,4	0,9	0,7	0,7	1,1
Rio Santo Antônio	0,9	0,8	2,4	2,2	2,3	0,8	1,5	0,8	1,3	0,8	0,8	0,8	1,2	1,3	1,4
Rio Doce	0,5	1,8	0,6	0,6	0,7	0,8	1,2	0,8	0,7	1,2	1,4	1,9	1,0	1,0	1,8

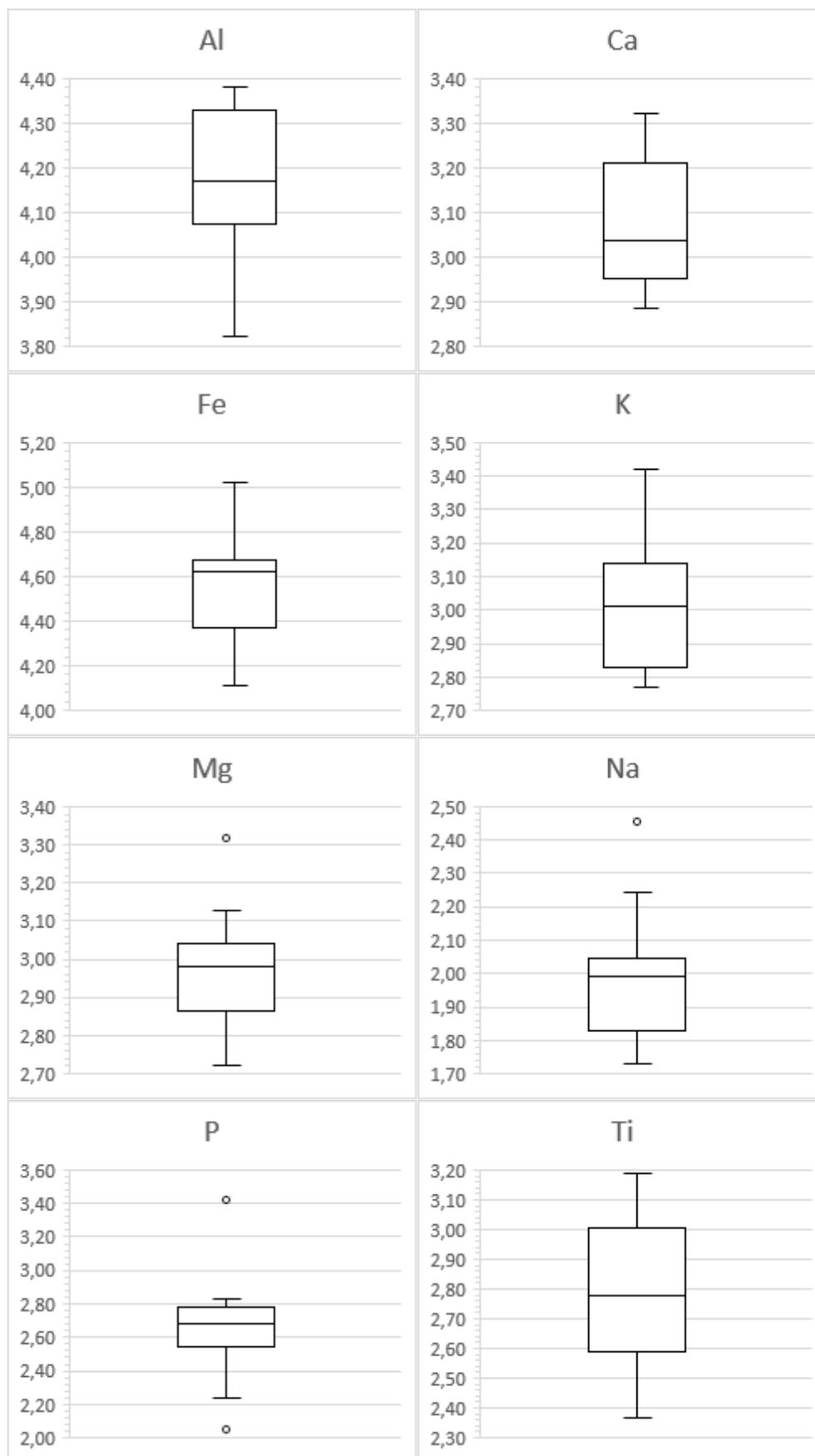


Figura 4.2 - Diagramas referente as análises químicas dos elementos metálicos maiores Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P e Ti presentes nos sedimentos da bacia do rio Santo Antônio.

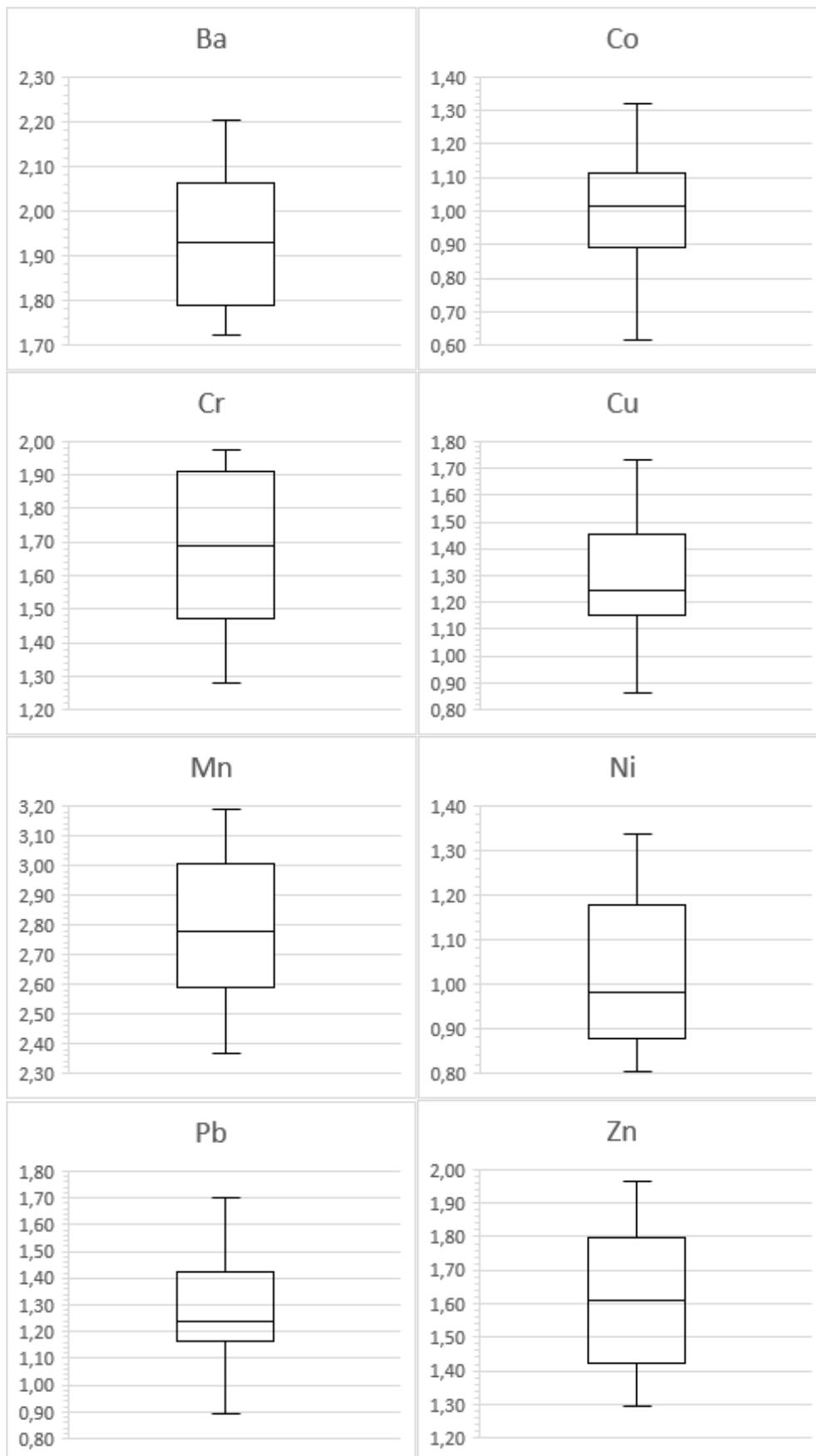


Figura 4.3 - Diagramas referente as análises químicas dos elementos metálicos traços Ba, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V e Zn presentes nos sedimentos da bacia do rio Santo Antônio.

Observa-se que foi encontrado valores maiores que 2,0 para o fator de enriquecimento em cinco elementos. Ocorre enriquecimento moderado de K, Mg e Na no Rio Santo Antônio; Fe, Na e Mn no Rio Tanque e Mn no Rio Preto do Itambé.

4.3.3 Avaliação dos elementos nos sedimentos

4.3.3.1 Alumínio

Com cerca de 8% em massa o alumínio é o terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre (Duarte 2019), sendo encontrado na composição química de argilominerais, micas e feldspatos e em maior concentração na gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), diásporo ($\text{AlO}(\text{OH})$), boehmita ($\text{AlO}(\text{OH})$), silimanita (Al_2SiO_5), Cianita (Al_2SiO_5) e andaluzita (Al_2SiO_5) (Reimann & Caritat 1998). É um elemento litófilo e possui baixa solubilidade no processo de intemperismo resistindo a lixiviação, acidificando o solo e formando solos residuais como laterita e bauxita (Costa 2001).

No diagrama da Figura 4.4 tem-se variação de concentração de Al ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio. Observa-se que os valores variam entre 6669,25 mg/kg e 23962,42 mg/kg. O alto teor de alumínio em praticamente todos os pontos amostrados pode ser relacionado à litologia local, formada principalmente por gnaisses e granitos, em especial o álcali-feldspato granito e o ortognaisse granítico alcalino da Suíte Borrachudos. A mineralogia encontrada pelo DRX composta por gibbsita e feldspatos também corrobora com os altos valores.

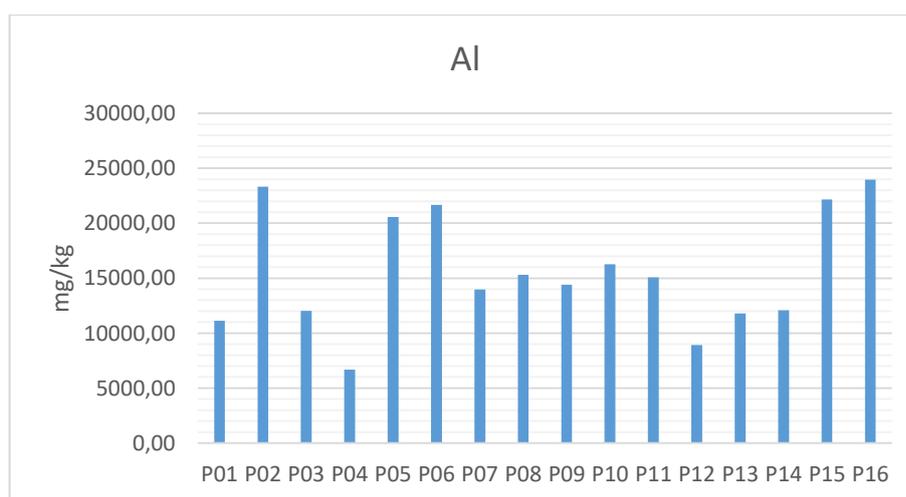


Figura 4.4 - Diagrama da variação de concentração de Al ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

4.3.3.2 Cálcio (Ca)

O cálcio é um elemento litófilo pertencente à família dos metais alcalinos terrosos. É o quinto elemento mais abundante da Terra ocupando cerca de 4% da crosta terrestre (Duarte 2019). É encontrado na natureza principalmente na forma dos minerais de calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e fluorita (CaF_2) (Reimann & Caritat 1998) que podem formar rochas como: calcários, mármore e carbonatitos. Em rochas ígneas pode ser encontrado em plagioclásios, anfibólios e piroxênios ($(\text{Mg,Fe})_2(\text{SiO}_4)$).

O cálcio assim como o potássio, o magnésio e o sódio são elementos que possuem alta solubilidade e capacidade de lixiviação. Em climas tropicais, como o brasileiro, o intemperismo nas rochas promove a liberação desses elementos para o ambiente em forma de solução e partículas de argilominerais (Costa 2001).

A concentração de Ca na região é bastante elevada nos sedimentos de toda a bacia, sendo 768,31 mg/kg o valor mínimo e 2105,32 mg/kg o valor máximo (Figura 4.5). Pode-se dizer que os teores encontrados de Ca estão em conformidade com a presença de litologias com grande expressividade de cálcio, tais como: granitos, gnaisses e TTGs típicos do Complexo Basal Arqueano e Quartzo Monzonito da Suíte Borrachudos. O Ca é um dos elementos mais comuns na crosta terrestre, onde ocorre principalmente nos plagioclásios, ou seja, nas rochas citadas

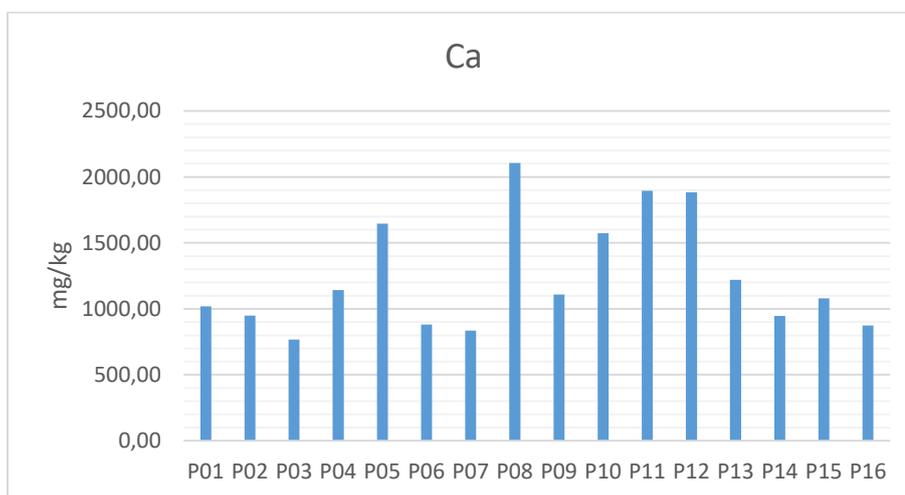


Figura 4.5 - Diagrama da variação de concentração de Ca ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

4.3.3.3 Potássio (K)

O Potássio é um elemento litófilo pertencente à família dos metais alcalinos. É o sétimo elemento mais abundante da crosta terrestre, ocupando 2,5% em massa (Duarte 2019). Está presente

em numerosos minerais, tais como: a sylvita (KCl), carnalita ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), cainita ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{KCl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e ocorrendo mais abundantemente em feldspatos e micas (Reimann & Caritat 1998).

