Universidade Federal de Ouro Preto

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - ProAmb

CONTAMINANTES INORGÂNICOS E MATERIAIS PARTICULADOS DEPOSITADOS NA BACIA DO RIO DOCE - IMPACTOS DO DESASTRE DE FUNDÃO

Carla da Silva Fernandes

Ouro Preto, novembro de 2018

Universidade Federal de Ouro Preto

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - ProAmb

Carla da Silva Fernandes

CONTAMINANTES INORGÂNICOS E MATERIAIS PARTICULADOS DEPOSITADOS NA BACIA DO RIO DOCE - IMPACTOS DO DESASTRE DE FUNDÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título: "Mestra em Engenharia Ambiental – Área de Concentração: Tecnologias Ambientais

Orientadora: Mônica Cristina Teixeira

Ouro Preto, novembro de 2018

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F363c Fernandes, Carla da Silva .
Contaminantes inorgânicos e materiais particulados depositados na Bacia do Rio Doce [manuscrito]: impactos do desastre de Fundão . / Carla da Silva Fernandes. - 2019.
123 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Mônica Cristina Teixeira.
Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Programa de Engenharia Ambiental.
Área de Concentração: Tecnologias Ambientais.

1. Barragens de rejeitos - Barragem de Fundão. 2. Material particulado - Rio Doce (MG). 3. Metais - Toxicologia - Rio Doce (MG). 4. Substâncias perigosas - Aspectos da saúde. 5. Barragens e açudes - Segurança. 6. Desastres ambientais. I. Teixeira, Mônica Cristina. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 502:004

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB: 1716

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – PROAMB

CONTAMINANTES INORGÂNICOS E MATERIAIS PARTICULADOS DEPOSITADOS NA BACIA DO RIO DOCE – IMPACTOS DO DESASTRE DE FUNDÃO

Autora: Carla da Silva Fernandes

Dissertação defendida e aprovada, em 21 de novembro de 2018, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Profa. Dra. Mônica Cristina Teixeira - Orientadora
Universidade Federal de Ouro Preto

p/ participação por vídeo conferência
Prof. Dr. Bruno Lemos Batista
Universidade Federal do ABC

Profa. Dra. Adivane Terezinha Costa
Universidade Federal de Ouro Preto

Carinhosamente dedico aos meus pais, pelo apoio, paciência e dedicação essenciais para que eu pudesse superar todas as minhas dificuldades e conseguir alcançar meus objetivos.

“Temos de fazer o melhor que podemos. Esta é a nossa sagrada responsabilidade humana.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, pelas bênçãos e luz em toda minha caminhada.

Aos meus, queridos pais, pelo apoio incondicional, por serem minha maior fonte de inspiração e amor.

À minha orientadora, professora Mônica, sob cuja orientação, amizade e dedicação pude realizar este trabalho.

Ao Jeronimo, pelo amor, amizade, companheirismo e por acreditar sempre em mim.

Aos meus, irmãos, pela amizade, amor e compreensão.

À minha amiga, Grazielle, pela contribuição do desenvolvimento deste trabalho, pela amizade e companheirismo.

Ao Laboratório Multi-Usuário do Departamento de Farmácia e ao Laboratório de Caracterização Molecular e Espectrometria de Massas do Departamento de Química e Laboratório de Biohidrometalurgia e Tratamento de Efluentes da Escola de Minas da UFOP pela concessão do uso dos equipamentos.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização desse estudo.

Muito obrigada!

RESUMO

O presente trabalho teve como principal objetivo avaliar a poeira gerada pela deposição da lama de rejeito, nas regiões inicialmente afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão, ocorrido em 2015. A região está inserida na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, fazendo parte do Quadrilátero Ferrífero, onde ocorrem intensas atividades relacionadas à extração mineral. Dezoito pontos de amostragem foram selecionados, abrangendo áreas da bacia do rio (médio e baixo curso) afetadas pela lama de rejeito advindo do rompimento e áreas não afetadas (alto curso). Foram avaliadas as características físicas e químicas das amostras de poeira coletadas no período de julho a setembro de 2016. As análises incluíram a determinação do diâmetro das amostras ultrafinas, inferior a 0,044 mm, por dispersão de luz dinâmica (DLS). Para a análise da composição química quantitativa das amostras de poeira foi utilizada a Fluorescência de Raio – X por Reflexão Total (TXRF). Para as amostras de áreas não afetadas pelo derramamento de lama ou seja, o alto rio Gualaxo do Norte detectaram-se, nas quatro frações avaliadas, altas concentrações de Ca, Cu, Fe, Mn e Zn, sendo que o Ca e o Fe apresentaram valores de 163400,00 e 9940,00 mg Kg^{-1}, respectivamente; valores estes considerados elevados quando comparados aos demais elementos. Em relação aos elementos avaliados nas amostras de poeira coletadas no médio curso do rio Gualaxo do Norte destacam-se a presença dos elementos Ca, Fe, Mn e Zn, característico da litologia; além do Cu cujos valores detectados variaram entre 13,27 (fração 1, ponto D11) e 5393,00 mg Kg^{-1} (fração 4, ponto D5). Na região do baixo Gualaxo do Norte observou-se que, dentre os quatros pontos avaliados, o D18 apresentou as maiores concentrações de Ca (27310,00 mg Kg^{1}), Fe (15174,00 mg $Kg^{-1)}$, K (1784,00 mg Kg^{-1}) e Mn (382,60 mg Kg^{1}), na fração 4, sendo essa a que apresenta maior risco à saúde devido ao fato de ser também a fração mais fina e portanto, inalável. A partir dos dados obtidos, verificou-se que Ca, Fe, Mn e Zn são os elementos que apresentaram maiores concentrações nas amostras avaliadas. Elementos potencialmente tóxicos como Arsênio e Chumbo foram encontrados em menor proporção e com menor frequência nas amostras coletadas. Sendo assim, as queixas de saúde da população afetada podem estar atreladas não apenas à composição química da poeira proveniente da lama de rejeito disponibilizado pelo rompimento da barragem de Fundão mas também à intensificação da presença de materiais particulados na atmosfera após o desastre da Barragem de Fundão.

Palavras-chaves: rompimento da barragem de Fundão, material particulado, substâncias inorgânicas, consequências a saúde humana

ABSTRACT

The main objective of the present study was to evaluate the dust generation after the deposition of tailings mud in the regions initially affected by the Fundão dam rupture in 2015. This region is inserted in the Gualaxo do Norte river basin, being part of the Iron Quadrangle where intense mineral extraction activity occurs. Eighteen sampling points were selected, covering areas of the river basin (medium and short course) affected by the tailing mud and from unaffected areas (high course), as well. The physical and chemical characteristics of the dust samples collected from July to September 2016 were evaluated. The analyses included the determination of the diameter of the ultrafine samples (less than 0.044 mm), by dynamic light scattering (DLS). The Total Reflection X - Ray Fluorescence (TXRF) was used for the analysis of the quantitative chemical composition of the dust samples. For the areas not affected by the mud spill, that is, the high Gualaxo do Norte River, high contents of Ca, Cu, Fe, Mn and Zn, were detected, despite the sample granulometry. Ca and Fe detected values were 163400, 00 and 9940.00 mg Kg^{-1}, respectively. These values are considerably higher when compared to the other elements. Regarding the chemical composition of the dust samples collected in the middle course of the Gualaxo do Norte river, the presence of elements as Ca, Fe, Mn, and Zn, was observed and, in addition, high contents of Cu in a range of 13.27 (fraction 1, D11) to 5393.00 mg Kg^{-1} (fraction 4, D5) were confirmed. In the lower Gualaxo do Norte region, it was observed that, amongst the four evaluated points, D18 presented the highest concentrations of Ca (27310.00 mg Kg^{-1}), Fe (15174.00 mg Kg^{-1}), K (1784, 00 mg Kg^{-1}) and Mn (382.60 mg Kg^{-1}). Those values were detected in fraction 4, which represents the greatest health risk since it is also the thinnest and therefore, inhalable fraction. From the obtained data, it was verified that Ca, Fe, Mn and Zn are the elements that presented higher concentrations in the evaluated samples. Potentially toxic elements such as Arsenic and Lead were found to a lesser extent and less frequently in the collected samples. Thus, the health complaints of the affected population may be linked not only to the chemical composition of the dust from the tail sludge made available by the Fundão dam disruption but also to the intensification of the presence of particulate matter in the atmosphere after the Fundão Dam disaster.

Keywords: Fundão dam rupture, particulate matter, inorganic substances, human health consequences

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da região pesquisada.....4

Figura 2 - Acidentes em barragens de mineradoras de 2000 a 2015.....9

Figura 3 - Evolução do comércio exterior de bens minerais no Brasil no período de 2013 a 2015. 18

Figura 4 - Principais impactos ambientais gerados por extração mineral e as comunidades urbanas afetadas.....20

Figura 5 - Mapa da localização da Bacia Hidrográfica do Rio Doce. 22

Figura 6 - Gráfico da distribuição das estruturas cadastradas no BDA divididas por bacia hidrográfica no estado de Minas Gerais.....23

Figura 7 - Imagens de satélite da área do Complexo Germano antes e depois do acidente da Barragem de Fundão.....25

Figura 8 - Cabeceira do Rio Gualaxo do Norte. 28

Figura 9 - Casa soterrada no distrito de Paracatu de Baixo.....29

Figura 10 - Aparência das margens do rio Gualaxo após o desastre de Mariana, MG e intervenção para retirada da lama depositada. 30

Figura 11 – Impactos gerados pela extração mineral no estado de Minas Gerais.....33

Figura 12 –Mapa Geológico da Bacia Hidrográfica do Rio do Gualaxo do Norte 36

Figura 13 - Mapa de Uso e Ocupação da Bacia Hidrográfica do Rio Gualaxo do Norte. 38

Figura 14 - Imagem da área de estudo com os pontos de amostragem georreferenciada 40

Figura 15 – Distribuição dos pontos de amostragens realizados neste trabalho. 43

Figura 16 - Tubos de Falcon com as amostras sólidas e vidros com os líquidos extraídos de cada amostra. 46

Figura 17 - Curva de distribuição granulométrica por peneiramento da fração granulométrica da amostra de Antônio Pereira (Solo S1) 50

Figura 18 – Curva de distribuição granulométrica por peneiramento da fração granulométrica da amostra de Gesteira. 52

Figura 19 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto S1 (Antônio Pereira) para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 > X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044. 54

Figura 20 – Tamanho das partículas e índice de polidispersão das amostras de poeira (Fração 4, X < 0,044 mm) coletadas nos pontos D1 à D18. 61

Figura 21 - Ocorrência de elementos químicos nas amostras analisadas (%) 65

Figura 22 – Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D1 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 > X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044. 67

Figura 23 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D2 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 > X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044. 68

Figura 24 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D3 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 > X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044. 69

Figura 25 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D4 e D5 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 > X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044. 71

Figura 26 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D6 e D7 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 > X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044. 72

Figura 27 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D8 e para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 >X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044.....73

Figura 28 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D10 e D11 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 >X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044.....74

Figura 29 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D12 e D13 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 >X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044.....75

Figura 30 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D14 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 >X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044.....76

Figura 31 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D15 e D16 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 >X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044.....79

Figura 32 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D17 e D18 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 > X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044.....80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Quadro 1 - Desastres envolvendo rompimento de barragem no mundo desde 2000. 12

Tabela 2 - Resultado da distribuição granulométrica por peneiramento da amostra de Antônio Pereira. 50

Tabela 3 – Resultado da distribuição granulométrica por peneiramento da amostra de Gesteira (Solo S2). 52

Tabela 4 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto S1 (Antônio Pereira). 53

Tabela 5 - Resultado da análise do ponto S2 (Gesteira) através do ICP. 54

Tabela 6 – Caracterização granulométrica das amostras de poeira avaliadas 58

Tabela 7 – Peso e distribuição percentual de cada amostra em função da fração avaliada. 60

Tabela 8 – Frequência dos elementos em ordem crescente presentes nas diferentes frações granulométricas das amostras coletadas. 64

Tabela 9 – Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D1..... 66

Tabela 10 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D2. 68

Tabela 11 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D3. 69

Tabela 12 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D4 e D5. 71

Tabela 13 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D6 e D7. 72

Tabela 14 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D8 e D9. 73

Tabela 15 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D10 e D11. 74

Tabela 16 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D12 e D13 75

Tabela 17 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D14. ... 76

Tabela 18 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D15 e D16. 79

Tabela 19 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D17 e D18. 80

LISTA DE QUADROS

Tabela 1 Quadro 1 - Desastres envolvendo rompimento de barragem no mundo desde 2000. 12

Quadro 2 - Descrição dos pontos amostrados na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte/MG 45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

2 JUSTIFICATIVA 5

3 OBJETIVOS 8

3.1 OBJETIVO GERAL 8

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 8

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 9

4.1 DESASTRES EM BARRAGENS MINERÁRIAS NO MUNDO 9

4.2 ATIVIDADE MINERADORA NO BRASIL 17

4.3 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE 21

4.4 O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO 24

4.5 PANORAMA GERAL DOS IMPACTOS 27

4.6 CIDADES MAIS AFETADAS 28

4.7 EFEITO DA DEPOSIÇÃO DA LAMA 30

4.8 A POEIRA E SEUS IMPACTOS À SAÚDE 31

5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 34

5.1 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA BACIA DO RIO GUALAXO DO NORTE 34

5.2 ATIVIDADES ECONÔMICAS 37

6 MATERIAIS E MÉTODOS 42

6.1 ÁREA DE ESTUDO E PONTOS DE AMOSTRAGEM 42

6.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE POEIRA 46

6.3 ANÁLISES DAS AMOSTRAS DE SOLO DE GESTEIRA E ANTÔNIO PEREIRA 47

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO 49

7.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM 49

7.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE SOLO DE ANTÔNIO PEREIRA E GESTEIRA 49

7.3 CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS DE POEIRA 58

7.3.1 PENEIRAMENTO DAS AMOSTRAS 58

7.3.2 TAMANHO DAS PARTÍCULAS 59

7.3.3 CONCENTRAÇÃO DE METAIS 63

8 CONCLUSÕES 85

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 87

ANEXO 1 95

ANEXO 2 98

ANEXO 3 99

ANEXO 4 103

1 INTRODUÇÃO

O estado de Minas Gerais (MG) enfrentou um grande desastre ambiental em novembro de 2015, tal evento foi considerado como sendo o de maior magnitude ocorrido, até o momento, no estado e no país. Este desastre foi causado pelo rompimento de um dos diques da barragem de rejeito de Fundão da mineradora Samarco, no município de Mariana. O rompimento fez com que o volume de lama atingisse toda a extensão da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD), chegando ao litoral do Espírito Santo, cerca de 16 dias após o desastre. Inicialmente estimou-se que aproximadamente 32 milhões de m^3 de lama, constituída de rejeitos e água, tenham sido depositados ao longo a BHRD. Dados mais atuais apontam para valores superiores a 40 milhões de m^3.

A BHRD possui uma área de drenagem de 86.715 Km^2, a maior parte do seu território, cerca de 86% encontra-se localizada em MG e, os outros 14% no estado do Espírito Santo (ES). Sua vasta superfície e extensa biodiversidade fazem da mesma uma das bacias mais populosas, apresentando um número estimado de 3,5 milhões de habitantes. Também trata-se de uma região com importantes atividades econômicas, como agricultura, geração de energia, mineração, produção de alimentos e siderurgia (CBHDOCE, 2016).

Diante do exposto é imperativo que o grande volume de rejeito que foi movimentado afetasse severamente muitas pessoas que vivem no domínio dos territórios atingidos. Os rios que formam a BHRD foram drasticamente acometidos, substancialmente a Bacia Hidrográfica do Rio Gualaxo do Norte (BHRGN), localizada a jusante da barragem de Fundão, um dos primeiros corpos hídricos a receber o aporte de rejeitos. Destaca-se que a BHRGN se encontra no Quadrilátero Ferrífero, perpassa por três municípios, sendo eles, Ouro Preto, Mariana e Barra Longa e apresenta uma extensão de 60 km, dos quais 48 km foram atingidos pela lama.

Visivelmente a ruptura de um dos diques de Fundão causou danos ambientais de grande magnitude para os meios físico, biótico e socioeconômico, porém as consequências foram além; inúmeros relatos de perturbações à saúde das populações foram registrados. Moradores se queixaram que os depósitos de lama,

sobrepostos nas ruas das cidades atingidas eram responsáveis pela produção excessiva poeira, que se intensificava durante o processo de remoção destes resíduos sólidos.

Segundo a organização Greenpeace (2017) os funcionários da Secretaria Municipal de Saúde de Barra Longa (Figura 1), uma das cidades mais afetadas pela lama, relataram ter ocorrido, cerca de dois meses após o desastre, um surto de dengue na cidade, especificamente 300 ocorrências (dados não publicados). Além disso, houve também aumento nos atendimentos de casos relacionados a afecções do aparelho respiratório, averiguou-se um aumento de 300% quando comparado aos dados referentes ao mesmo tipo de atendimento no ano precedente ao desastre. Dados estes reconhecidos e certificados por uma pesquisa epidemiológica em saúde, disponibilizada pela vigilância sanitária, através do software EPI INFO, em julho de 2016.

Poeira é uma terminologia geral para se designar um tipo de material particulado; em concordância com Baird (2002) diversos termos são empregados para intitular as partículas em suspensão ou material particulado atmosférico, os termos "poeira" e "fuligem" atribuem-se aos sólidos; enquanto os termos "névoa" e "neblina" referem-se aos líquidos. Material particulado constitui uma mistura complexa de substâncias orgânicas e inorgânicas, podem ser encontradas nos estados líquidas ou sólidas e caracterizadas de acordo com a origem, composição e diâmetro das partículas. É conveniente classificar partículas pelo tamanho, uma vez que essa propriedade influencia o transporte e remoção; a capacidade de penetração e deposição dentro do sistema respiratório e está associado a sua origem e composição química (WHO, 2013).