A concentração de K na região estudada é elevada e varia entre 589,89 mg/kg e 2620,41 mg/kg ao longo da bacia (Figura 4.6). Ela pode ser considerada natural dada a presença de minerais como muscovita e microclina em muitos pontos de amostragem.

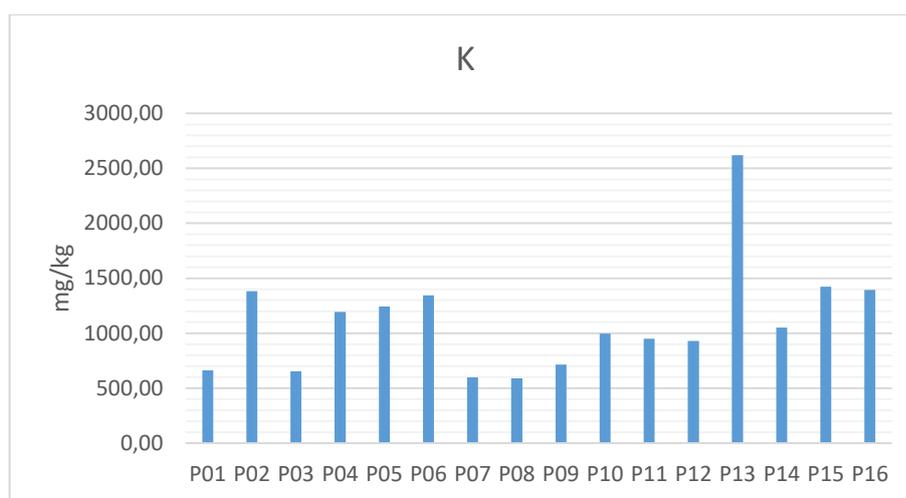


Figura 4.6 - Diagrama da variação de concentração de K ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

4.3.3.4 Magnésio (Mg)

O magnésio é o oitavo elemento mais abundante na crosta terrestre, constituindo cerca de 2% da mesma (Duarte 2019). É um elemento litófilo que pertence à família dos metais alcalinos terrosos. De acordo com Reimann & Caritat (1998) pode ser encontrado na natureza na forma de óxidos, hidróxidos, silicatos, carbonatos, sulfatos e fosfatos. É encontrado principalmente em olivinas ($\text{Mg,Fe}_2(\text{SiO}_4)$) e piroxênios, ocorrem sobretudo em rochas básicas. Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), magnesita (MgCO_3), brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), periclásio (MgO), carnalita ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e forsterita (Mg_2SiO_4) são os principais minerais comerciais de magnésio

Conforme o diagrama da Figura 4.7 a concentração de Mg ao longo da bacia altera entre 529,04 mg/kg à 2082,61 mg/kg. Os pontos de maior teor ocorrem associados ao Grupo Serra Negra, possivelmente devido as rochas metaultramáficas e as formações ferríferas bandadas, uma vez que as rochas metaultramáficas contêm altos teores de talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) e clorita ($(\text{Mg,Al,Fe})_{12}[(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_{16}$)

É perceptível um padrão de ocorrência similar de K e Mg na região, podendo indicar uma relação mineralógica e litológica entre os eles. Observa-se no diagrama da Figura 4.8 uma correlação positiva entre os elementos potássio e magnésio nas amostras coletadas. Os maiores teores de ambos elementos ocorrem nos pontos P02 (Rio Santo Antônio), P06 (Rio do Peixe), P13 (Rio Jirau) e P15(Rio do Peixe). Analisando a mineralogia de tais pontos é possível notar a recorrência de quartzo, caulinita, gibbsita e muscovita em todos eles. Esta é uma associação mineral típica de granitos e gnaisses intemperizados, o que corrobora com a origem geogênica de K e Mg nos sedimentos da bacia, possivelmente provenientes dos granitos e gnaisses da Suíte Borrachudos, do Complexo Guanhães e Grupo Serra Negra que são as unidades predominantes na região.

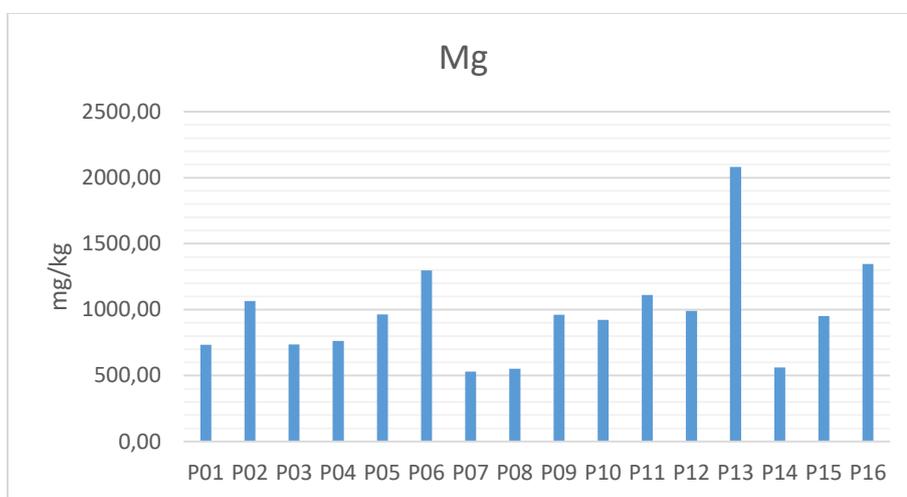


Figura 4.7 - Diagrama da variação de concentração de Mg ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

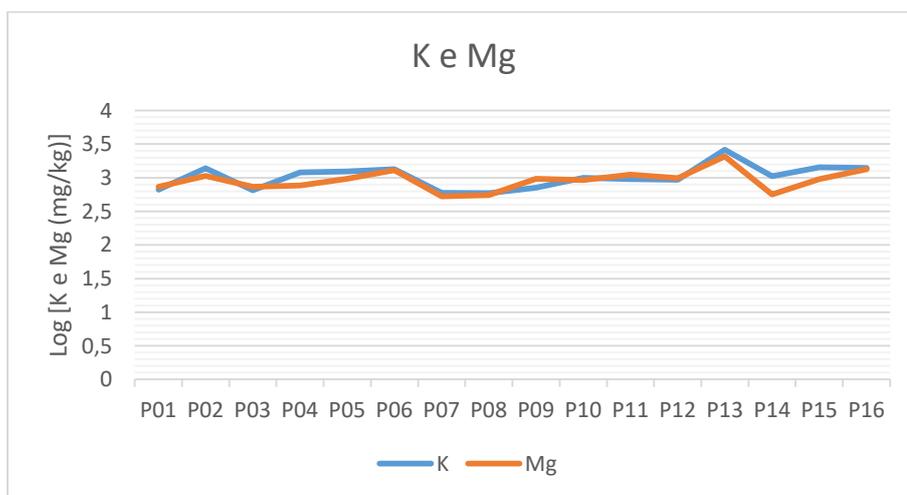


Figura 4.8 - Diagrama de correlação das concentrações de K e Mg nos sedimentos ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

4.3.3.5 Sódio (Na)

O sódio é um elemento litófilo classificado como metal alcalino. É o sexto elemento mais abundante na crosta constituindo cerca de 2,6% dela (Duarte 2019). Devido a sua reatividade não ocorre na sua forma elementar, é encontrado na natureza apenas em compostos (Na^+). Ocorre principalmente na albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), halita (NaCl), criolita (Na_3AlF_6) e outros minerais formadores de rocha, tais como: plagioclásio, mica, anfibólio e piroxênio Reimann & Caritat (1998).

Verifica-se no diagrama da Figura 4.9 que a concentração de Na na bacia é baixa e varia entre 53,53 mg/kg e 285,75 mg/kg. Os baixos teores de Na na região podem ser explicados devido a sua alta capacidade de solubilização. A maior concentração nos pontos P04 e P12 pode ser justificada pela ocorrência dos minerais anortoclásio ($(\text{Na,K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$) e albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) respectivamente.

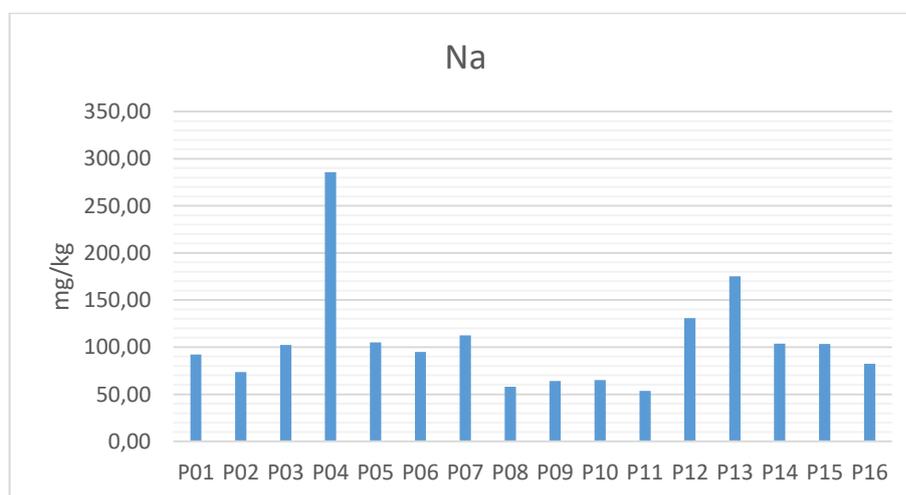


Figura 4.9 - Diagrama da variação de concentração de Na ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

4.3.3.6 Ferro (Fe)

Ferro é um elemento siderófilo classificado como metal de transição. É o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre, constituindo aproximadamente 5% da mesma (Duarte 2019). Tem baixa mobilidade e de acordo com Costa (2001) os hidróxidos de ferro junto ao manganês controlam a distribuição de metais pesados no ambiente aquático uma vez que, eles possuem grande capacidade de adsorção e complexação. Hematita, magnetita, goethita, siderita e pirita são os minerais típicos de Fe mas também pode ser encontrado em olivinas, piroxênios, anfibólios, micas, e granadas ($(\text{Mg,Fe,Mn,Ca})_3(\text{Al,Cr,Fe})_2(\text{SiO}_4)_3$) (Reimann & Caritat 1998).

De acordo com o diagrama da Figura 4.10 a concentração de ferro na bacia é alta e varia entre 12887,73 mg/kg e 105063,07 mg/kg. Observa-se que os maiores teores de ferro ocorrem nos pontos

P01 (Rio Doce), P03 (Rio Doce) e P15 (Rio do Peixe). A maior concentração de ferro nos pontos P01 e P03 possivelmente ocorre devido ao acúmulo de sedimentos provenientes do rompimento da Barragem do Fundão em novembro de 2015. O ponto 15 está localizado dentro do Grupo Serra Negra onde há ocorrência de formações ferríferas bandadas, o que pode explicar o alto teor de ferro na amostra.

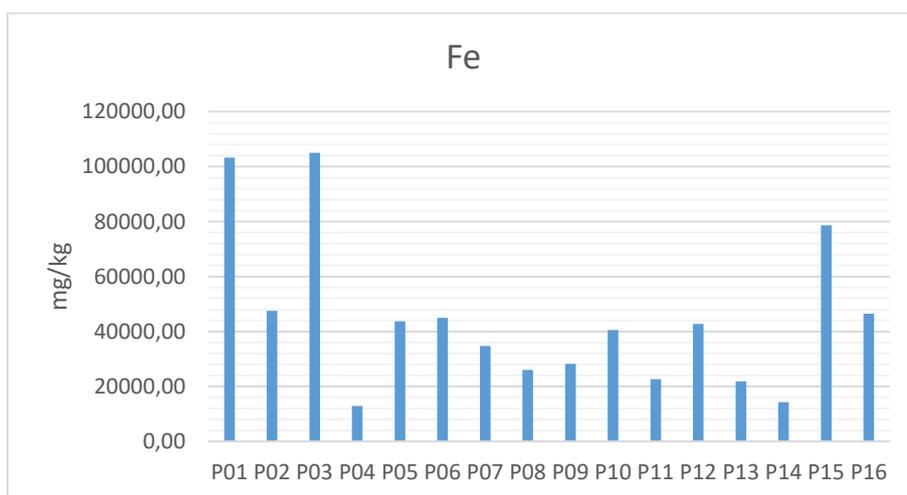


Figura 4.10 - Diagrama da variação de concentração de Fe ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

4.3.3.7 Fósforo (P)

O fósforo é um ametal litófilo e o décimo primeiro elemento mais abundante na crosta. Tem baixa mobilidade nos mais diversos ambientes, porém quando está na forma de íon fosfato apresenta mobilidade elevada (Reimann & Caritat 1998). É encontrado na natureza na forma de fosfatos e principalmente na fosforita. Também presente, em minerais como apatita $Ca_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$, monazita $((Ce,La,Th, Nd,Sm)PO_4)$ e xenótimo (YPO_4) , olivina, granada, piroxênio, anfibólio, micas e feldspatos (Reimann & Caritat 1998).

O fósforo também é importante no mundo orgânico pois é um elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento de plantas e animais. Está presente sobretudo na formação de ossos e dentes, onde está intimamente combinado com o cálcio na forma de hidroxiapatita (Ruttenberg 2003). Compõe também o guano, um substrato natural, de origem animal e proveniente dos excrementos de aves marinhas, morcegos e focas.

No diagrama da Figura 4.11 observa-se que o teor de fósforo é praticamente constante na região, variando ao redor de 500 mg/kg. As únicas duas exceções são os os pontos P04 (111,28 mg/kg) e P07 (2639,85 mg/kg), ambos localizados ao longo do Rio Santo Antônio. O P07, ponto onde foi

encontrada a maior concentração, está localizado dentro da zona urbana de Conceição do Mato Dentro. Observou-se a ocorrência de despejo de esgoto e residência nas proximidades do ponto onde ocorreu a amostragem. Os fatores antropogênicos descritos podem explicar a anomalia, uma vez que a ocorrência de fósforo pode ser associada ao despejo de detergentes e matéria fecal nas descargas de efluentes domésticos.

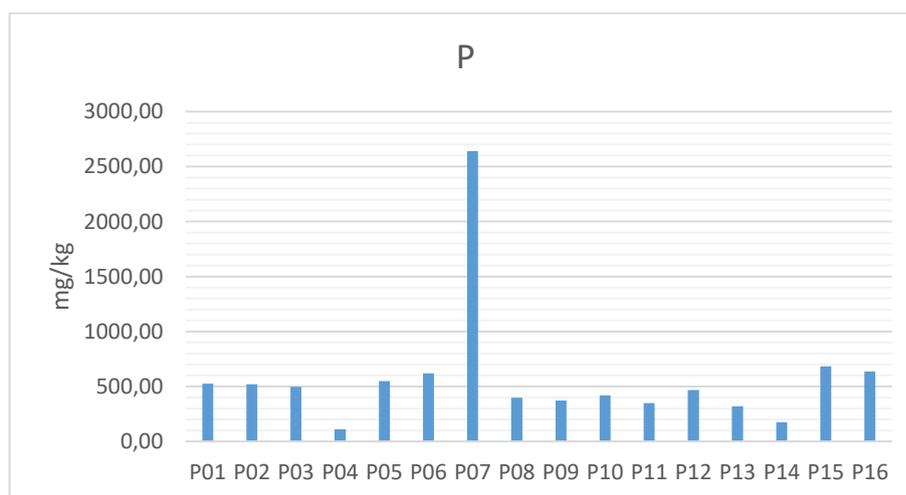


Figura 4.11 - Diagrama da variação de concentração de P ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

4.3.3.8 Titânio (Ti)

O Titânio é um metal de transição classificado como litófilo. É o nono elemento mais abundante na crosta terrestre, ocorrendo na natureza na forma de combinações químicas (Duarte 2019). Ilmenita (FeTiO_3), rutilo (TiO_2) e titanita (CaTiSO_5) são suas principais fontes minerais. Também pode ser encontrado em menor teor em piroxênios, anfibólios, micas e granadas. Normalmente é encontrado em depósitos primários associado ao Fe e possui baixa capacidade de mobilidade em condições oxidantes, redutoras, ácidas e neutras a alcalinas (Reimann & Caritat 1998).

No diagrama da Figura 4.12 observa-se que o teor de titânio varia entre 197,85 mg/kg e 1269,66 mg/kg. As maiores concentrações de Ti ocorre nos pontos P02 (Rio Santo Antônio), P05 (Rio Guanhães) e P15 (Rio do Peixe). O teor de titânio na bacia pode ser relacionado a litologia local, principalmente granitos e gnaisses da Suíte Borrachudos e do Grupo Guanhães. O titânio ocorre em tais rochas graníticas principalmente na forma dos minerais titanita (CaTiSiO_5) e rutilo (TiO_2). Elevados teores de Ti foram observados em formações ferríferas bandadas (Dardenne & Schobbenhau 2003).

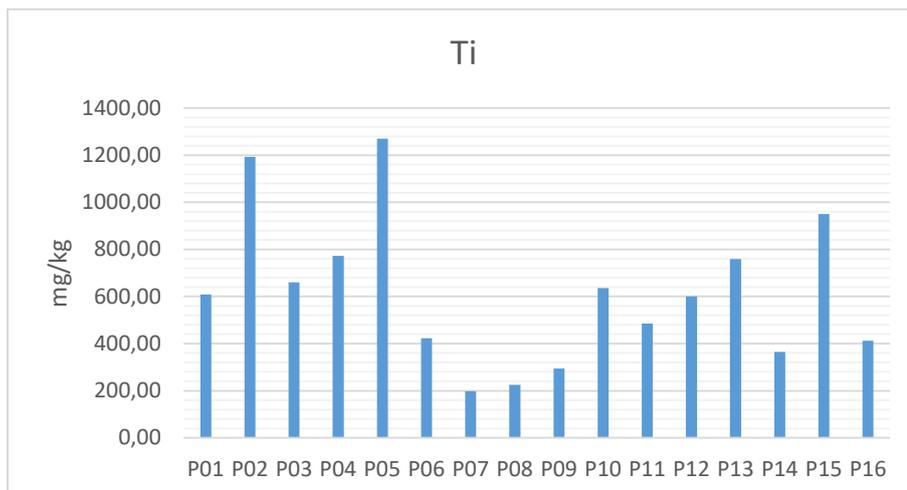


Figura 4.12 - Diagrama da variação de concentração de Ti ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

4.3.3.9 Arsênio (As)

O arsênio é um semimetal classificado como calcófilo amplamente distribuído na crosta terrestre. É encontrado principalmente na forma de sulfetos ou como uma substituição isomorfa para outros elementos em rede cristalina. Os principais minerais incluem: arsenopirita. (FeSAs), realgar (AsS), arsenita (As₂O₃). Pode ser encontrado em menor concentração em feldspatos, magnetita, ilmenita, pirita, galena, esfarelita e apatita (Reimann & Caritat 1998).

O arsênio é liberado na natureza tanto pelo intemperismo de rochas quanto por ação antrópica, em especial efluentes industriais e resíduos de mineração (CETESB). Possui baixa mobilidade quando no solo e associado com óxidos de Fe, Al e Mn (Costa 2001).

Na região estudada encontrou-se arsênio em apenas dois pontos: P01 (Rio Doce) e P03 (Rio Doce), que apresentaram concentrações de 12,86 mg/kg e 34,69 mg/kg respectivamente (Figura 4.13).

Comparando com a regulamentação CONAMA 454/2012 o ponto P01 está entre o nível 1 (5,9 mg/kg) e o nível 2 (17 mg/kg), apresentando uma baixa probabilidade de efeitos à biota. Já o ponto P03 está acima do nível, o qual prevê um provável dano ao ecossistema. Considerando que ambos pontos estão localizados no Rio Doce, tal concentração ocorre muito possivelmente devido a contaminação dos sedimentos pelo rejeito de minério de ferro provenientes do rompimento da Barragem do Fundão.

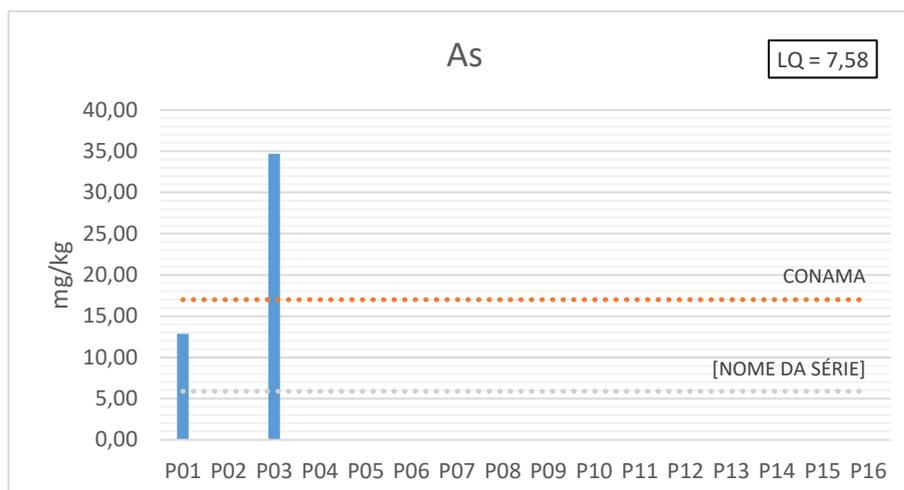


Figura 4.13 - Diagrama da variação de concentração de As ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

4.3.3.10 Bário (Ba)

O bário é um elemento litófilo pertencente à família dos alcalinos terrosos. É encontrado na natureza apenas na forma combinada, sendo a barita (BaSO_4) a principal. É encontrada em depósitos hidrotermais e rochas sedimentares ocorrendo sobretudo com argilas e óxi-hidróxidos de Fe-Mn (Costa 2001). O bário também pode estar presente em feldspatos e micas, muitas vezes substituindo o Ca (Reimann & Caritat 1998).

O bário não é um elemento essencial ao ser humano e contaminação antropogênica pode ocorrer a partir da mineração, indústria e queima de combustíveis fósseis (CETESB). É tóxico quando está no composto de carbonato de bário, usado como veneno para ratos.

Observa-se no diagrama da Figura 4.14 que a concentração de Ba na região estudada varia entre 52,80 mg/kg e 159,23 mg/kg. Dada concentração se deve a lixiviação das rochas da região tais como: granitos da Suíte Borrachudos e gnaisses do Complexo Basal. Nelas ocorrem grandes quantidades de feldspatos, que são um grande grupo de silicatos muito comuns na crosta. Considerando a composição química geral $(\text{Ba,Ca,Na,K,NH}_4,\text{Sr})(\text{Al,Fe}^{3+},\text{B,Si})_4\text{O}_8$, os elementos dados entre parênteses podem substituir uns aos outros (substituição isomórfica),

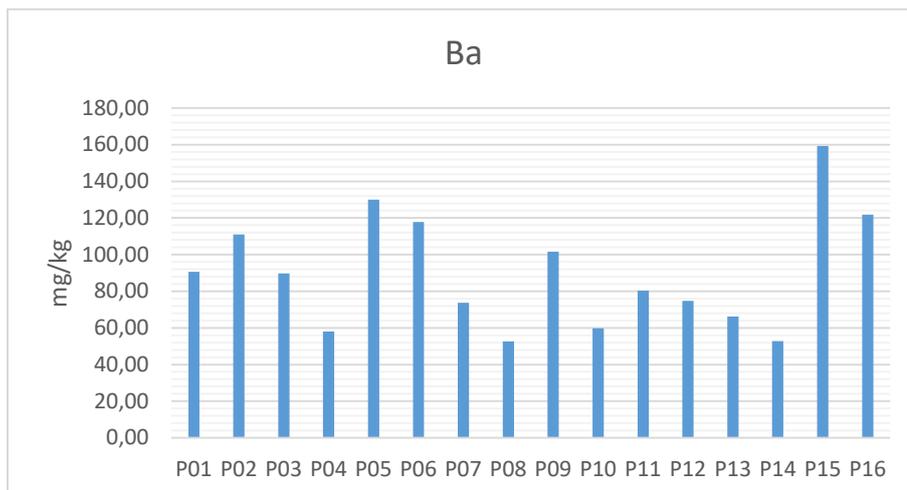


Figura 4.14 - Diagrama da variação de concentração de Ba ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

4.3.3.11 Cádmio (Cd)

O Cádmio é um metal de transição calcófilo altamente tóxico. Apresenta grande afinidade com S e Zn (Costa 2001) e pode ser encontrado na natureza na forma de sulfeto de cádmio (CdS - greenockita) e carbonato de cádmio (CdCO₃). Minerais de cádmio são raros, normalmente é substituído pelo zinco devido à semelhança química na maioria de seus minérios, tal como na esfarelita (ZnS). O cádmio é geralmente obtido como subproduto da obtenção do zinco. Apresenta média mobilidade em ambientes oxidantes e ácidos e baixa mobilidade em ambientes redutores (Reimann & Caritat 1998). As principais fontes antropogênicas de Cd incluem as atividades de mineração, resíduos industriais, cimento e fertilizantes fosfatados (CETESB).

Conforme se verifica no diagrama da Figura 4.15, foi detectado cádmio em apenas quatro pontos ao longo da bacia: P11 (Rio Preto do Itambé), P13 (Rio Jirau), P14(Rio Santo Antônio) e P16 (Rio Guanhões). Comparando-se com a regulamentação CONAMA 454/2012, o ponto P11 está acima do nível 1 e os demais pontos ultrapassam o nível 2. Observa-se também que nos três pontos de maiores concentrações as amostras foram coletadas em zonas urbanas sugerindo contaminação antropogênica, possivelmente por disposição industrial.

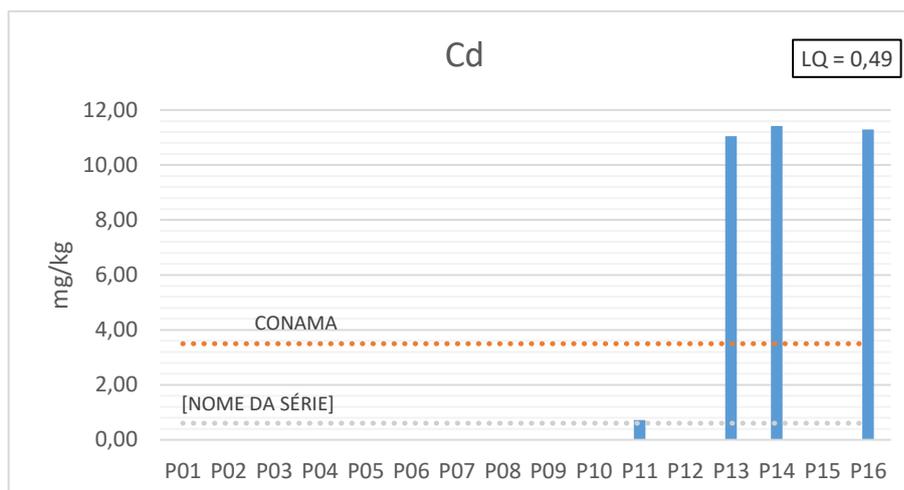


Figura 4.15 - Diagrama da variação de concentração de Cd ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

4.3.3.12 Cobalto (Co)

O cobalto é um elemento siderófilo relativamente raro e de fácil solubilidade ao intemperismo, possuindo comportamento químico bastante semelhante ao níquel. Costa (2001) afirma que o cobalto é um elemento traço presente em rochas máficas e ultramáficas correlacionado com o Fe-Mg. É encontrado principalmente na forma de minerais como a esmaltita (CoAs_2), cobaltita (CoAsS), linneíta (Co_3S_4) e eritrita ($\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) e em menor teor em olivinas, piroxênios, anfibólios, micas, granadas, pirita e esfarelita (Reimann & Caritat 1998). Apresenta baixa mobilidade e forte adsorção, em especial em solos ácidos (CETESB).

No diagrama da Figura 4.16 observa-se que a concentração do Co variou de 4,14 mg/kg a 20,90 mg/kg ao longo da bacia. Os maiores teores foram encontrados em amostras do Rio do Peixe e do Rio Guanhães e relacionados ao Grupo Serra Negra devido as rochas ultramáficas.

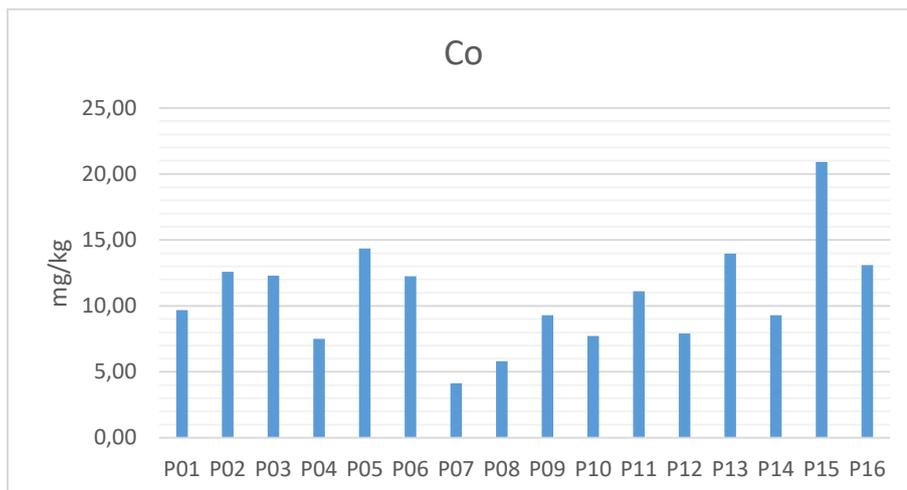


Figura 4.16 - Diagrama da variação de concentração de Co ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

4.3.3.13 Cobre (Cu)

O cobre é um metal de transição calcófilo abundante na crosta terrestre e encontrado principalmente na forma de sulfetos, arsenitos, cloretos e carbonatos e em maiores concentrações especialmente em rochas básicas (CETESB). O cobre tem alta solubilidade como sulfato de cobre sendo adsorvido por óxido-hidróxidos de Fe-Mn (Costa 2001). Ocorre como constituinte importante em vários minerais tais como calcopirita (CuFeS_2), bornita (Cu_5FeS_4), calcosita (Cu_2S) e malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$) e mais abundantemente em micas, anfibólio, piroxênios e magnetita (Reimann & Caritat 1998).