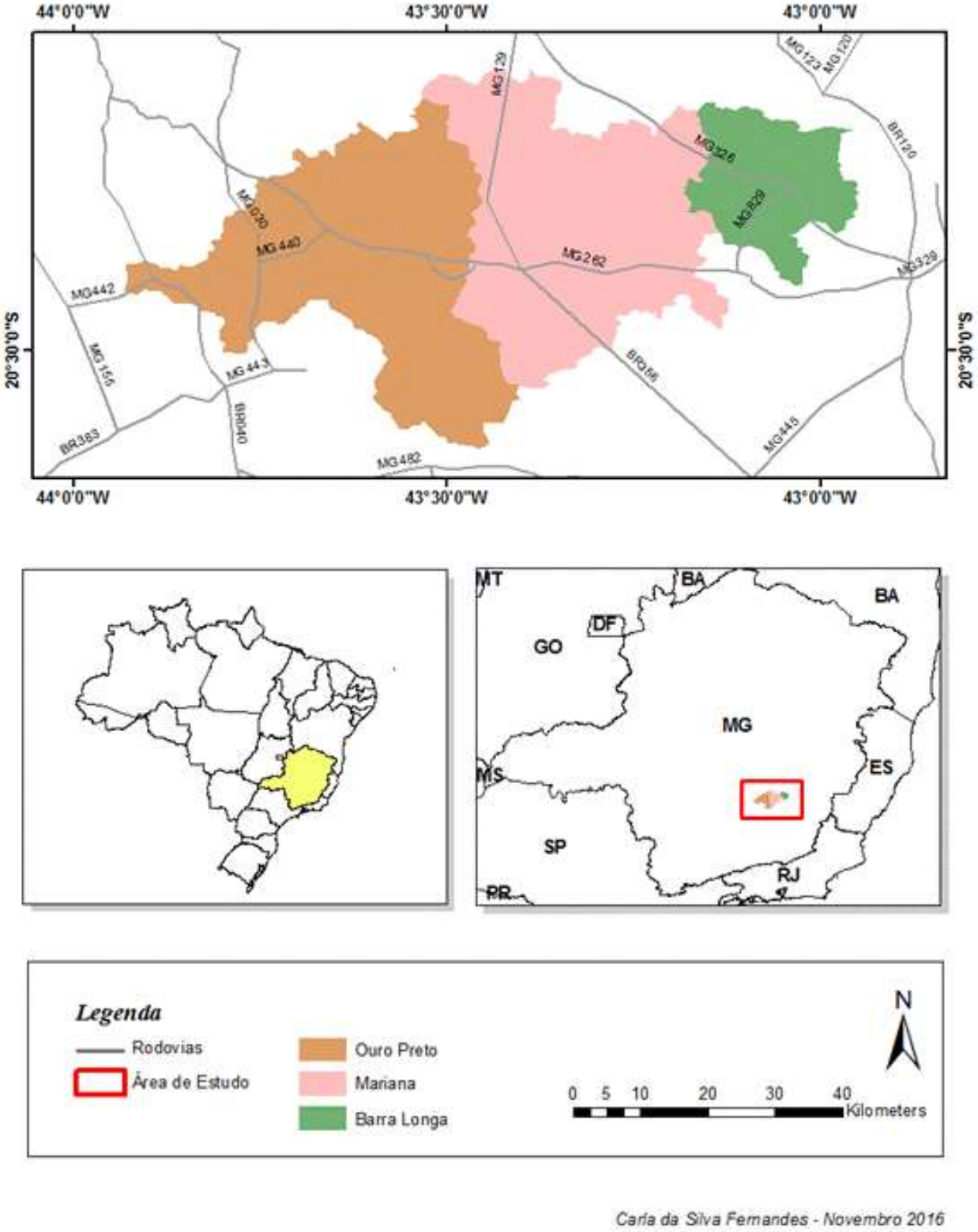
No caso específico do desastre, o volume que atingiu a superfície causou o revolvimento de elementos que se encontravam depositados no solo e sedimentos de rio; demonstrado pelo estudo realizado por Canatto e Nalini (2017), que detectaram aumento expressivo do elemento ferro (Fe) em sedimentos localizados na BHRGN, a jusante da barragem. Conforme descrito por Costa (2001), as concentrações de elementos como Fe, Mn, Au e metais traço são naturalmente elevadas nessa Bacia devido características geológicas da região. Os depósitos minerais que sofrem extração, principalmente do ouro, e também do ferro,

apresentam associações minerais ricas em metais traço, os quais apresentam alto potencial tóxico.

Araújo, *et al*. (2017) em uma pesquisa de análise da composição química de amostras de sedimentos, realizada pós desastre, também apontou a ocorrência de elementos químicos de origem geogênica, como Al, K, Ca, Mg, principalmente nas frações mais finas. Assim, ao que tudo indica, o rompimento de barragem pode ter contribuído para uma maior disponibilidade de elementos tóxicos e a exposição da população da região a estes elementos. Dessa forma, é possível que alguns componentes tóxicos, como metais e metalóides, possam ser encontrados na composição química da poeira formada após a dessecação da lama depositada.

Diante do contexto apresentado, a proposta desse trabalho é avaliar as características físicas e químicas da poeira, gerada a partir da deposição da lama pós desastre, com o principal objetivo de discutir sobre uma possível associação de tais características aos impactos à saúde dos moradores das áreas afetadas.

Figura 1 – Mapa de localização da região pesquisada.



Fonte - Própria autora, 2016.

2 JUSTIFICATIVA

O conhecimento sobre os problemas ambientais causados pelo setor minerário e, especificamente, sobre aqueles relacionados a rompimentos de barragens no Brasil é limitado, o que impossibilita prever a grandeza e extensão dos impactos ambientais e sociais gerados por desastres com essas características no país.

No alto curso do rio Gualaxo do Norte encontram-se implantadas as minas de Timbopeba e Alegria, pertencentes à empresa VALE S.A e à unidade Germano da empresa Samarco Mineração, além destas minas, operando em condições arcaicas, encontram-se ainda alguns garimpos de ouro. Segundo Costa (2001) os depósitos minerais que sofrem extração, tanto do ouro como do ferro, apresentam associações minerais ricas em metais traço os quais apresentam alto potencial tóxico. Estes elementos são inicialmente encontrados incorporados nas rochas e são, posteriormente, mobilizados para águas e sedimentos dos rios, com velocidade de mobilização e transporte intensificada pelas atividades extrativistas.

Segundo Rhodes (2010) os sedimentos do rio Gualaxo do Norte contém altos teores de As, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb e Zn que podem estar associados aos depósitos minerais de ferro, manganês e ouro na região da bacia. Contudo, a extração mineral por garimpo acelera o processo de lixiviação de elementos traço, tornando-os disponíveis para a água, solo e sedimento.

Com o acidente de Fundão, o vazamento do rejeito revolveu os sedimentos do rio podendo favorecer a exposição dos elementos tóxicos aos habitantes da região. De acordo com Freitas (2014) os estudos acerca dos impactos provenientes de desastres, na saúde humana, apontam que estes atingem as populações de forma díspar, direta e indiretamente, com implicações que podem variar de acordo com a escala temporal, a depender das características do evento e das condições de vulnerabilidade socioambiental da região. Esta última, resulta de processos sociais (condições de vida e proteção social) e mudanças ambientais (degradação ambiental).

Segundo a Greenpeace (2017) é dessa mesma maneira que decorrem com os impactos gerados pelo rompimento da barragem de Fundão sobre a saúde

humana em Barra Longa. Uma vez que a mistura de rejeito, detritos de vegetação e sedimentos foram depositados na área de inundação do rio e nas ruas das cidades à jusante da barragem, posteriormente, essa mistura secou e, com o auxílio dos fortes ventos, característicos do período de seca, favoreceu-se a produção de poeira.

A denominação geral de Material Particulado (MP) se emprega a uma classe de poluentes constituída de poeiras, fumaças e todo tipo de material sólido e líquido que, devido ao seu pequeno tamanho, se mantém suspenso na atmosfera (CETESB, 2018). A legislação brasileira, até 1989, preocupava-se apenas com as "Partículas Totais em Suspensão", ou seja, partículas menores que 100µm que se mantém suspensas no ar. Entretanto, pesquisas atuais, mostram que aquelas mais finas, em geral as menores que 10µm, penetram mais profundamente no aparelho respiratório e são as que apresentam, efetivamente, mais riscos à saúde. Com isso, a legislação brasileira passou também a se preocupar com as "Partículas Inaláveis", a partir de 1990 (FEAM, 2001).