Na região estudada, a concentração de cobre variou entre 7,24 mg/kg e 53,93 mg/kg (Figura 4.17). As amostras provenientes do P02 (Rio Santo Antônio), P04 (Rio Santo Antônio) e P05 (Rio Guanhões) ultrapassaram o nível 1 da CONAMA 454/2012, apresentando uma baixa probabilidade de efeitos à biota. Assim como o cobalto, pode se associar a concentração de cobre na bacia ao as formações ferríferas bandadas e as rochas ultramáficas do Grupo Serra Negra.

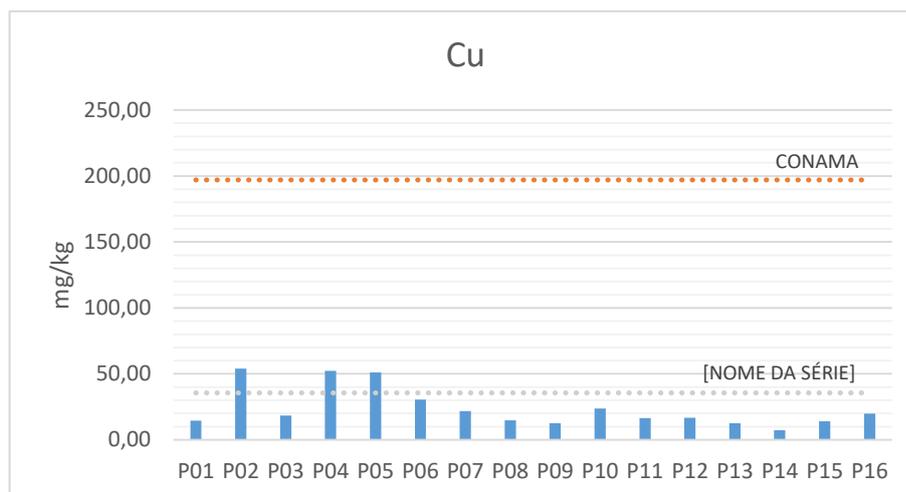


Figura 4.17 - Diagrama da variação de concentração de Cu ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

4.3.3.14 Cromo (Cr)

O cromo é um metal de transição litófilo abundante na natureza estando presente em todos os tipos de rocha. Assim como o cobalto, é encontrado com mais abundância em rochas máficas e ultramáficas (Costa 2001). Cromita (FeCr_2O_4) e crocoita (PbCrO_4) são minerais típicos de cromo, mas também pode ser detectado em minerais como micas, piroxênio, anfibólio, espinélio (MgAl_2O_4) e granada (Reimann & Caritat 1998).

A maior liberação de cromo para o ambiente ocorre a partir de fonte antropogênica, principalmente emissões industriais e de mineração (CETESB). O cromo é normalmente encontrado em dois estados de oxidação Cr (III) e Cr (VI). A especiação do cromo é de fundamental importância dado que o cromo (VI) apresenta efeitos tóxicos e propriedades carcinogênicas enquanto que o cromo (III) é essencial para manutenção do metabolismo da glicose, lipídeos e proteínas.

Observa-se no diagrama da Figura 4.18 que a concentração de Cr ao longo da bacia varia entre 19,09 mg/kg e 94,53 mg/kg. Comparando com a regulamentação CONAMA 454/2012 os pontos P02 (Rio Santo Antônio), P05 (Rio Guanhões), P06 (Rio do Peixe), P07 (Rio Santo Antônio), P08 (Rio Santo Antônio), P09 (Rio Preto do Itambé), P10 (Rio Santo Antônio) e P15 (Rio do Peixe) estão entre o nível 1 e o nível 2, apresentando uma baixa probabilidade de efeitos à biota. Já os pontos P01 (Rio Doce), P03 (Rio Doce) e P16 (Rio Guanhões) estão acima do nível 2, o qual prevê um provável dano ao ecossistema. Uma vez que, P01 e P03 estão localizados no Rio Doce é possível associar as altas concentrações a contaminação dos sedimentos pelo rejeito de minério de ferro provenientes do rompimento da Barragem do Fundão. E dado que o P16 está dentro zona urbana de Dores de Guanhões o alto teor na amostragem pode ocorrer devido alguma disposição industrial.

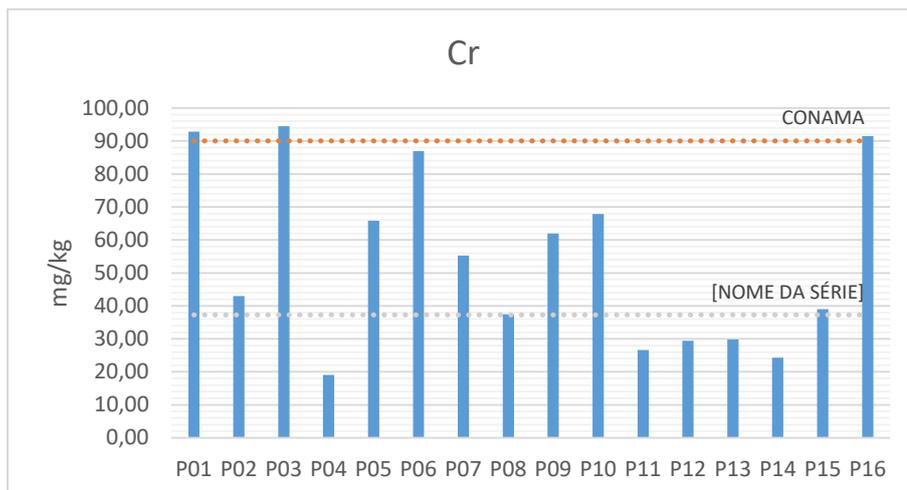


Figura 4.18 - Diagrama da variação de concentração de Cr ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

4.3.3.15 Chumbo (Pb)

O chumbo é um elemento calcófilo da família do carbono. Ocorre em pequenas quantidades na natureza, e normalmente associado a minérios de Zn (CETESB). Forma complexos estáveis em matéria orgânica, óxidos e minerais de argila, além disso tem grande tendência em se acumular em solos e sedimentos (WeelepohI 2012). Os principais minerais de chumbo são a anglesita (PbSO₄), galena (PbS) e a cerussita (PbCO₃) e também ocorre de forma mais abundante em feldspatos, plagioclásios, micas, zircão (ZrSiO₄) e magnetita (Reimann & Caritat 1998).

Os valores de chumbo variaram entre 7,83 mg/kg e 49,87 mg/kg ao longo da bacia (Figura 4.19). Em relação a CONAMA 454/2012, os pontos P02 (Rio Santo Antônio), P05 (Rio Guanhães) e P15 (Rio do Peixe) estão acima do Nível 1.

Observa-se nos diagramas da Figura 4.20 uma correlação positiva entre os elementos chumbo e titânio nas amostras coletadas na região de estudo. Em P02, P05, P13 e P15 ocorrem as maiores concentrações de Pb e Ti sugerindo uma influência dos granitos e gnaisses da Suíte Borrachudos.

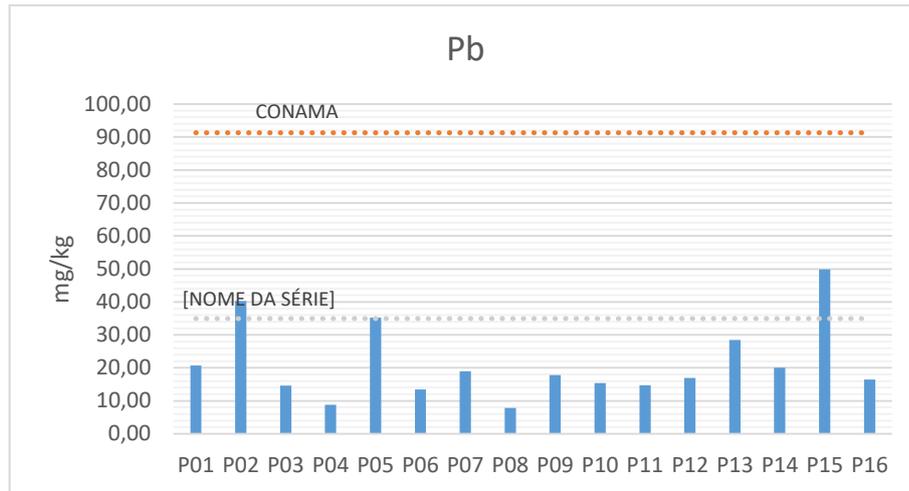


Figura 4.19 - Diagrama da variação de concentração de Pb ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

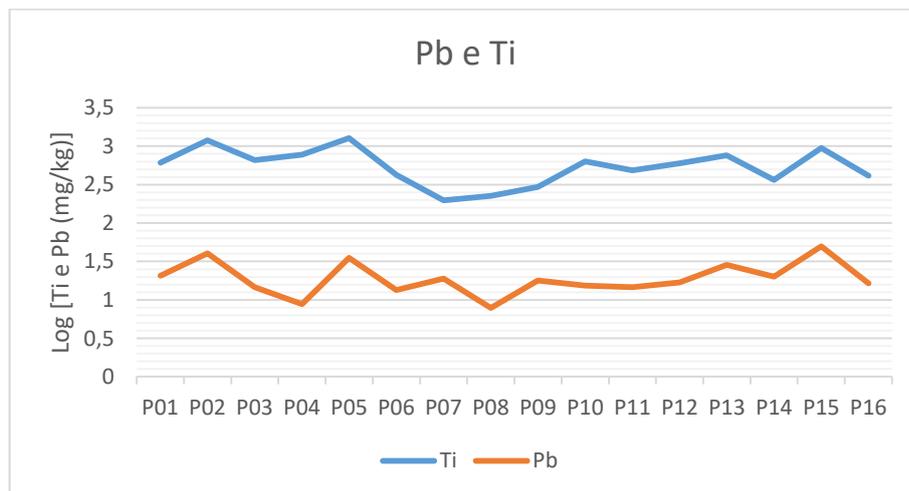


Figura 4.20 - Diagrama de correlação das concentrações de Ti e Pb nos sedimentos ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

4.3.3.16 Manganês (Mn)

O manganês é um elemento siderófilo que possui propriedades químicas bastante semelhantes ao ferro. Juntos em ambientes aquáticos podem formar hidróxidos e serem carreadores de metais (Costa, 2001). De acordo com Carvalho (1995) os elementos Ni, Co, Cu, Zn, Ba, Li, K e Pb estão correlacionados com teores mais elevados em formações manganêsíferas e ferromanganêsíferas em relação a outras formações ferríferas.

Pirolusita (MnO_2), manganita ($MnO(OH)$) e rodocrosita ($MnCO_3$), são alguns dos minerais típicos de manganês e granadas, olivinas, piroxênios, anfibólios, micas, calcita e dolomita podem também conter Mn, porém em menor teor (Reimann & Caritat 1998).

Analisando o diagrama da Figura 4.21 verifica-se que a concentração de Mn na bacia variou entre 232,68 mg/kg e 1546,18 mg/kg. A maior concentração de manganês ocorre no ponto P09, localizado no Rio Preto do Itambé, possivelmente relacionado aos filitos do grupo Serra da Serpentina. Tem-se uma correlação positiva entre Fe e Mn (Figura 4.22). Observa-se também que alguns dos picos de Mn estão associados a alta concentração de Fe, como nos pontos: P01 (Rio Doce), P03 (Rio Doce) e P15 (Rio do Peixe).

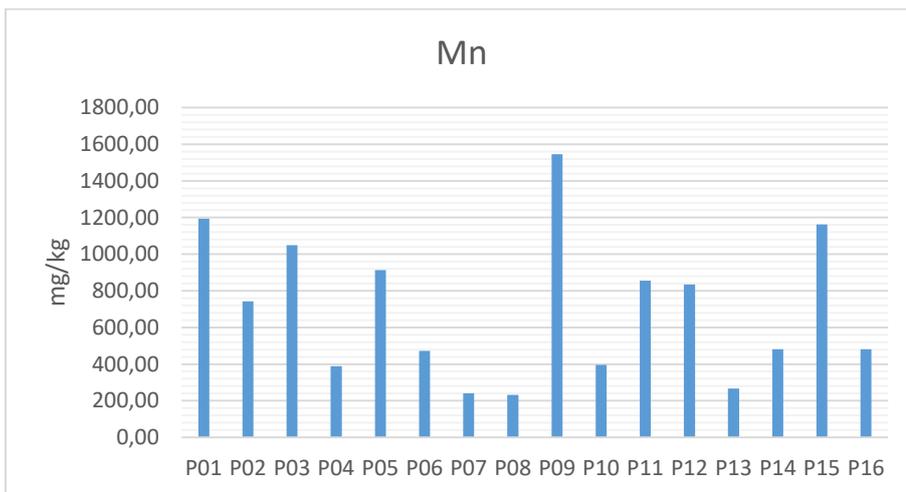


Figura 4.21 - Diagrama da variação de concentração de Mn ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

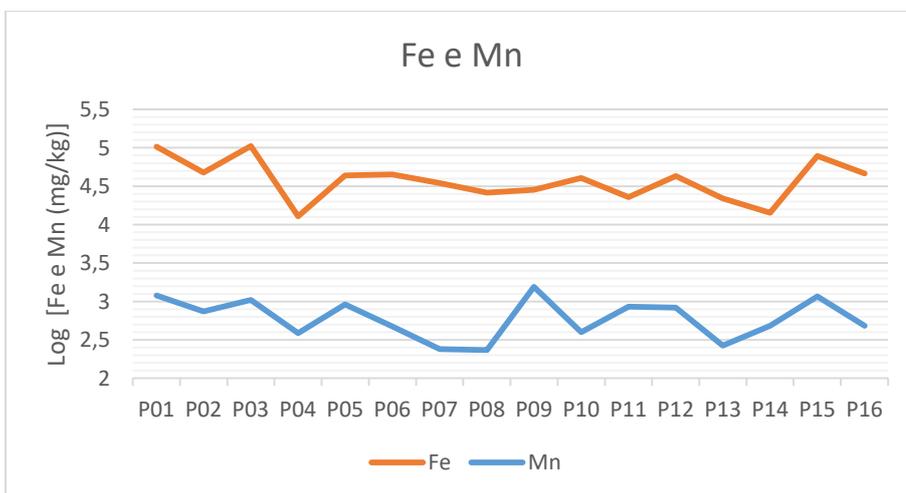


Figura 4.22 - Diagrama de correlação das concentrações de Fe e Mn nos sedimentos ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

4.3.3.17 Níquel (Ni)

O níquel é um elemento siderófilo podendo ser encontrado na natureza em forma de lateritas e sulfetos. Possui grande dispersão em meios aquosos (Wedepohl 1978) e apresenta forte associação com o Cr em rochas ultramáficas e basáltica (Costa 2001).

Niquelina (NiAs), gersdorffita (NiAsS), pentlandita (Fe,Ni)₉S₈, garnierita ((Ni,Mg)₃Si₂O₅(OH)₄) são alguns dos principais minerais de níquel que também pode ser encontrado em menor teor em olivinas, piroxênios, anfibólios, micas, granadas, pirita e calcopirita (Reimann e Caritat 1998).

As concentrações de níquel na bacia variam entre 6,39 mg/kg e 21,77 mg/kg (Figura 4.23). Observa-se que as maiores concentrações de Ni estão associados a alguns picos de cromo: P1 (Rio Doce), P03 (Rio Doce) e P16 (Rio Guanhões). Comparando com a regulamentação CONAMA 454/2012 os pontos P01 e P03 estão entre o nível 1 e o nível 2, apresentando uma baixa probabilidade de efeitos à biota.

Os diagramas da Figura 4.24 mostram uma correlação positiva entre os elementos cromo e níquel nas amostras coletadas. O alto teor de ambos elementos no P16 pode ser relacionado as formações ferríferas do grupo Serra Negra. Considerando que o Rio do Peixe percorre o grupo Serra da Serpentina, é possível que a maior concentração no P06 esteja associada aos seus filitos. Quanto aos P01 e P03, alta concentração se deve a confluência do Rio Santo Antônio com o Rio Doce.

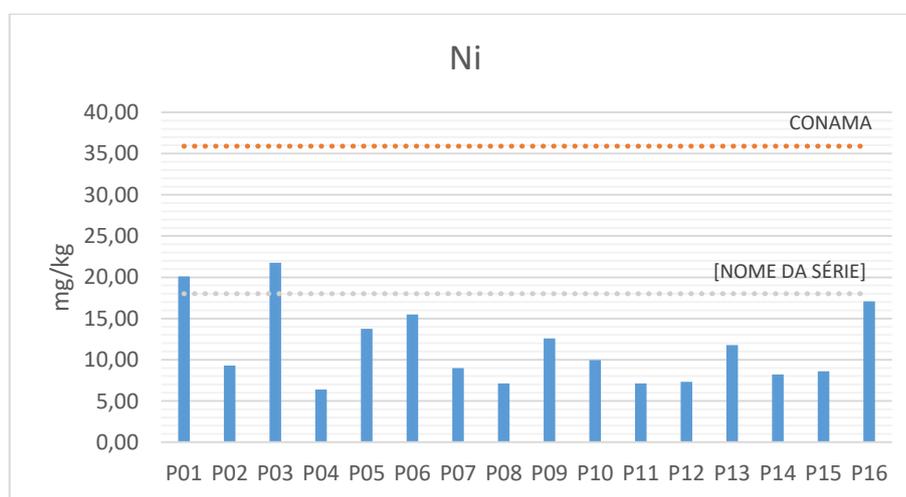


Figura 4.23 - Diagrama da variação de concentração de Ni ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

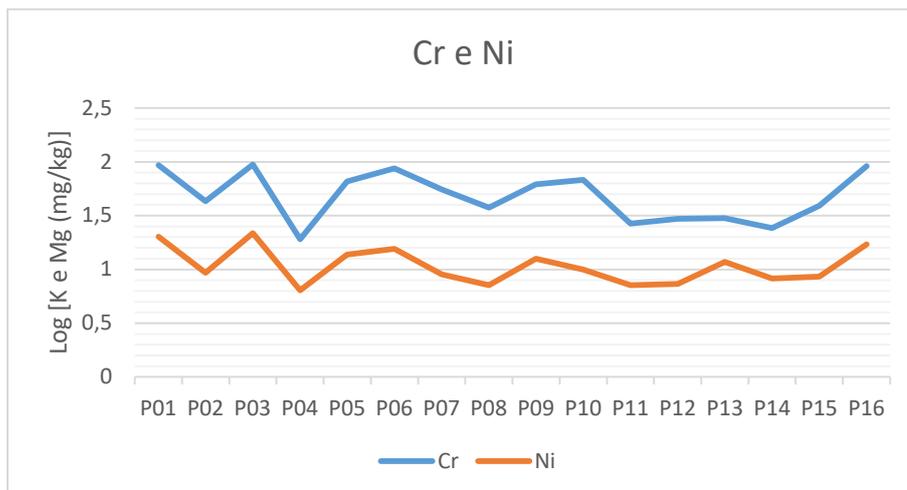


Figura 4.24 - Diagrama de correlação das concentrações de Cr e Ni nos sedimentos ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

4.3.3.18 Zinco (Zn)

O zinco é metal de transição calcófilo vastamente distribuído na crosta terrestre. Ocorre comumente associado a metais como Cd, Fe e Pb e é encontrado principalmente na forma de minerais como esfalerita (ZnS), goslarita (ZnSO₄) e zincita (ZnO) e também em piroxênios, anfibólios, micas, granadas e magnetita (Reimann & Caritat 1998).

As principais fontes antropogênicas de Zn incluem mineração, produção de zinco ferro e aço, corrosão de estruturas galvanizada e uso de fertilizantes e agrotóxicos (CETESB).

Observa-se no diagrama da Figura 4.25 que a concentração de Zn ao longo da bacia varia entre 19,76 mg/kg e 91,82 mg/kg. Em nenhum dos pontos a concentração ultrapassou os valores propostos pela regulamentação CONAMA 454/2012.

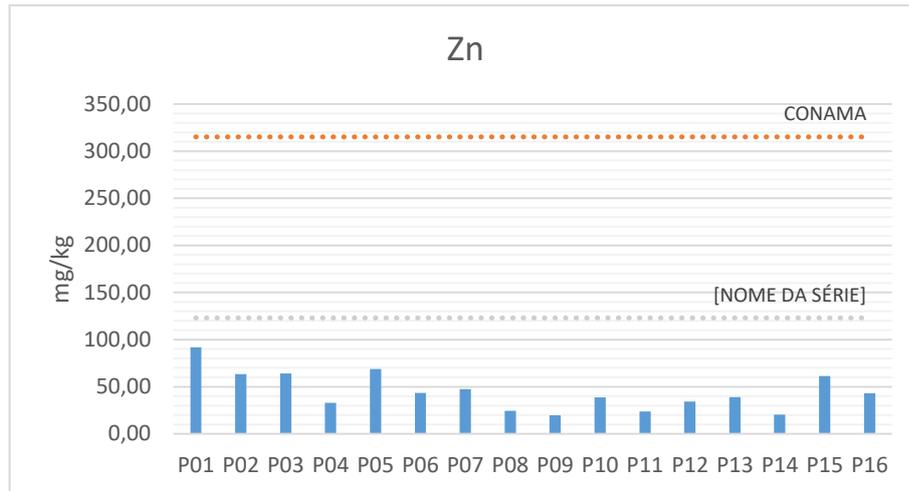


Figura 4.25 - Diagrama da variação de concentração de Zn ao longo da Bacia do Rio Santo Antônio.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Após a realização e análise dos resultados da distribuição granulométrica, caracterização mineralógica e geoquímica dos sedimentos provenientes da Bacia do Rio Santo Antônio foi possível entender a distribuição e concentração dos elementos químicos maiores e traços.

A análise granulométrica demonstrou a predominância de frações mais grossas nos sedimentos, o que pode implicar numa baixa absorção de metais potencialmente tóxicos. Também se verificou na região estudada uma grande diversidade litológica e o Rio Santo Antônio e seus afluentes cortam muitas dessas unidades encontradas, logo a diversidade de elementos químicos nos sedimentos também é grande.

A análise mineralógica validada pelos resultados obtidos na análise geoquímica feita pelo ICP-OES evidenciam a influência geogênica como a principal fonte dos elementos químicos presentes nos sedimentos da bacia do rio Santo Antônio. Ressalta-se que as altas concentrações de ferro podem estar relacionadas com as formações ferríferas bandadas do grupo Serra Negra.

Observou-se altas concentrações de As e Cd nos pontos P01 e P03, podendo correlacioná-las ao rompimento da barragem de rejeitos de Fundão. Possivelmente os elementos estavam nos sedimentos que foram depositados há muito tempo, mas que foram revolvidos pela lama proveniente da barragem e assim devolvidos novamente ao meio ambiente.

Também foi encontrado altos teores de Cd nos pontos P13, P14 e P16, Cr em P16 e P em P07. É importante ressaltar a influência de todas estas amostras terem sido coletadas em zonas urbanas, podendo se associar a alguma contaminação antropogênica, possivelmente ao despejo de esgoto.

Os dados obtidos pela análise geoquímica, cálculo do Fator de Enriquecimento, análise estatística em boxplot e comparação com os valores da resolução CONAMA 454/2012 indicam que os sedimentos da bacia apresentam baixas concentrações de metais potencialmente tóxicos à biota. Nos pontos onde alguns teores encontrados estavam elevados nota-se maior influência geogênica. E em minoria a influência antrópica, causada principalmente devido ao despejo de esgotos industriais e domésticos não tratados nos leitos e atividade de mineração.

Por fim, ressaltando que a Bacia do Rio Santo Antônio apresenta um dos melhores estados de conservação dentre as Unidades que compõem a bacia hidrográfica do Rio Doce, a sua manutenção em boas condições é essencial para recuperação das águas do Rio Doce e preservação da Mata Atlântica na região. É de suma importância que os órgãos públicos ambientais acompanhem melhor os locais em que foram encontradas contaminações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albernaz J.T. 1627. *Geographica demonstração da Capitania do Espirito Santo até a ponta da Barra do rio doce no qual parte cõ Porto Seguro...*, escala 1:420.000. Lisboa. Pert.: Bibliothèque Nationale de Paris. Disponível em: <https://historiacapixaba.com/documentos/geographica-demostracao-da-capitania-do-espirito-santo-ate-a-ponta-da-barra-do-rio-doce-no-qual-parte-co-porto-seguro-ca-1627/>. Acessado em 21 mar. 2023.
- Alloway B. J. 1995. Soil Processes and the Behaviour of metals. In Alloway B. J. *Heavy Metals in Soils*. Blackie Academic and Profesional, London, 11-37.
- ANA - Agência Nacional de Águas. 2007. *GEO Brasil: Recursos Hídricos*. Resumo Executivo. Brasília, ANA, MMA, 59p.
- ANA - Agência Nacional de Águas. 2013. *Atlas Brasil: abastecimento urbano de água*. Brasília, ANA. Disponível em: <https://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2015/01/Atlas-Brasil-abastecimento-urbano-de-%C3%A1gua.-Bras%C3%ADlia-ANA.pdf>. Acessado em 15 nov. 2021.
- ANA - Agência Nacional de Águas. 2016. *Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce: Rompimento da Barragem em Mariana/MG*. Brasília, ANA, 49p.
- ANA - Agência Nacional de Águas. 2021. As 12 regiões hidrográficas brasileiras. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/as-12-regioes-hidrograficas-brasileiras/atlantico-sudeste>. Acessado em 15 nov. 2021.
- Apitz S., White S. 2003. A conceptual framework for river-basin-scale sediment management. *Journal of Soils and Sediments*, **3**(3):132-138.
- Bauman A. 2008. Núcleo e crosta terrestres. Barueri, Girassol, 29 p.
- Berbel G. B. B. 2008. *Estudo do fósforo sedimentar e de suas especiações químicas em dois sistemas costeiros e Plataforma Continental Sudeste (Brasil) e Baía do Almirantado (região antártica) considerando suas relações biogeoquímicas*. Doctoral Thesis, USP, 102 p.
- Carvalho I. G. 1995. *Fundamentos da geoquímica dos processos exógenos*. Salvador, Bureau Gráfica e Editora Ltda. 239p.
- Carvalho N. O. 1994. *Hidrossedimentologia*. Rio de Janeiro, CPRM, Eletrobrás, 372 p.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO 2017. Arsênio e seus Compostos. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2013/11/Arsenio.pdf>. Acessado em 15 mar. 2023.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO 2017. Bário e seus Compostos. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2013/11/Bario.pdf>. Acessado em 15 mar. 2023.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO 2022. Cádmiio e seus Compostos. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Cadmio.pdf>. Acessado em 15 mar. 2023.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO 2022. Chumbo e seus Compostos. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Chumbo.pdf>. Acessado em 15 mar. 2023.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO 2022. Cobalto e seus Compostos. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Cobalto.pdf>. Acessado em 15 mar. 2023.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO 2022. Cobre e seus Compostos. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aboratórios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Cobre.pdf>. Acessado em 15 mar. 2023.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO 2022. Cromoo e seus Compostos. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Cromio.pdf>. Acessado em 15 mar. 2023.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO 2022. Zinco e seus Compostos. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2021/05/Zinco.pdf>. Acessado em 15 mar. 2023.

CETEST. 1998. *Avaliação do grau de contaminação do sedimento ao longo do canal de navegação do porto de Santos*. São Paulo, 26p.

Charlton R. 2008. *Fundamentals of fluvial geomorphology*, London and New York, Routledge, 275 p.

Christofolletti A. 1980. *Geomorfologia*. São Paulo, Edgard Blücher, 188 p.

Christofolletti A. 1999. *Modelagem de Sistemas Ambientais*. São Paulo, Edgard Blücher, 256 p.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. 2004. 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*”. - Diário Oficial da União, nº 85, de 30 de março de 2004.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. 2012. 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*”. Diário Oficial da União, nº 216, de 08 de novembro de 2012.

Costa A. T. 2001. *Geoquímica das águas e dos sedimentos da Bacia do Rio Gualaxo do Norte, leste-sudeste do Quadrilátero Ferrífero (MG): Estudo de uma área afetada por atividade de extração mineral*. MS Dissertation, UFOP, Ouro Preto, 146p.

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*. Doctoral Thesis, UFOP, Ouro Preto, 137 p.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Codemig – Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. 2014. Mapa. Disponível em: <http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/#downloads-tab>. Acessado em 10 mar. 2023.

Cunha S. B. 1996. Geomorfologia Fluvial. In: Cunha S. B. e Guerra. A. J. T. (orgs) *Geomorfologia: Exercícios, técnicas e aplicações*. Editora Bertrand do Brasil: Rio de Janeiro.

Dardenne M. C. & Schobbenhaus C. 2003. Depósitos Minerais no Tempo Geológico e Épocas Metalogenéticas. In: Bizzi, L. A. et al. (Ed.) *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil*. CPRM, Brasília, p. 365-378.