Pesquisadores do mundo todo têm investigado os efeitos do material particulado em suspensão na atmosfera sobre a saúde humana (WHO, 2013), principalmente aquelas de menor tamanho (menores que 100 µm), as quais podem ser facilmente inaladas, penetrando até os alvéolos pulmonares (menores que 10µm), além de serem frequentemente descritas como causa de doenças cardiovasculares (CHAN *et al*, 2001; ENGLERT, 2004). Além do tamanho das partículas em suspensão, merece atenção a sua composição química. Partículas sólidas, contendo elementos potencialmente tóxicos, se ingeridas ou inaladas são potencialmente danosas à saúde.

Um indicador que expressa o risco de contaminante para a saúde humana é a bioacessibilidade (ADRIANO *et al*., 2014). Porém, pesquisas relativas à bioacessibilidade e biodisponibilidade de contaminantes inorgânicos em partículas sólidas e, sobretudo, em resíduos de mineração são ainda incipientes. Menos disponíveis ainda são os dados relativos a eventos pontuais, como o desastre de Fundão.

Diante da carência de metodologia científica que sistematiza os possíveis efeitos e danos causados por rompimento de barragens e, levando em consideração,

a intensa atividade minerária na BHRGN e ainda os potenciais riscos à saúde, decorrentes da exposição das populações das regiões minerados a potenciais agentes tóxicos carreados pelas partículas em suspensão na atmosfera, o desenvolvimento desse trabalho se justifica devido a necessidade do desenvolvimento de pesquisas que busquem compreender os possíveis impactos relacionados a presença de MP, que podem ser gerados a partir do rompimento de estruturas de grande porte. Além disso a geração de bancos de dados com informações mais concisas pode ainda contribuir para as futuras ações de recuperação.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos da deposição da lama de rejeito na contaminação do ar, nas regiões inicialmente afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão visando compreender os possíveis efeitos do desastre nesse compartimento ambiental.

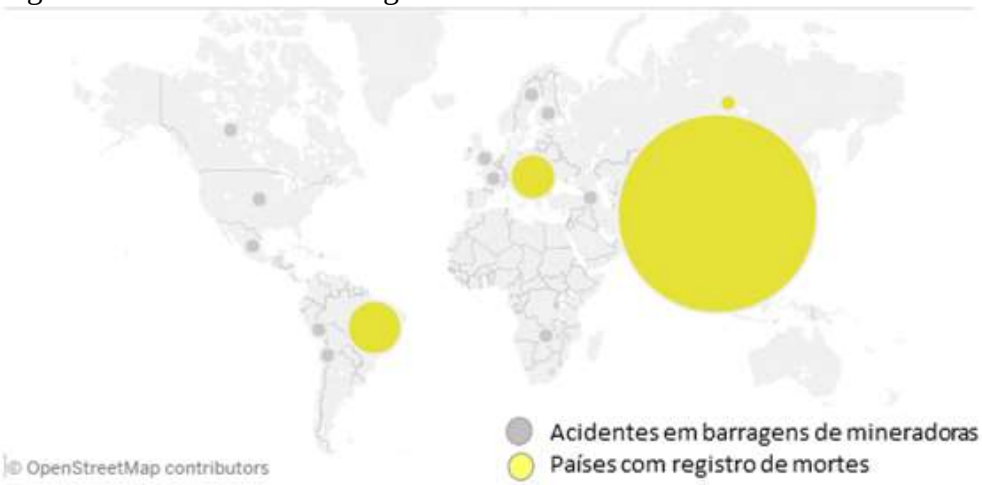
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Documentar e avaliar os impactos da contaminação ambiental entre os municípios de Mariana e Barra Longa em consequência do colapso da barragem de Fundão;
- Coletar amostras de material particulado (MP) ao longo da área mapeada após definição de pontos de amostragem a partir do mapeamento da Bacia Hidrográfica do Rio Gualaxo do Norte.
- Caracterizar o material coletado por meio de análises físicas e químicas.
- Averiguar concentração e frequência de elementos químicos, principalmente os potencialmente tóxicos, em cada ponto de amostragem.
- Investigar possíveis correlações entre a localização geográfica e as características fisico-químicas e/ou a composição química e o tamanho das partículas.
- Correlacionar a composição química e características físicas das amostras coletadas com as queixas de saúde da população atingida.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 DESASTRES EM BARRAGENS MINERÁRIAS NO MUNDO

Figura 2 - Acidentes em barragens de mineradoras de 2000 a 2015.



Fonte: TABLEAUPUBLIC, 2015 (modificado)

No cenário da mineração, diversos países já enfrentaram situações decorrentes do derramamento de rejeito, como apresentado pela Figura 2.

Uma das piores rupturas de barragem de rejeitos do mundo foi na planta de alumina, em Ajka, Hungria. O reservatório contendo 30 milhões de m^3 de rejeitos de bauxita entrou em colapso no dia 4 de outubro de 2010, liberando cerca de 0,7 milhões de m^3 de rejeitos, culminando em grandes impactos ambientais. A mistura de lama e água se propagou no vale do rio Torna; a vila de Kolontár foi imediatamente soterrada, causando mortes e mais de 100 feridas, o contingente de 123 desabrigadas. Adicionalmente, afetou outras 790 pessoas (RIBEIRO, 2015; RUYTERS *et al*., 2011).

O rejeito da barragem é produzido a partir da transformação da bauxita em alumina, resultando em um pH altamente alcalino (pH=13) e alto teor de metais pesados como, arsênio, mercúrio e cromo, tendo o abastecimento de água da região comprometida. Concomitante a essa tragédia humana, rios e terras foram contaminados implicando em mortes de peixes dos rios e córregos à jusante. Estima-se que 800 ha de terras agrícolas foram cobertos por uma camada de lama vermelha e, conforme alguns estudos relacionados ao acidente, a inalação de pó de lama vermelha

suspensa é um risco para a saúde humana (RIBEIRO, 2015; RUYTERS *et al*., 2011; GELENCSÉR, 2011).

Outro evento envolvendo ruptura de barragem, ocorreu no dia 17 de dezembro de 2012, na antiga mina de cobre da Mineradora Gullbridge Cooper Mine. O rompimento sucedeu enquanto eram realizados trabalhos para sua estabilização. Como resultado, a água no lago derramou em poucas horas e uma pequena quantidade de rejeito vazou. Constataram que, provavelmente, toda a água expelida do reservatório (volume estimado em 100.000 m^3) foi drenada até o rio South Brook que distava cerca de 500 m da barragem; enquanto os rejeitos situavam, aproximadamente, 100 m desta. A ruptura da barragem gerou grande impacto no abastecimento de água da cidade de South Brook, tornando a água imprópria para consumo humano. A fim de garantir a segurança dos moradores da cidade de South Brook contra qualquer potencial contaminação, foi emitido um aviso de não consumo da mesma (MAE, 2017).

Cerca de dois anos após esse evento, no dia 4 de agosto de 2014, a barragem da mina Mount Polley, sob responsabilidade da Imperial Metals, entrou em ruptura, provocando a liberação de 25 milhões de m^3 de material, dentre eles, água e rejeitos de ouro. Um dos efeitos ambientais gerados foi a deposição de uma mistura de rejeito, água e detritos vegetais nos rios à jusante da barragem, afetando a qualidade da água (IMPERIAL METALS, 2017)

No mesmo ano, a barragem B1, pertencente à mineração Herculano, entrou em ruptura no dia 10 de setembro no município de Itabirito, Minas Gerais, Brasil. O rompimento ocasionou graves impactos em córregos da bacia hidrográfica do Rio das Velhas, a qual abastece a região metropolitana de Belo Horizonte. De acordo com a publicação do Jornal O Tempo (2015), esse desastre provocou a morte de 3 operários, contaminou as águas dos rios e afluentes da bacia localizada à jusante da barragem, interrompeu o abastecimento da água, além de gerar perda irreversível para flora e prejuízos para a fauna.

Com intuito de resumir os desastres envolvendo barragens minerárias no mundo, foi elaborado o Quadro 1, apresentado a seguir, com uma breve descrição dos principais casos históricos resgatados da literatura dos últimos anos. A descrição realizada procurou ressaltar os impactos e efeitos envolvidos na ruptura de barragens,

cujos dados foram retirados do site WISE Uranium Project. Foi constatado que, na maioria dos casos pesquisados, as descrições dos eventos são limitadas a relatos de testemunhas e, geralmente, os acontecimentos são obscuros, dificultado a compreensão da sequência do fenômeno.

Os eventos históricos relacionados com rompimento de barragens apresentado causaram diversos impactos ambientais expressivos alcançando áreas de grandes proporções, além de causar danos irreparáveis a população circunvizinha.

Especificamente sobre o rompimento da barragem de Fundão, no relatório da Greenpeace (2015) relata-se que o rompimento de barragens é uma categoria de desastres notadamente reincidente na história da humanidade, e o evento pode ser gerado por duas principais causas: uma ocorrência natural intensa com capacidade de abalar as estruturas da barragem ou falhas no planejamento dessas estruturas que entra em colapso de forma independente de fatores externos. De acordo com Poemas (2015) os diversos estudos, amplamente divulgados pela imprensa, indicaram várias circunstâncias para o desastre de Mariana, como erros técnicos de engenharia, resoluções relativas a gestão dos resíduos da mineração, escolhas político-administrativa da empresa.