Duarte H. A. 2019. Ferro - Um elemento químico estratégico que permeia história, economia e sociedade. *Química Nova*. **42**:1146-1153.

Duce R. A., Hoffman G., Zoller W. 1975. Atmospheric trace-metals at remote northern and southern hemisphere sites - pollution or natural. *Science*, **187**(4171):59-61.

Eleutério L. 1997. *Diagnóstico da Situação Ambiental da Cabeceira da Bacia do Rio Doce, MG, no Âmbito das Contaminações por Metais Pesados, em Sedimentos de Fundo*. MS Dissertation, UFOP, 154 p.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente, UFV – Universidade Federal de Viçosa. 2010. Solos. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>. Acessado em 10 mar. 2023.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. 2021. Barragens de contenção de rejeitos e resíduos. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/e0197766-b7af-4e1e-8766-7b1de8f2002c>. Acessado em 10 mar. 2023

Filgueiras A.V., Lavilla I., Bendicho C. 2004. Evaluation of distribution, mobility and binding behaviour of heavy metals in surficial sediments of Louro River (Galicia, Spain) using chemometric analysis: a case study. *Science Total Environment*, **330**(1-3):115-129.

Forstner U, Ahlf W, Calmano W. 1989. Studies on the transfer of heavy metals between sedimentary phases with a multichamber device: combined effects of salinity and redox variation. *Marine Chemistry* **28**:145-158.

Förstner U. 1995. Non-linear Release of Metals from Aquatic Sediments. *Biogeochemistry of Pollutants in Soils and Sediments*. Berlim, Springer, p. 247-307.

Förstner U., Heise S., Schwartz R., Westrich B., Ahlf W. 2004. Historical contaminated sediments and soils at the river basin scale. Examples from the Elbe River catchment area. *Journal Soils & Sediments*, **4**(4):247-260.

Gaspar, J. de V. T. 2021. *Contribuição para a caracterização ambiental da bacia hidrográfica do rio Santo Antônio - MG*. MS Dissertation, Núcleo de Pesquisas e Pós-Graduação em Recursos Hídricos, UFOP, Ouro Preto, 160 p.

Gerrits L. & Edelenbos J. 2004: Management of sediments through stakeholder involvement - The risks and value of engaging stakeholders when looking for solutions for sediment related problems. *Journal of Soils and Sediments*, **4**(4):239-246.

Grotzinger J. & Jordan T. 2013. *Para Entender a Terra*. Bookman Editora, 738p.

Hasnain S. I., Thayyen R. J. 1999. Discharge and suspended-sediment concentration of meltwaters, draining from the Dokriani glacier, Garhwal Himalaya, India. *Journal of Hydrology*. **218**:191-198.

Herut B. & Sandler A. 2006. Normalization methods for pollutants in marine sediments: review and recommendations for the Mediterranean. *Israel Oceanographic & Limnological Research*. **18**:1-23.

Hursthouse A. S. 2001. The relevance of speciation in the remediation of soils and sediments contaminated by metallic elements-an overview with specific examples from central Scotland. *Journal Environmental Monitoring*, **3**(1):49-60.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2019. Áreas urbanizadas. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/cobertura-e-uso-da-terra/15789-areas-urbanizadas.html?=&t=destaques>. Acessado em 10 mar. 2023.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2019. Limite dos Biomas. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>. Acessado em 10 mar. 2023.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2020. Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15831-cobertura-e-uso-da-terra-do-brasil.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acessado em 10 mar. 2023.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2021. Bacias e Divisões Hidrográficas do Brasil. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/31653-bacias-e-divisoes-hidrograficas-do-brasil.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acessado em 05 mar. 2023.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2021. Malha Municipal. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acessado em 05 mar. 2023.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acessado em 03 mar. 2023.

IDE-SISEMA/MG. 2009. Atlas. Disponível em: <https://institutopristino.org.br/atlas/municipios-de-minas-gerais/>. Acessado em 10 mar. 2023.

IDE-SISEMA/MG. 2022. Principais trechos hidrográficos das Circunscrições Hidrográficas de Minas Gerais. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/ebb215b7-10a5-481b-8cb2-823b4cf3d5e4>. Acessado em 05 mar. 2023.

IDE-SISEMA/MG. 2022. Principais trechos hidrográficos das Circunscrições Hidrográficas de Minas Gerais. [https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/ ebb215b7-10a5-481b-8cb2-823b4cf3d5e4](https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/ebb215b7-10a5-481b-8cb2-823b4cf3d5e4)). Acessado em 10 mar. 2023.

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>. Acessado em 10 mar. 2023.

Jácome, A. P. G. 2023, Contribuição para a caracterização ambiental da Bacia Hidrográfica Do Rio Santo Antônio - MG

Leão L. P. 2014. *Caracterização Geoquímica de Sedimentos da Bacia do Rio Maynard, MG*. Trabalho Final de Graduação, UFOP, Ouro Preto 93p.

Leopold L. B., Welman M. G., Miller J. P. 1995. *Fluvial processes in geomorphology*. New York, Dover Publications, 544 p.

Loska K. & Wiechula D. 2003. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir. *Chemosphere*. **51**:723-733.

Loska K., Cebula J., Pelczar J., Wiechula D., Kwapuliński J. 1997. Use of enrichment, and contamination factors together with geoaccumulation indexes to evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Rybnik water reservoir in Poland. *Water, Air, & Soil Pollution*, **93**:347–365.

Lottermoser B. G. 2000. *Mine wastes: characterization, treatment and environmental impacts*. Springer, New York, 404 p.

Lu Z., Cai M., Wang J., Yang H., He, J. 2012. Baseline values for metals in soils on Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica: the extent of anthropogenic pollution. *Environmental monitoring and Assessment*, **184**:7013-7021.

Magalhães R. A. 2001. Erosão: definições, tipos e formas de controle. In: VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Goiânia, ANAIS. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/76585431/EROSAO>. Acessado em 23 jan. 2023.

Makkaveyev N. I. 1986. Channel process as a feature of erosion-accumulative process, Papers of Channel Processes Section, Scientific Committee “Integrated Exploitation and Protection of Water Resources”, General Problems of Channel Process Theory, Hydrometeoizdat Publ., Leningrad, **1**:56–65 (in Russian).

Miall A.D. 1992. Alluvial Deposits. In: Walker R.G. & James N.P. (ed.). *Facies Models: response to sea level change*. Stittsville, Geological Association of Canada, p. 119-142.

Ministério do Meio Ambiente. 2015. Mapa de Vegetação Nativa na Área de Aplicação da Lei no. 11.428/2006 – Lei da Mata Atlântica (ano base 2009), Brasília, MMA, 85 p.

Moreira R. C. A. 2003. Referência Geoquímica regional para interpretação das concentrações dos elementos químicos em sedimentos na bacia do Lago Paranoá - DF. *Química Nova*, SBQ, São Paulo, **26**(6):812-820.

Mortatti J., Bernardes M. C., Probst J. L., Leleyter-Reinert L. 2002. Composição química dos sedimentos fluviais em suspensão na bacia do rio Piracicaba: extração seletiva de elementos traço. *Geochimica Brasiliensis*, **16**(2):123-141.

OMEE - Ontario Ministry of the Environment and Energy. 1993. *Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario*. Ministry of the Environment and Energy, Toronto, 39 p.

PARH Santo Antônio. 2010. *Plano de Ação de Recursos Hídricos da Unidade de Planejamento e Gestão DO3 - PARH Santo Antônio*. Relatório Final. Consórcio EcoPLAN - Lume, 97p.

Pimenta, M. G. B. 2021. Análise química ambiental da bacia do Rio Santo Antônio - MG por meio da avaliação de amostras de água e sedimentos. MS Dissertation, Departamento de Geologia, UFMG, 151 p.

PIRH Doce. 2010. *Plano integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce e dos Planos de ações de Recursos Hídricos para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce*. Relatório Final. Consórcio EcoPLAN - Lume, 478p.

Pueyo M., Rauret G., Luck D., Yli-Halla M., Muntau H., Quevauviller P., López-Sánchez J.F. 2001. The certification of the extractable contents (mass fractions) of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in freshwater sediment following sequential extraction procedure. *Journal of Environment Monitoring*, **3**(2):243-50.

- Reimann C. & Caritat P. de 1998. *Chemical elements in the environment: Factsheets for the geochemist and environmental scientist*. Heidelberg, Springer Berlin, 398 p.
- Roca N., Pazos S. M., Bech J. 2008. The relationship between WRB soils units and heavy metals contents in soils of Catamarca (Argentina). *Journal of Geochemical Exploration*, **96**(2-3):77-85.
- Rodrigues A. S. L. 2012. *Caracterização da Bacia do Rio Gualaxo do Norte, MG, Brasil: Avaliação Geoquímica Ambiental e Proposição de Valores de Background*. MS Dissertation, UFOP, Ouro Preto, 190 p.
- Ruttenberg K. C. 2003. The Global Phosphorus Cycle. In: *Treatise on geochemistry*. Schlesinger W. H. Elsevier, **8**:585-643
- Santos H. G. dos, Jacomine P. K. T., Anjos L. H. C. Dos, Oliveira V. A. De, Lumbreras J. F., Coelho M. R., Almeida J. A. de, Araújo Filho J. C. de, Oliveira J. B. de, Cunha T. J. F. 2018. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília, Embrapa, 356p.
- Sednet - European Sediment Research Network 2004. Contaminated Sediments in European River Basins. Disponível em: http://www.htg-baggergut.de/Downloads/SedNet_booklet_final.pdf. Acessado em 03 mar. 2023.
- Siegel F. R. 2002. *Environmental geochemistry of potentially toxic metals*. Springer, Berlim, 218 p.
- Silva A.M., Schulz H. E., Camargo P. B. 2003. *Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas*. São Carlos, RiMa. 320 p.
- Smith K. S. & Huck H. L. O. 1999. An Overview of the Abundance, Relative Mobility, Bioavailability, and Human Toxicity of Metals In: Plumlee, G. S.; Logsdon, M. J. (eds.). *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits Part A: Processes, Techniques, and Health Issues*. *Society of Economic Geologists*, 2, Littleton, Reviews in Economic Geology, p. 29-70.
- Soares M. C. C., Mizusaki A. M. P., Guerra T., Vignoli M. L. 2004. Análise Geoquímica dos Sedimentos de Fundo do Arroio do Salso, Porto Alegre - RS - Brasil. *Pesquisas em Geociências*. UFRGS, Porto Alegre, **31**:39-50.
- Sposito G. 1989. *The Chemistry of Soils*. Oxford University Press, New York, 344 p.
- Stevens H. H. & Yang C. T. 1989. Summary and use of selected fluvial sediment discharge formulas. *Water Resources Investigations Report*. USGS, Denver, 121 p.
- Suguio K. & Bigarella J. J. 1979. *Ambientes fluviais*. Curitiba, UFPR, 183 p.
- Swennen R. & Van der Sluys J. 2001. Anthropogenic impact on sediment composition and geochemistry in vertical overbank profiles of river alluvium from Belgium and Luxembourg. *Journal of Geochemical Exploration*, **75**:93-105.
- Tan S. J., Li L., Xiao Z. Y., Wu Y. T., Zhang Z. B. 2005. Pervaporation of alcoholic beverages - the coupling effects between ethanol and aroma compounds. *Journal of Membrane Science*, **264**:129-136.
- Teixeira W., Toledo, M. C. M. de, Fairchild T. R., Taioli, F. 2000. *Decifrando a Terra*. São Paulo, Oficina de Textos, 568 p.
- Thornton S. E. 1984. Hemipelagites and Associated Facies of Slopes and Slope Basins. In: Geological Society of London, Special Publication, London, **15**:377-394.
- Torres A. M., Bastos M. L. L., Boaventura G. R., Licht O. A. B., Kern D. C., Junior, (2005). Geoquímica dos sedimentos e solos In: Souza, C.R.G., Suguio K., Oliveira A. M. S., Oliveira P. E. *Quaternário do Brasil*. USP, São Paulo, 298-320.

Jácome, A. P. G. 2023, Contribuição para a caracterização ambiental da Bacia Hidrográfica Do Rio Santo Antônio - MG

UNESP - Universidade Estadual Paulista 2023. Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert. Disponível em: <https://museuhe.com.br/mineral/anfibolio-amphibole-2/>. Acessado em 03 de mar 2023.

USGS – United States Geological Survey. 1963. Contributions to General Geology 1963. Disponível em <https://pubs.usgs.gov/bul/1181a/report.pdf>. Acessado em 27 mar 2023.

Vicq R. F. C. 2012. Diagnóstico da Qualidade da Água da Microbacia do Rio Bananeiras. *Revista do VI Simpósio de Iniciação Científica da Faculdade Santa Rita*, **1**:75-80.

Vicq R. F. C. 2015. *Mapeamento geoquímico e estabelecimento de valores de referência (background) de sedimentos fluviais do Quadrilátero Ferrífero*. MS Dissertation, Departamento de Geologia, UFOP, Ouro Preto, 190 p.

VIEIRA L. S. 1988. *Manual de Ciência do Solo: uma ênfase aos solos tropicais*. Editora Ceres, 464p.

Walling D. E. 2006. Human impact on land–ocean sediment transferred by the world's Rivers. *Geomorphology*, **79**:192–216.

Ward A. D. & Trimble S. W. 1995. *Environmental hydrology*. NewYork, Lewis Publishers. 475 p.

Wedepohl K. H. 2012. *Handbook of Geochemistry*. Berlin, Springer-Verlag, 442 p.

Wentworth C.K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, **30**(5):377-392.

Yongming H., Peixuan D., Junji C., Posmentier E. S. 2006. Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China. *Science of The Total Environment*, **355**(1-3):176-186.

Apêndice(s)

Apêndice 1: Descrição dos pontos de amostragem na Bacia do Rio Santo Antônio

Apêndice 2: Distribuição granulométrica dos sedimentos da Bacia do Rio Santo Antônio

Apêndice 3: Resultados das Difrações de Raio-X

Apêndice 4: Resultados das análises ICP- EOS

Apêndice 1: Descrição dos pontos de amostragem

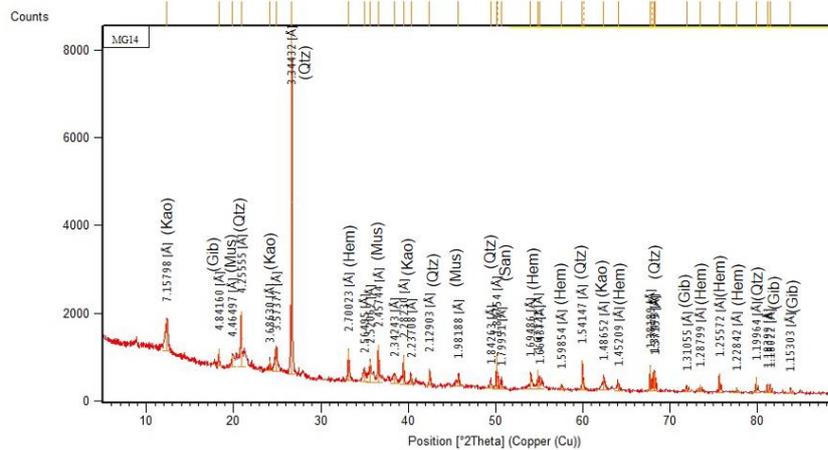
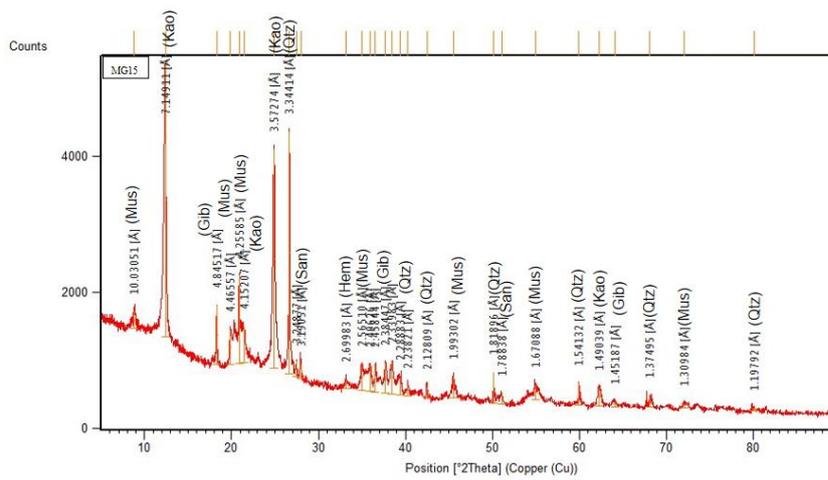
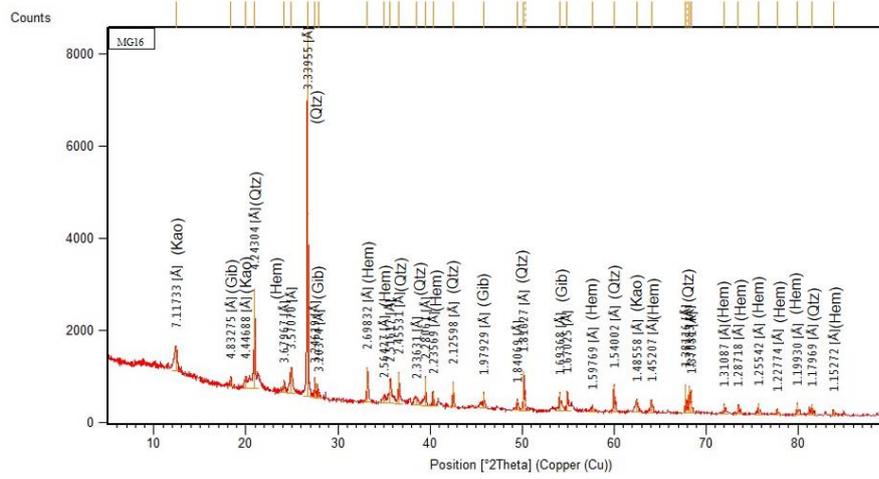
Ponto de Amostragem	Nome do Rio	Localização	Projeção UTM (SAD69, 23K)		Altitude (m)	Descrição do local
			x	y		
P1	Rio Doce	Pós foz do Rio Santo Antônio - Naque	783027	7870883	201	Mata ciliar, residências rurais e pastagens degradadas. Ocorrência de sedimentos arenosos de coloração escura oriundos do rompimento da Barragem de Fundão.
P2	Rio Santo Antônio	Próximo à foz - Naque	780971	7871399	192	Mata ciliar, residências rurais, pastagem e plantação de banana. Ocorrência de sedimento ferruginoso nas margens.
P3	Rio Doce	Montante da foz do Rio Santo Antônio - Naque	781783	7869939	204	Mata ciliar e atividades agrícolas.
P4	Rio Santo Antônio	Entre Belo Oriente e Açucena	763007	7879943	211	Mata ciliar ao redor do canal e pastagem nas proximidades. Ocorrência de sedimento ferruginoso nas margens.
P5	Rio Guanhães	Senhora do Porto	702070	7909270	575	Vegetação rasteira, pastagens, fragmentos de rochas e matacões.
P6	Rio do Peixe	Dom Joaquim	684854	7901853	549	Local próximo a zona urbana. Residências, despejo de esgoto, bambuzais e resquícios de Mata Atlântica.
P7	Rio Santo Antônio	Conceição do Mato Dentro	664073	7896937	628	Zona urbana, residências, despejo de esgoto, pastagem e presença de gado.
P8	Rio Santo Antônio	Conceição do Mato Dentro	663555	7890326	599	Pastagem nos topos dos morros, vegetação característica da Mata Atlântica e afloramento de quartzito nas margens.
P9	Rio Preto do Itambé	Morro do Pilar	675291	7870954	533	Próximo a zona urbana. Vegetação característica da Mata Atlântica e vegetação rasteira.

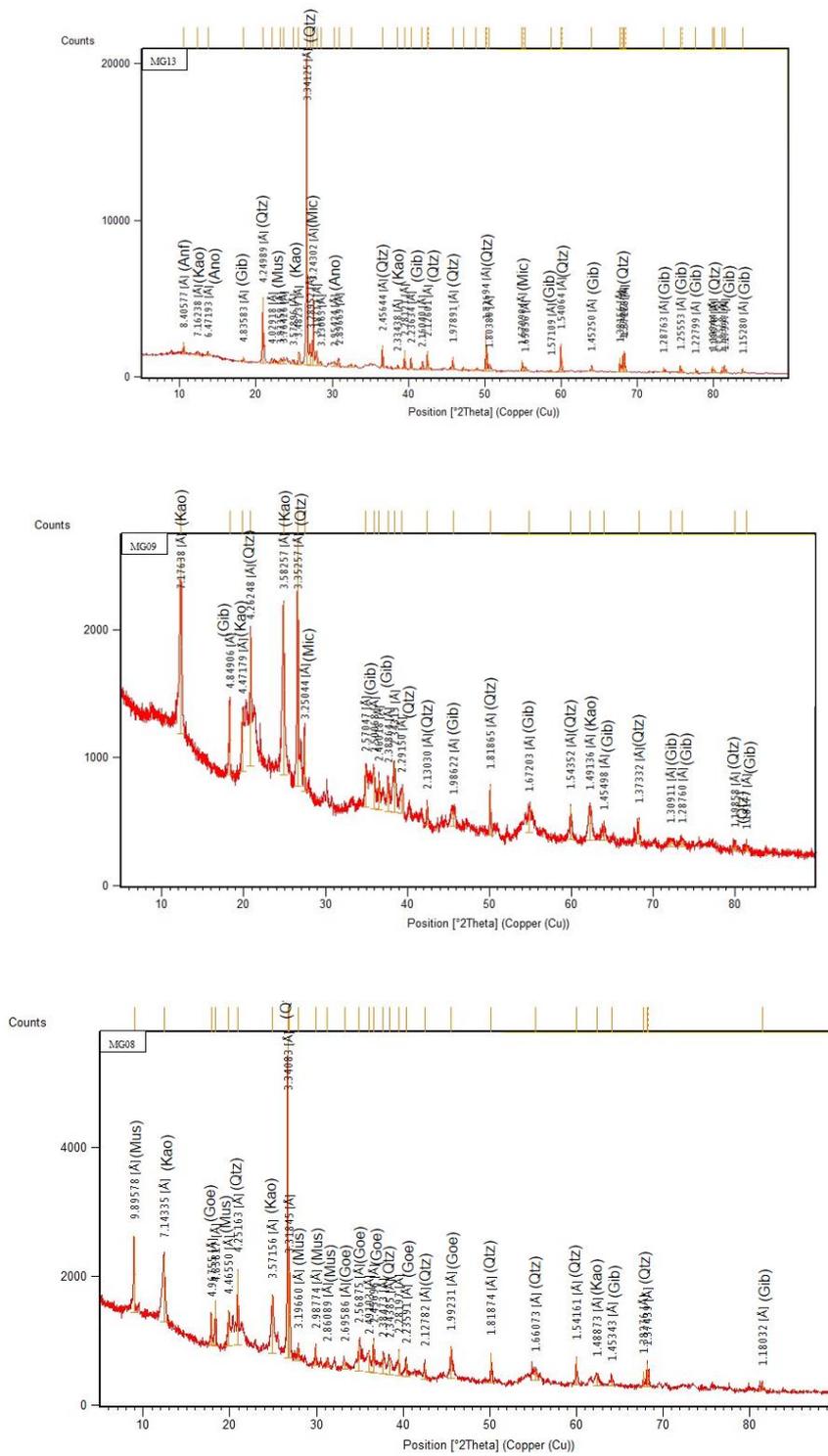
P10	Rio Santo Antônio	Santo Antônio do Rio Abaixo	683478	7873386	490	Zona urbana. Observa-se ao redor do rio residências, pastagem, mata ciliar e matacões.
P11	Rio Preto do Itambé	São Sebastião do Rio Preto	691438	7866346	464	Bambuzais e vegetação densa. Afloramentos de gnaisses ao longo do canal e em suas margens.
P12	Rio Tanque	Entre São Sebastião do Rio Preto e Santa Maria de Itabira	699446	7853311	477	Vegetação rasteira.
P13	Rio Jirau	Santa Maria de Itabira	697774	7848661	506	Zona urbana. Despejo de esgoto, resíduos domésticos e pastagem degradada ao redor do rio.
P14	Rio Santo Antônio	Ferros	709159	7872800	411	Zona urbana. Residências e despejo de esgoto diretamente no rio. Afloramento de gnaisses nas margens.
P15	Rio do Peixe	Carmésia	692389	7887416	521	Mata ciliar, residências, afloramento de gnaisses e cascalhos de quartzitos e quartzos arredondados.
P16	Rio Guanhões	Dores de Guanhões	717855	7891624	491	Zona urbana, residências, despejo de esgoto, mata ciliar e afloramentos de granitos/ gnaisses.

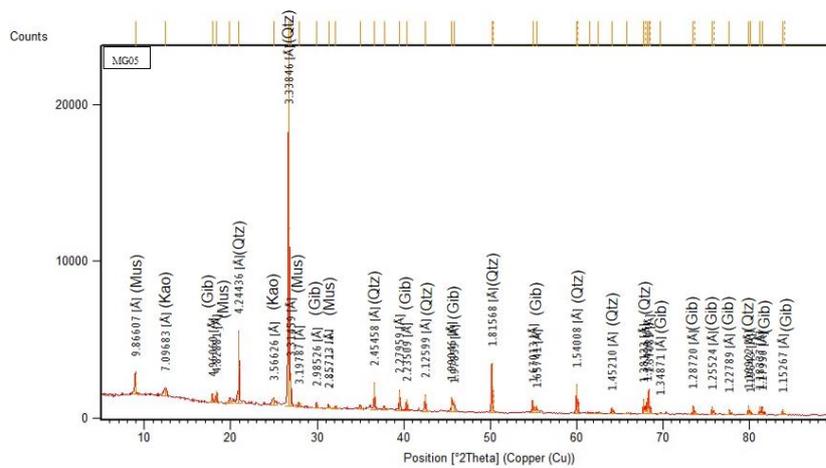
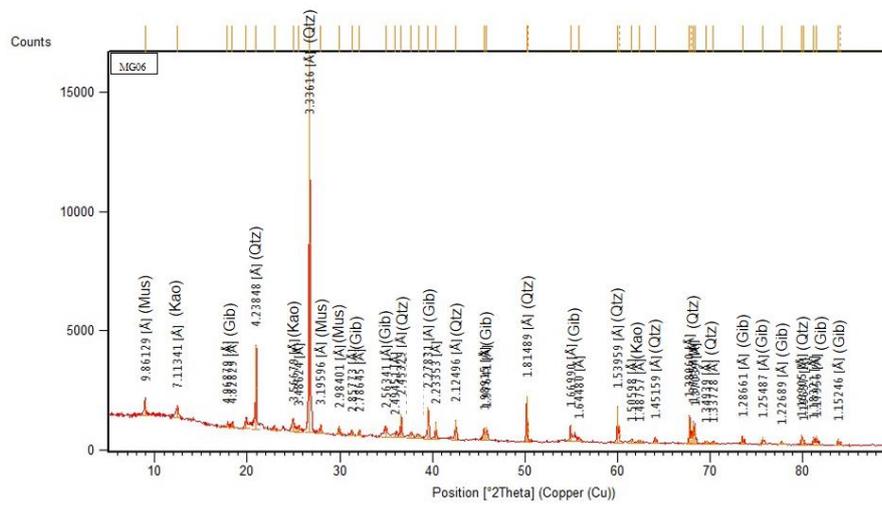
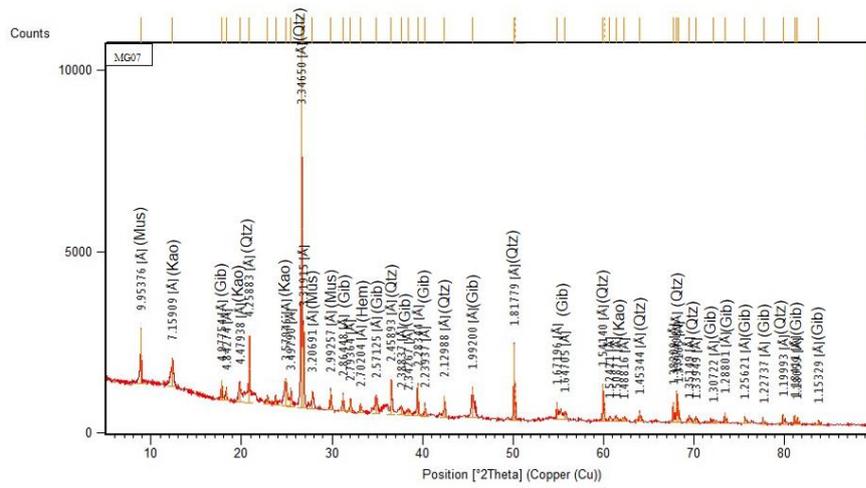
Apêndice 2: Distribuição granulométrica dos sedimentos da Bacia do Rio Santo Antônio