A apropriada gestão da disposição de rejeitos minerários é, portanto, fundamental e deve ser empregada em toda vida útil, desde a implantação da barragem, avaliação dos riscos, o estudo da área a ser implantada, controle e fiscalização até após a desativação, além do levantamento da população circunvizinha e à jusante. O planejamento dos fatores de riscos ambientais e o custo que a empresa irá arcar com um possível rompimentos de sua barragem também deve ser levanto em consideração, uma vez que as medidas para evitar tais eventos podem ser priorizados.

Tabela 1 Quadro 1 - Desastres envolvendo rompimento de barragem no mundo desde 2000.

Data	País	Tipo de minério	Derramamento	Impactos	Referências
30, junho de 2017	Israel	Fosfato	100,000 m^3 de águas residuais acidificadas	As águas residuais tóxicas atravessaram o rio Ashalim e afetaram mais de 20 km de extensão a fauna e flora.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
12, março de 2017	China	Cobre, ouro, prata, ferro	200,000 m^3 de rejeitos	Os rejeitos inundaram a lagoa de peixes a jusante de 27 hectares. Duas pessoas foram mortas e uma desapareceu.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
27, agosto de 2016	USA	Fosfato	840,000 m^3 de líquido contaminado (a partir de 17 de setembro de 2016)	-	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
8, agosto de 2016	China	Bauxita	-	Aldeia próxima totalmente submersa pela lama vermelha, cerca de 300 aldeões foram evacuados e houve mortes de animais domésticos.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
21, novembro de 2015	Myanmar	Jade	-	Pelo menos 113 pessoas morreram.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
5, novembro de 2015	Brasil	Ferro	32 milhões de m^3	Onda de lama inundou a cidade de Bento Rodrigues, destruindo 158 casas, pelo menos 17 pessoas mortas e 2 desaparecidas; a lama contaminou a bacia do rio Doce, destruindo 15 Km^2 do solo ao longo dos rios e afetou o abastecimento de água potável.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
10, setembro de 2014	Brasil	Ferro	-	Contaminação do rio a jusante. 2 trabalhadores mortos e um desaparecido.	BROWN, David. et al, 2012
7, agosto de 2014	México	Cobre	40,000 m^3 de sulfato de cobre	O rejeito fluiu para o rio Bacanuchi de 420 km de extensão, afetou um afluente do rio Sonora, impactando diretamente 800 mil pessoas.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html

4, agosto de 2014	Canadá	Cobre, ouro	24,4 milhões de m^3 de material	Os rejeitos escoou para o Lago Polley, rio Hazeltine Creek e para o lago Quesnel.	Imperial Metals: https://www.imperialmetals.com/
2, fevereiro de 2014	USA	Carvão	Cerca de 82.000 t de cinzas tóxicas de carvão e 27 milhões m^3 de água contaminada	Cinzas de carvão fluiram através de tubos de drenagem para o rio Dan.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
15-19, novembro de 2013	Armênia	Cobre, molibdênio	-	O rejeito escoou para o rio Norashenik durante vários dias.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
31, outubro de 2013	Canadá	Carvão	670,000 m^3 de águas residuais e 90 000 t de lama	Material contendo partículas finas de carvão, argila e metais pesados nos rios à jusante da barragem.	Obed Mountain Mine https://obed.ca/
17, dezembro de 2012	Canadá	Cobre	-	-	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
4, novembro de 2012	Finlândia	Níquel (subproduto de urânio)	Centenas de milhares de metros cúbicos de águas residuais contaminadas	As águas residuais deslizaram para o rio Snow excedendo (100 vez mais) as concentrações de níquel, zinco e urânio.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
21, julho de 2011	China	Manganês	-	Os rejeitos danificaram estradas e casas residenciais, forçando 272 pessoas a sair da região. O material drenou até o rio Fujiang, deixando 200 mil pessoas sem abastecimento de água potável	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
4, outubro de 2010	Hungria	Bauxita	700,000 m^3 de lodo vermelho cáustico	Várias cidades inundaram (8 Km^2 de extensão). 10 pessoas morreram e aprox. 120 pessoas feridas.	GELENCSÉR, 2011
25, junho de 2010	Peru	-	21.420 m^3 de rejeitos	Contaminação do rio Escalera e do rio Opamayo a 110 km jusante.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html

29, agosto de 2009	Rússia	Ouro	Mais de 1 milhão de m^3 de água, 150.000 m^3 de rejeitos e 55.000 m^3 de materiais de barragens.	11 casas foram levadas pelo fluxo de lama. Pelo menos uma pessoa foi morta.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
14, maio de 2009	China	Manganês	-	O deslizamento de terra provocado pela falha da barragem de rejeito destruiu uma casa, matando três e ferindo quatro pessoas.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
22, dezembro de 2008	USA	Carvão	5,4 milhões de m^3	As cinzas de carvão cobriram 1,6 Km^2 com uma altura de 1,83 m. As linhas de energia foram derrubadas pela onda de cinza, cobriu a rodovia Swan Pond, danificou 12 casas.	RIBEIRO, V.Q.F, 2015
8, setembro de 2008	China	Ferro	-	Um deslizamento de terra enterrou um mercado, várias casas e um prédio de três andares. 254 pessoas foram mortas e 35 ficaram feridas.	RIBEIRO, V.Q.F, 2015-
10, janeiro de 2007	Brasil	Bauxita	2 milhões de m^3 de lama	O fluxo de lama deixou cerca de 4000 habitantes das cidades de Miraí e Muriaé sem-teto. Culturas e pastagens foram destruídas e o abastecimento de água foi comprometido em cidades nos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro.	BROWN, David. et al, 2012
6, novembro de 2006	Zâmbia	Cobre	-	Liberação de rejeito altamente ácidos no rio Kafue, aumentando as concentrações de cobre, manganês, cobalto na água do rio, interropendo o abastecimento de água potável das comunidades à jusante.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html

30, abril de 2006	China	Ouro	-	O deslizamento de terra enterrou cerca de 40 quartos de nove casas, deixando 17 desabrigados, 5 pessoas feridas. Mais de 130 residentes locais foram evacuados. O cianeto de potássio tóxico foi liberado no rio Huashui, contaminando-o aproximadamente 5 km à jusante.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
14, abril de 2005	USA	Fosfato	aprox. 17 milhões de galões de líquido ácido (64.350 m^3)	Líquido derramado em terras pantanosas adjacentes, causando a destruição da vegetação.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
30, novembro de 2004	Canadá	Mercúrio	6.000 a 8.000 m^3 de rocha, lama e águas residuais.	Material derramado em 5.500 hectares no Lago Pinchi.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
5, setembro de 2004	USA	Fosfato	227,000 m^3 de líquido ácido	Líquido derramado no rio Archie Creek que leva a praia de Hillsborough.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
22, maio de 2004	Rússia	Carvão	Aproximadamente 160 mil m^3 de cinzas	As cinzas escoaram para um tributário do rio Partizanskaya que esvazia na Baía de Nahodka em Primorski Krai (leste de Vladivostok).	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
20, março de 2004	França	Bacia de decantação e evaporação da planta de conversão de urânio	30 mil m^3 de lodos	O lodo deslizou até o canal de Tauran por várias semanas, elevadando a concentração de nitrato de até 170 mg/L.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
3, outubro de 2003	Chile	Cobre	50,000 t de rejeito	O rejeito contaminou 20 km a jusante do rio La Ligua.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html

27, agosto / 11, setembro de 2002	Filipinas	-	50.000 mil toneladas de rejeito	27 de agosto: alguns rejeitos derramados no lago Mapanuepe e eventualmente no Sto. Rio Tomas. 11 de setembro: aldeias foram inundadas com resíduos da mina e 250 famílias desabrigadas.	RIBEIRO, V.Q.F, 2015
22, junho de 2001	Brasil	Ferro	-	A onda de rejeito percorreu cerca de 6 km, matando 2 trabalhadores de minas e 3 trabalhadores estão desaparecidos.	RIBEIRO, V.Q.F, 2015; BROWN, David. et al, 2012
18, outubro de 2000	China	-	-	15 pessoas mortas, 100 desaparecidas e mais de 100 casas destruídas.	RIBEIRO, V.Q.F, 2015
11, outubro de 2000	USA	Carvão	950,000 m^3 de resíduos de carvão	O rejeito chegou ao rio Tug Fork do Big Sandy River e alguns dos seus afluentes. Alterou a turbidez, cerca de, 120 km, causando a morte de peixe e interrupção do abastecimento da água potável.	RIBEIRO, V.Q.F, 2015
8, setembro de 2000	Suécia	Cobre	4 milhões de m^3 de lodo e água		Tailings Mine Info www.tailings.info/knowledge/accidents.htm
10, março de 2000	Roménia		22.000 t de rejeitos contaminados com metais pesados	Contaminação do córrego de Vaser, afluente do rio Tisza.	Wise Uranium Project: https://www.wise-uranium.org/mdafu.html
30, janeiro de 2000	Roménia	Recuperação de ouro de rejeitos antigos	100,000 m^3 de líquido contaminado com cianeto	Contaminação do rio Somes/Szamos, afluente do rio Tisza, matando toneladas de peixe e afetando o abastecimento da água potável de mais de 2 milhões de pessoas.	RIBEIRO, V.Q.F, 2015

Fonte: Própria autora, 2017.

4.2 ATIVIDADE MINERADORA NO BRASIL

A Mineração foi uma das primeiras atividades econômicas no Brasil no séc. XVIII quando o país era colônia de Portugal. Como os colonizadores já conheciam as técnicas de mineração encontraram uma grande oportunidade de gerar riqueza com a extração dos recursos minerais do Brasil. A atividade mineradora começou a ter domínio na economia com a extração de ouro e diamante em Goiás, Mato Grosso e principalmente em Minas Gerais. De acordo com o IBRAM (2015) atualmente, a mineração no Brasil é representada fortemente pela exploração de minério de ferro, ouro e nióbio. Além disso, por possuir uma extensão continental e admirável diversidade geológica que propiciou à formação de jazidas de vários minerais, o Brasil se destaque no âmbito mundial, tanto em reservas quanto em volume minerado.

A atividade mineral foi um dos segmentos industriais considerados como prioritário pelo governo brasileiro, visto que é um dos maiores países produtores minerais do mundo. Grande parte da sua produção é exportada, apresentando crescimento na produção e aumento do preço de forma exponencial. Desta maneira tem grande importância para a balança comercial do Brasil (ARAÚJO; OLIVIERI; FERNANDES, 2014).

A Figura 3 mostra a evolução do comércio exterior do setor mineral brasileiro. A partir de 2014 a balança comercial sofreu com uma expressiva queda nas exportações e saldo comercial, o que afetou o mercado de trabalho, bem como o desempenho de arrecadação da compensação financeira por exploração de recursos minerais (CFEM) ou *royalties* da mineração (DNPM, 2015).

Figura 3 - Evolução do comércio exterior de bens minerais no Brasil no período de 2013 a 2015.

Fonte: DNPM (2015) (modificado), 2016.

As vendas de minério de ferro são responsáveis por grande parte na arrecadação do CFEM. No *ranking* das dez substâncias que mais destacam nas receitas do CFEM figuram, além do ferro: cobre, alumínio, ouro, calcário dolomítico, granito, água mineral, fosfato, areia e gnaisse. Essas substâncias representaram cerca de 87,4% de *royalty* da mineração, 53,5% desse valor refere-se à contribuição do minério de ferro (DNPM, 2015).

Os estados que mais se beneficiaram em 2016 com a arrecadação de CFEM foram Minas Gerais (48,41%) e Pará (28,52%), que possuem megaempreendimentos produtores de minério de ferro, seguindo por Goiás, São Paulo e Mato Grosso do Sul (SANTANA, 2016).

De acordo com Nazário (2016), a arrecadação de *royalties* contribui significativamente para o desenvolvimento dos municípios minerados. Isso foi concluído mediante o estudo realizado com municípios onde há e não atividade de mineração, e seus índices: Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM), que considera três indicadores: longevidade, educação e renda; e Índice de Firjan de Desenvolvimento Municipal (IFDM), que se baseia em três áreas de atuação: emprego e renda, educação e saúde.

Segundo Dias (2016), os indicadores mostram valores positivos no desenvolvimento, no entanto é necessário introduzir uma gestão estratégica a fim de enfrentar os desafios a curto, médio e longo prazo, uma vez que a qualidade de vida da população não teve aumento significativo. Portanto, é necessário reforçar a cultura de construção coletiva entre os três setores: a sociedade civil, Estado e empresas, em busca não apenas da expansão de infraestrutura urbana e social, mas também do desenvolvimento sustentável.

De acordo com Alves, Pereira e Araújo (2016) independente da elevada importância da mineração no Brasil e seu alto risco ambiental e social, discussões sobre desenvolvimento sustentável estão restritas somente a grandes empresas de mineração. Ressaltam ainda, que os relatórios de sustentabilidade são escassos no pais e que as indústrias extrativistas devem investir no desenvolvimento de métodos e técnicas para mitigar os impactos ambientais, sem descuidar de questões econômicas e sociais, além de ampliar o envolvimento da empresa com as comunidades a fim de buscar práticas mais sustentáveis.

Apesar de indubitavelmente gerar riqueza e favorecer o desenvolvimento do território onde se realiza a exploração, a indústria extrativa mineral está entre as atividades antrópicas que mais causam impactos sociais, econômicos e ambientais negativos. Um estudo realizado com 105 empreendimentos minerários (de diferentes tipos), em 22 estados das cinco regiões brasileiras possibilitou uma sistematização da dimensão dos impactos gerados por mineradoras e revelou os efeitos mais significativos entre os casos estudados, bem como as comunidades mais afetadas, (Figura 4) (ARAÚJO; OLIVIERI; FERNANDES, 2014).

Figura 4 - Principais impactos ambientais gerados por extração mineral e as comunidades urbanas afetadas.

Fonte: ARAÚJO; OLIVIERI; FERNANDES (2014) (modificado), 2016.

Esse estudo ainda retratou que o Sudeste apresenta a maior concentração de casos dos impactos da extração mineral no Brasil. Desta região, o destaque cabe a Minas Gerais que situa em primeiro lugar no *ranking* do número dos estudos de caso (ARAÚJO; OLIVIERI; FERNANDES, 2014). De acordo com dados apurados pelo DNPM (2016) das 8.870 empresas mineradoras no país, 3.609 estão no Sudeste, cerca de 40% do total. Esta região tem aproximadamente 80 milhões de habitantes segundo o último senso do IBGE em 2010. A ocupação populacional ocorreu principalmente devido a mineração. Segundo o IBRAM (2015) o estado de Minas Gerais é o maior estado minerador do Brasil e deu início ao processo de atração populacional. Dos dez maiores municípios minerados, sete são mineiros, além disso o estado possui a maior produção de minério de ferro, ouro, zinco, fosfato e nióbio.

O Quadrilátero Ferrífero (QF) é uma região localizada no centro-sul de Minas Gerais que de acordo com Azevedo (2012) abriga a maior concentração urbana do estado, sendo a mineração a base no ponto de vista socioeconômico desses municípios. Isso ocorre porque o QF é um território pré-cambriano com privilégio em recursos minerais, em especial ferro e ouro (AZEVEDO, 2009).

No entanto, com a intensa exploração mineral os impactos no meio ambiente gerados são relevantes, em especial a degradação da qualidade da água dos recursos hídricos, além dos problemas de escassez decorrentes do crescimento populacional da região. Parte BHRD está inserida no território do QF e sofre diversas perturbações ambientais causados por ações antropogênicas, principalmente através das atividades minerárias. Recentemente a BHRD foi diretamente impactada com o rompimento da

barragem de Fundão, em Mariana, MG gerando danos na qualidade da água, na biodiversidade aquática e na dinâmica dos rios.

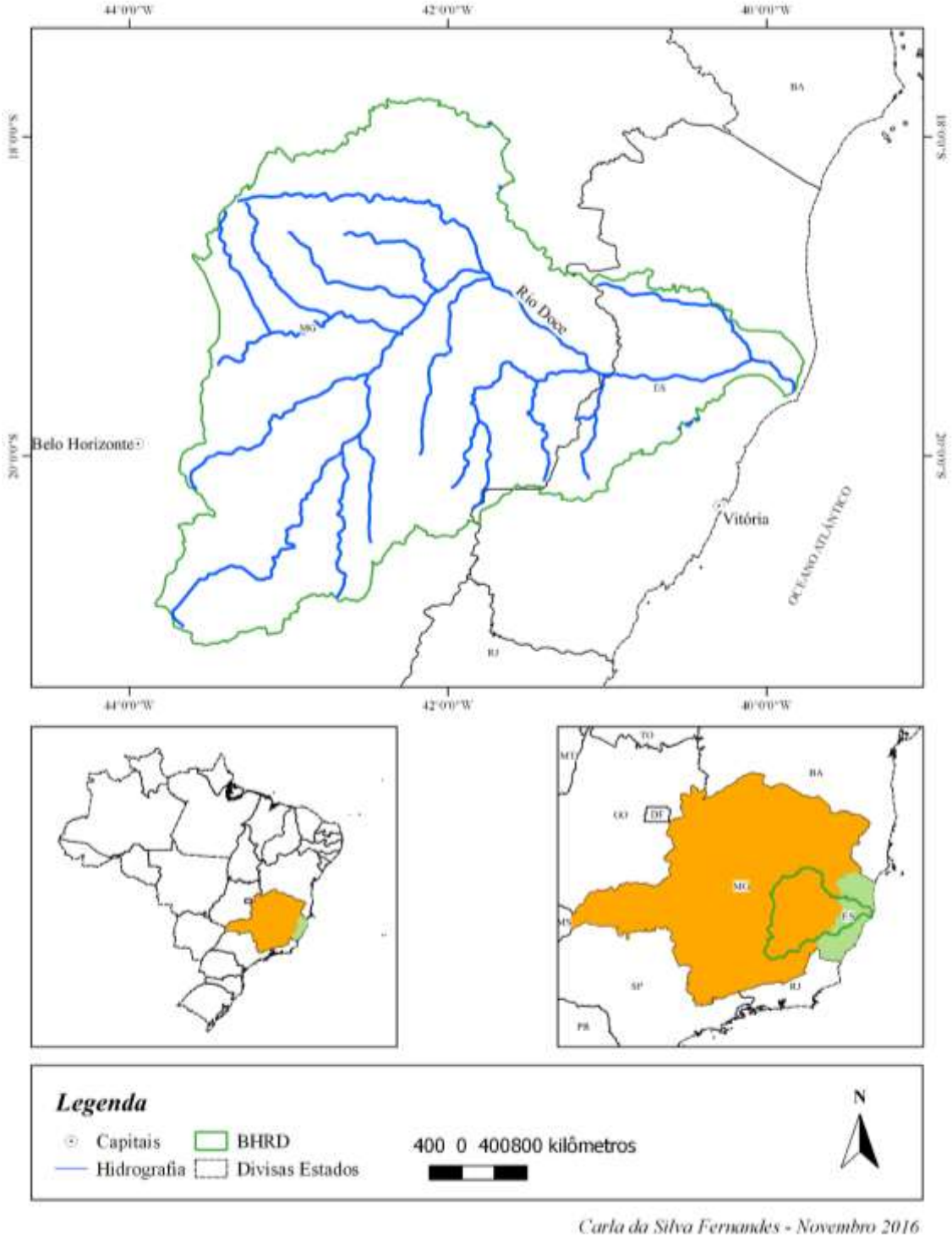
4.3 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE