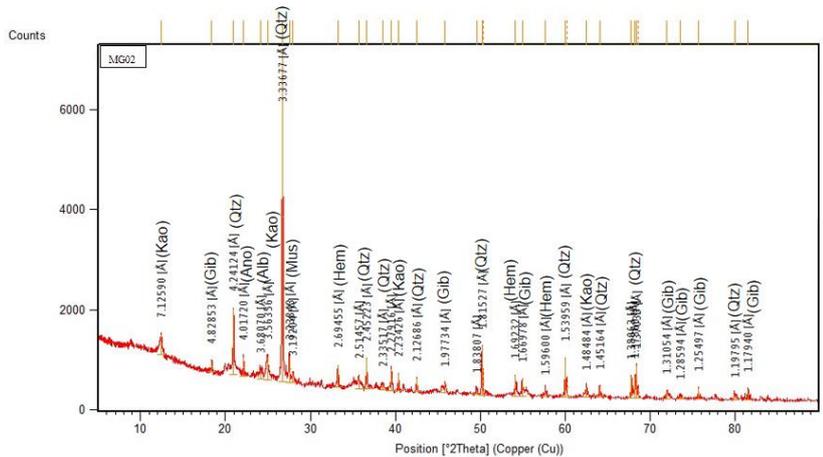
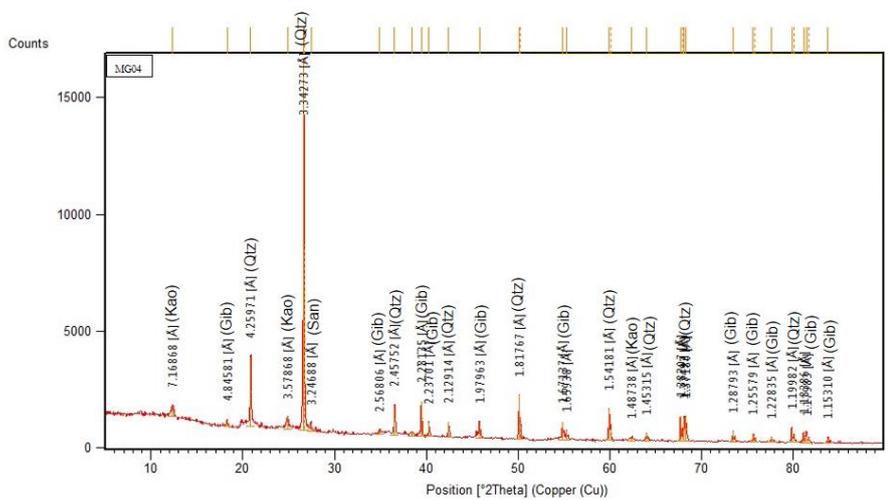
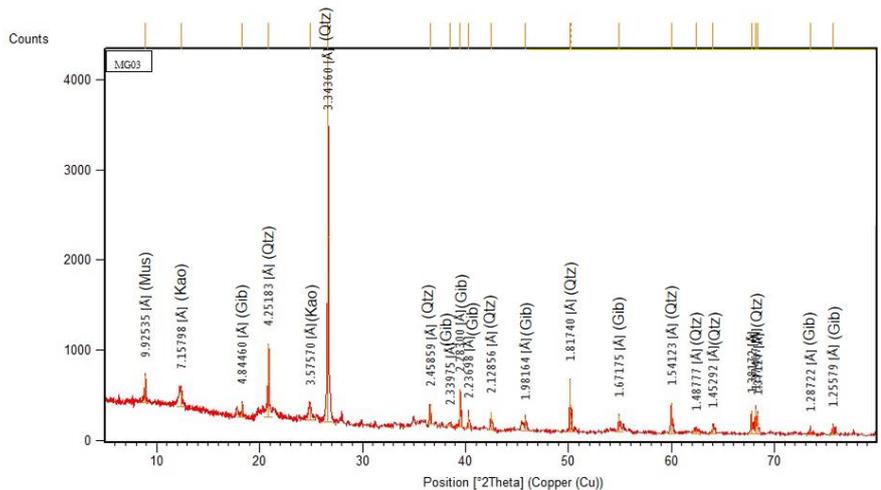
Ponto de Amostragem	Areia muito grossa		Areia grossa		Areia média		Areia fina		Areia muito fina		Silte / Argila	
	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)	%
P01	4,66	4,7	10,42	10,5	49,40	49,6	15,08	15,1	15,70	15,8	4,39	4,4
P02	19,02	19,2	21,16	21,3	24,95	25,1	17,85	18,0	14,51	14,6	1,81	1,8
P03	2,18	2,2	3,20	3,2	5,88	5,9	60,70	61,1	24,92	25,1	2,51	2,5
P04	4,74	4,7	73,54	73,5	21,15	21,2	0,42	0,4	0,14	0,1	0,01	0,0
P05	1,20	1,2	46,58	47,0	42,17	42,5	5,39	5,4	2,75	2,8	1,10	1,1
P06	8,69	8,7	14,89	14,9	34,60	34,7	23,73	23,8	15,73	15,8	2,07	2,1
P07	1,70	1,7	3,75	3,8	8,02	8,1	64,83	65,2	19,77	19,9	1,29	1,3
P08	17,43	17,5	9,47	9,5	18,92	19,0	33,08	33,2	14,69	14,7	6,12	6,1
P09	62,54	62,6	24,85	24,9	10,29	10,3	1,45	1,5	0,53	0,5	0,20	0,2
P10	20,99	21,1	29,75	29,9	37,03	37,2	9,56	9,6	2,04	2,0	0,28	0,3
P11	49,74	50,0	30,10	30,3	15,08	15,2	3,16	3,2	0,74	0,7	0,58	0,6
P12	56,71	56,8	7,30	7,3	22,87	22,9	11,46	11,5	1,36	1,4	0,20	0,2
P13	5,32	5,4	15,63	15,8	67,78	68,5	9,79	9,9	0,32	0,3	0,05	0,1
P14	11,86	11,9	66,06	66,2	18,88	18,9	2,66	2,7	0,29	0,3	0,04	0,0
P15	10,68	10,9	14,20	14,5	64,20	65,4	8,29	8,5	0,62	0,6	0,11	0,1
P16	73,60	73,7	14,60	14,6	9,01	9,0	1,87	1,9	0,58	0,6	0,23	0,2

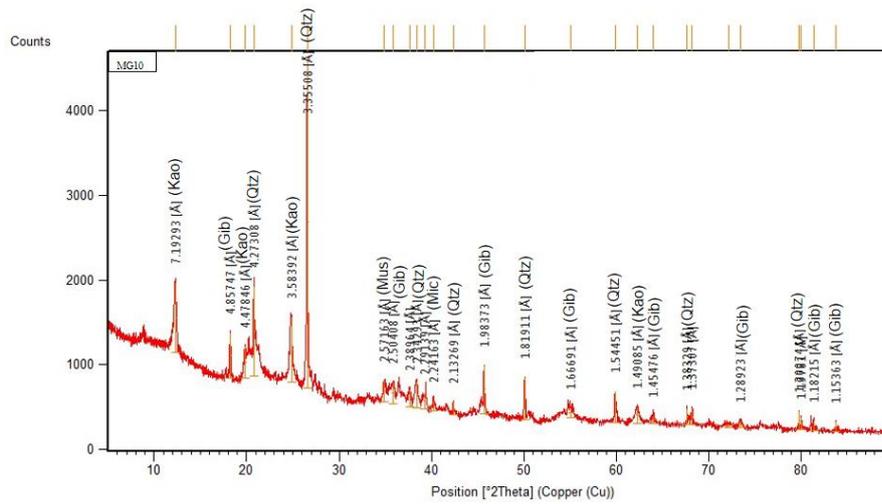
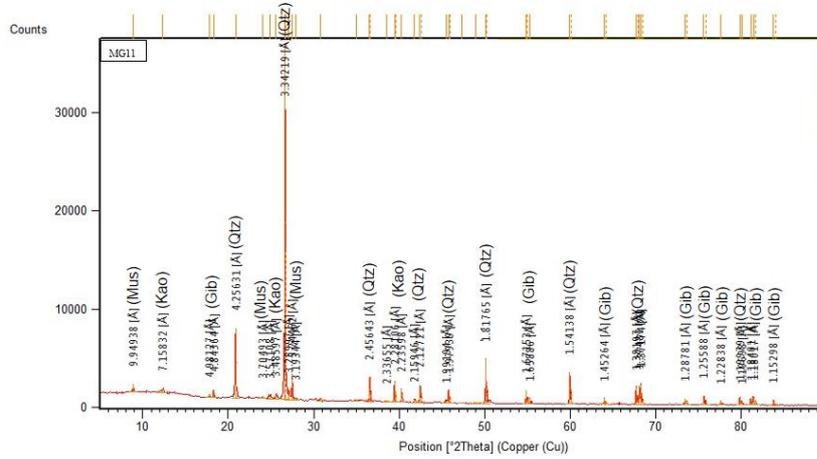
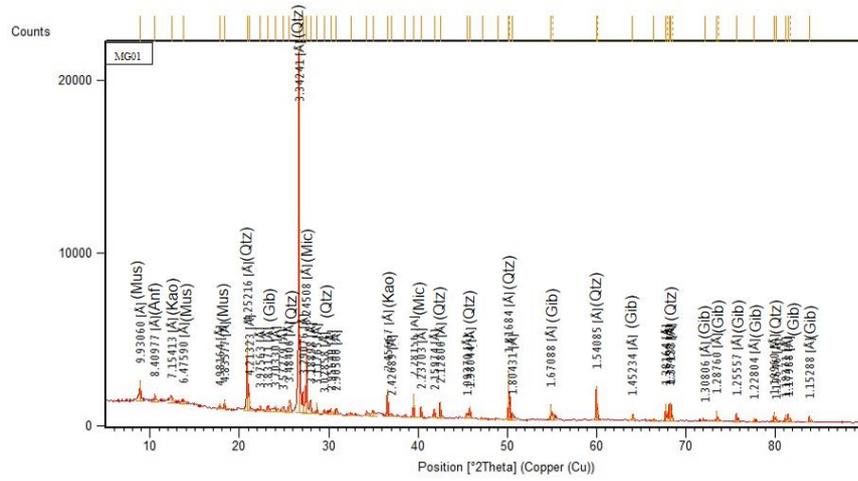
Apêndice 3: Resultados das Difrações de Raio-X

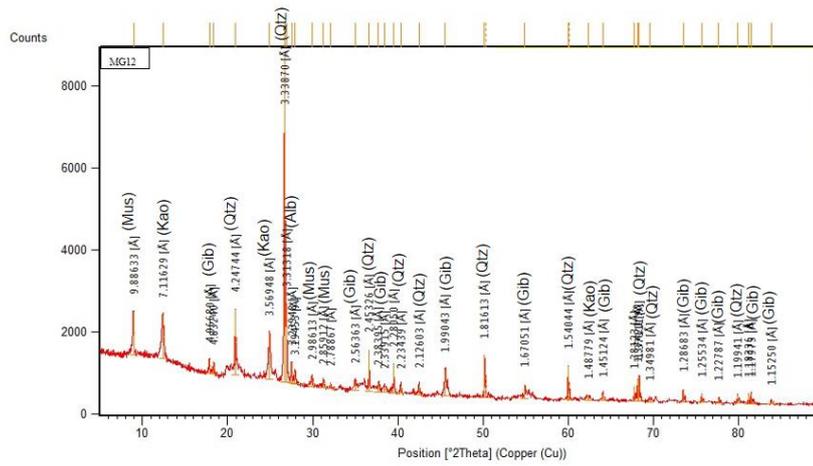












Apêndice 4: Resultados das análises ICP-EOS - elementos maiores

Amostra	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	Ti
	mg/kg							
P01	11135,80	1017,90	103327,38	662,11	733,87	92,19	525,64	609,04
P02	23319,83	948,44	47502,52	1381,25	1064,46	73,40	519,51	1192,39
P03	12030,17	768,31	105063,07	652,90	736,51	102,38	497,92	660,06
P04	6669,25	1143,18	12887,73	1193,77	763,65	285,75	111,28	772,63
P05	20566,11	1646,53	43681,02	1243,83	963,88	105,00	550,46	1269,66
P06	21654,93	881,11	44928,67	1344,70	1296,76	94,82	620,02	422,89
P07	13984,41	834,38	34744,87	598,54	529,04	112,40	2639,86	197,85
P08	15302,35	2105,32	26015,42	589,89	552,26	58,12	397,54	225,20
P09	14411,55	1108,04	28268,30	713,69	961,30	64,00	371,54	294,38
P10	16274,23	1573,96	40552,02	997,81	921,31	65,11	418,07	636,15
P11	15085,51	1895,32	22687,26	949,63	1111,78	53,53	347,47	485,38
P12	8923,36	1883,48	42797,23	930,56	991,00	130,69	467,93	600,94
P13	11789,45	1220,69	21848,35	2620,41	2082,61	175,25	319,24	759,55
P14	12071,10	945,46	14291,86	1051,24	562,19	103,75	174,08	364,11
P15	22168,38	1079,04	78603,83	1424,54	951,92	103,27	681,91	950,17
P16	23962,42	873,38	46442,38	1395,48	1345,34	82,25	637,09	411,92
LQ	24,5	4,28	7,24	12,24	3,04	3,49	6,93	10,75

LQ = Limite de Quantificação

Apêndice 4: Resultados das análises ICP-EOS - elementos traços

Amostra	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
	mg/kg									
P01	12,86	90,63	<LQ	9,69	92,82	14,56	1193,67	20,10	20,73	91,82
P02	<LQ	111,09	<LQ	12,58	43,04	53,93	742,37	9,28	40,30	63,52
P03	34,69	89,75	<LQ	12,29	94,53	18,46	1048,66	21,77	14,63	64,16
P04	<LQ	58,09	<LQ	7,50	19,09	52,31	388,11	6,39	8,84	32,79
P05	<LQ	130,08	<LQ	14,35	65,85	51,03	912,94	13,77	35,26	68,77
P06	<LQ	117,75	<LQ	12,24	86,95	30,51	472,63	15,49	13,42	43,56
P07	<LQ	73,67	<LQ	4,14	55,29	21,84	240,60	8,99	19,01	47,31
P08	<LQ	52,57	<LQ	5,81	37,49	14,87	232,68	7,13	7,83	24,53
P09	<LQ	101,60	<LQ	9,31	61,94	12,70	1546,18	12,60	17,87	19,76
P10	<LQ	59,86	<LQ	7,71	67,88	23,72	396,48	9,97	15,39	38,75
P11	<LQ	80,35	0,72	11,11	26,64	16,40	855,96	7,13	14,68	23,88
P12	<LQ	74,71	<LQ	7,91	29,45	16,63	834,80	7,31	16,93	34,36
P13	<LQ	66,28	11,05	13,97	29,85	12,57	267,09	11,78	28,50	39,00
P14	<LQ	52,80	11,42	9,29	24,30	7,24	480,26	8,23	20,08	20,22
P15	<LQ	159,23	<LQ	20,90	39,05	14,15	1162,67	8,58	49,87	61,45
P16	<LQ	121,84	11,29	13,09	91,54	19,95	481,22	17,06	16,47	43,01
LQ	7,58	0,545	0,49	1,56	1,08	1,23	5,55	3,02	7,08	0,31

LQ = Limite de Quantificação