A presente pesquisa foi desenvolvida na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, situado no estado de Minas Gerais, MG, entre o Quadrilátero Ferrífero (QF) e a Zona da Mata Mineira; tal bacia está inserida na bacia do rio Doce, uma das principais do estado.

A BHRD possui uma área de drenagem que se estende do estado de Minas Gerais ao estado do Espírito Santo (Figura 5). A primeira atividade econômica na região foi a extração do ouro que determinou a ocupação nas áreas próximas à bacia no passado e, até os dias de hoje, o sistema de drenagem é de suma importância para a economia, um vez que fornece água para o uso doméstico, agropecuário, industrial e geração de energia (CBH-DOCE, 2016).

Estima-se que 3,6 milhões de pessoas vivem na BHRD, distribuídos em 225 municípios, com territórios parcialmente ou totalmente nela inseridas, sendo que 200 desses são mineiros. Por apresentar relevo bastante acidentado a ocupação urbana na bacia se concentrou junto ao talvegue dos cursos de água, em áreas vulneráveis a inundações. (ANA, 2016). A formação das cidades e povoados na BHRD, desde o tempo do Império, trouxe a exploração de recursos naturais, como a extração da madeira e do ouro. Posteriormente, desenvolveu a mineração e a construção da Estrada de Ferro Vitória-Minas para transportar o minério de ferro que seriam importados. A extração mineral, na perspectiva econômica, teve papel decisivo da ocupação ao longo da bacia, bem como a extração vegetal.

Figura 5 - Mapa da localização da Bacia Hidrográfica do Rio Doce.

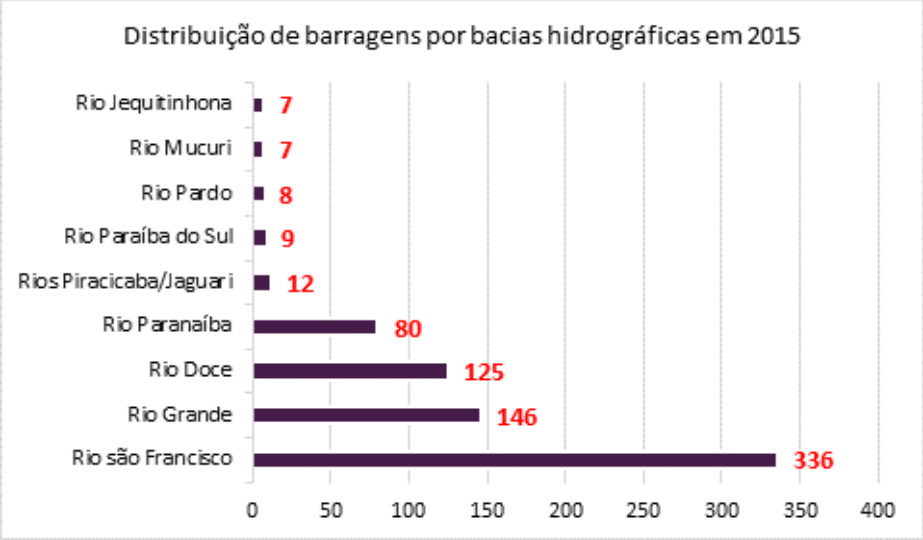


Fonte: Própria autora, 2016.

O uso econômico na área é diversificado, podendo encontrar atividades de agropecuária, agroindústria com a produção de açúcar e óleo, indústria de celulose e produção de energia (CBH-DOCE, 2016). Em conformidade com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2016) a bacia tem relevância, também, na geração de energia hidrelétrica. Atualmente, 10 usinas estão em operação, sendo que 4 encontram-se no rio Doce e 6 em seus tributários.

Segundo a FEAM (2015), devido à alta concentração de usinas hidrelétricas, empreendimentos minerários e outras indústrias na região, a BHRD contém 125 barragens cadastradas no Banco de Declarações Ambientais (BDA), posicionando-a em terceiro lugar dentre as bacias do estado de Minas Gerais que mais apresenta estruturas de barramento cadastradas, conforme Figura 6.

Figura 6 - Gráfico da distribuição das estruturas cadastradas no BDA divididas por bacia hidrográfica no estado de Minas Gerais.



Fonte: FEAM (2015), (modificado), 2016.

Além das diversas atividades econômicas, a bacia é originalmente coberta pela Mata Atlântica apresentando clima tropical, uma rica biodiversidade e grande disponibilidade de recursos hídricos. Segundo a ANA (2016) a vegetação nativa corresponde 27% do território da BHRD.

Entretanto, em virtude da tragédia ocorrida com a barragem de Fundão, a BHRD sofreu grandes impactos que modificou drasticamente sua qualidade

ambiental e a dinâmica dos rios, e com consequências significativas na vida das pessoas que vivem no domínio da bacia.

Alguns pesquisadores acreditam que demandará décadas para reparar os danos causados à BHRD pelo desastre ocorrido em Mariana, por outro lado a colaboração dos habitantes da bacia e projetos destinados à recuperação da mesma amenizarão os danos e possibilitará a retomada da fauna e flora. Há expectativa da recuperação da qualidade da água e do solo, porém o repovoamento das mesmas espécies vegetais levará muitos anos, no caso, por exemplo, de árvores de maior porte.

4.4 O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

O rompimento de um dos diques da barragem de rejeito de Fundão (Figura 7), pertencente ao complexo Germano da Mineradora Samarco ocorreu no dia cinco de novembro de 2015, no município de Mariana, MG. A barragem comportava rejeito produzidos no processo de beneficiamento do minério de ferro. Segundo Santos *et al*. (2014) a composição dos rejeitos possui água, partículas de rocha e compostos químicos que são aplicados no processo de beneficiamento e a maioria dos rejeitos apresentam baixo potencial poluidor.

Apesar de apresentar baixo potencial poluidor e tratar de um resíduo classificado como não perigoso conforme a NBR 10.004 (ABNT, 2004) o rompimento da barragem gerou diversos impactos à BHRD e toda a população que habita as áreas circunvizinhas à Bacia.

Quando a barragem se rompeu, vazou um volume inicial estimado 32 milhões de m^3 de rejeitos e água. O barramento de água de Santarém, localizada logo abaixo de Fundão, sofreu um galgamento, que gerou erosão da crista da barragem, todavia parte significativa dessa estrutura permaneceu intacta depois do rompimento (SAMARCO, 2016).

Figura 7 - Imagens de satélite da área do Complexo Germano antes e depois do acidente da Barragem de Fundão.

Fonte: *Google Earth* (modificada), 2016. Data da imagem: 21/07/2015

Fonte: *Google Earth* (modificada), 2016. Data da imagem: 26/07/2016

De acordo com o Inventário da FEAM (2015), a barragem de Santarém resistiu a passagem do fluxo de rejeito, portanto, o talude de jusante foi erodido, além de danificar a saída do dreno interno e comprometer a estabilidade do maciço.

Informações fornecidas pela Samarco afirmam que a estrutura da barragem de Germano sofreu trincas devido ao incidente.

A lama de rejeito liberada escoou à jusante da barragem de Santarém, através do curso do córrego Santarém, em seguida adentrou-se no Rio Gualaxo do Norte, que é tributário do Rio do Carmo, que por sua vez deságua no Rio Doce. Ao longo do deslocamento, o rejeito arrastou solos e vegetação, resultando em uma lama de rejeitos, solos e detritos vegetais e antrópicos que foram depositados nas planícies de inundações nas margens e nas calhas dos cursos hídricos e seus afluentes, quando essa mistura de sólidos e água teve sua velocidade de descolamento reduzida em determinados trechos em seu caminho (SAMARCO, 2016).

No trecho subsequente, quando a mistura de rejeitos e materiais carreados pelo seu escoamento penetrou no reservatório da barragem de Candonga da usina hidroelétrica Risoleta Neves. Um volume de material estimado em 7 milhões de m^3, pela Samarco, sedimentou dentro desse reservatório. Contudo, o vertedouro da barragem liberou constantemente sólidos em suspensão e frações mais finas dos rejeitos, que por sua vez se depositaram na calha do Rio Doce (SAMARCO, 2016).

A partir da usina Risoleta Neves foram notadas ondas com maior velocidade e menor concentração de sedimentos até a foz do rio Doce, sem gerar inundações em seu escoamento; e uma pluma de sedimentos com menor velocidade e altamente turva. A pluma de água com elevada turbidez alcançou o litoral do Espírito Santo 16 dias após o acidente, contudo, segundo o relatório da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), a onda de cheia chegou 6 dias após o rompimento (ANA, 2016).

Além da lama gerar danos socioambiental por toda BHRD até chegar na foz e impactar o ambiente marinho, causou mortes e desaparecimentos de trabalhadores de subcontratadas da Samarco e moradores de Bento Rodrigues; e mais de 1200 pessoas destituídas de suas casas ou desalojadas (POEMAS, 2015).

O desastre foi classificado pela defesa civil como nível IV, ou seja, “desastre de porte muito grande”, o que expressa que os danos causados são relevantes e os prejuízos são vultosos e excessivos (FEAM, 2015).

Diante disso, a atividade econômica dos produtores rurais à margem dos rios atingidos foi afetada de forma direta. Tais produtores apresentavam dificuldades em manter a produção, seja porque a água tornou-se imprópria para irrigação ou dessedentação de animais, seja porque o solo foi contaminado pela lama.

4.5 PANORAMA GERAL DOS IMPACTOS

A onda de rejeito que vazou após o rompimento da barragem de Fundão gerou danos ao longo do caminho percorrido (Figura 8) até a foz do rio Doce. Destruiu comunidades, estruturas urbanas, áreas de preservação permanente, desequilibrou a qualidade da água, levando a destruição da biodiversidade aquática, incluindo a fauna silvestre. Além de vítimas fatais, foram constatados impactos ambientais, econômicos e sociais diretos, tais como mortalidade de animais de produção, restrições à pesca, danos em plantações, interrupções na geração de energia elétrica e abastecimento de água (IBAMA, 2016).

As cidades que dependem da água do rio Doce tiveram sua capitação interrompida, uma vez que o reservatório de Candonga da usina hidrelétrica Risoleta Neves, a 120 km do desastre foi o mais afetado dentre as demais barragens da BHRD. Nos trechos situados a montante de Candonga, ocorreu supressão vegetal marginal devido à erosão forçada pela avalanche de rejeitos e materiais carreados. Sendo assim, foram notados grandes depósitos de rejeito expostos na calha do rio, principalmente na área de transição com o reservatório (ANA, 2016).

Fora os impactos ambientais na bacia, a Justiça Global (2016) relatou que foram diagnosticados impactos psicossociais das populações atingidas, tanto para aquelas famílias que perderam seus entes, quanto para aquelas que perderam suas casas e tiveram que mudar para Mariana ou Barra Longa. Alguns problemas de saúde também foram identificados como estresse pós-traumático e quadros de depressão que também se abateram a aqueles que dependiam economicamente do solo e da água da bacia.

Além desses problemas de saúde manifestados imediatamente após o rompimento da barragem, 8 meses após o desastre foi exaustivamente divulgado pela mídia televisiva, perturbações na saúde humana causados pela produção de poeira provenientes da lama depositada na margem dos rios e ruas de cidades afetadas à

jusante da barragem. De acordo com Poemas (2015), essa lama depositada nas áreas de inundação contaminou o solo e água, dado que o rejeito contém metais provenientes do beneficiamento do minério.

Figura 8 - Cabeceira do Rio Gualaxo do Norte.

Fonte: Própria autora, 2016.

Diante dessa circunstância, vale ressaltar que o rompimento de barragens é um risco intrínseco ao setor minerário sendo o potencial do risco elevado para esse tipo de obra de engenharia. Apesar disso, a atenção dada ao rompimento de barragem é mínima no Brasil, uma vez que não há estudos que sistematizam possíveis efeitos ou impactos de rompimentos de barragem no país. O grupo Poemas (2015) ressalta que o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) não prevê a magnitude dos impactos socioambientais gerados por empreendimentos de grande porte e possivelmente os atingidos podem ser subestimados.

4.6 CIDADES MAIS AFETADAS

O subdistrito de Bento Rodrigues, município de Mariana, que se localiza cerca de 5 km da barragem de Fundão próximo do córrego de Santarém foi, em sua maioria, soterrada pela enxurrada de água, lama e detritos decorrente do rompimento, o subdistrito possuía aproximadamente 600 habitantes. Segundo estimativa do IBAMA, 207 dos 251 imóveis foram destruídos nessa localidade (ANA, 2016). O distrito de Paracatu de Baixo, também município de Mariana, que está localizado à jusante da barragem de Santarém, próximo ao rio Gualaxo do Norte, foi atingido severamente e teve uma porção das estruturas urbanas soterradas pelo rejeito (Figura

9). A mistura de rejeitos e demais sólidos associados pelo deslocamento também gerou impactos físicos relevantes no distrito de Gesteira, localizada no município de Barra Longa, bem como na própria cidade sede (GOLDER ASSOCIATES, 2016).

Figura 9 - Casa soterrada no distrito de Paracatu de Baixo.

Fonte: Próprio autor, 2016.

O município de Barra Longa foi afetado no dia seguinte ao rompimento, a lama de rejeito chegou causando a destruição de plantações e atingindo a área central da cidade sede (JUSTIÇA GLOBAL, 2016). Barra Longa evidencia perturbações incalculáveis na dinâmica da cidade, isso porque a cidade acolheu muitas famílias dos povoados atingidos e teve um aumento no tráfico pela movimentação de maquinários e automóveis de grande porte para reconstrução das áreas afetadas.

Na região mais populosa do rio Doce, à jusante da barragem de Baguari, onde se localizam grandes municípios, tais como Governador Valadares (MG) e Colatina (ES), não houveram inundações causadas pelo escoamento da lama de rejeito, porém houveram depósitos de lama na planície de inundação. Além disso, os municípios que dependem do recurso hídrico do Rio Doce tiveram seu abastecimento interrompido devido à alta turbidez na água (ANA, 2016).

4.7 EFEITO DA DEPOSIÇÃO DA LAMA

Na medida que a lama foi se alastrando ao longo dos rios da BHRD ela foi se depositando e acumulando ao longo das planícies de inundação e margens do Rio Gualaxo do Norte. A Mineradora Samarco responsável pelo desastre retirou uma quantidade significativa de rejeito das cidades mais afetadas pela lama, entretanto há muito ainda a ser retirado, conforme Figura 10.

Figura 10 - Aparência das margens do rio Gualaxo após o desastre de Mariana, MG e intervenção para retirada da lama depositada.

Fonte: Própria autora, 2016.

A deposição desse material, que é a mistura de lama, água e detritos nas cidades à jusante da barragem secou e, com o auxílio dos fortes ventos característicos do período de seca, favoreceu a produção de poeira. Além disso, a produção é assistida com o aumento súbito do tráfego de caminhões e caminhonetes nas regiões afetadas.

Em conformidade com Pires *et al*. (2003) o rejeito oriundo do beneficiamento do minério de ferro da Samarco apresenta teores de ferro, sílica, água, e alumínio, e composição mineralógica caracterizada por hematita, caulinita, goethita e quartzo. Além disso, contém elementos-traço como cromo (Cr), cádmio (Cd), chumbo (Pb), sódio (Na) e manganês (Mn). Devido a presença da goethita, o resíduo tem capacidade de reter o cromo e outros metais pesados.

De acordo com as análises realizadas com o rejeito de minério da Samarco em teste de lixiviação e solubilização apresentadas por Pires *et al*. (2003) foi relatado

que os elementos-traço (Cr, Cd, Pb, Na e Mn) expressam baixas concentrações em meio líquido, o que implica, que esses metais ficam retidos na barragem, não se estendendo para o sistema hídrico. Todavia o rompimento e o vazamento do rejeito propiciou um maior contato da população com esses elementos.

Conforme noticiado na mídia, os moradores de Barra longa estão sofrendo com a produção de poeira, visto que, os atendimentos no posto de saúde da cidade aumentaram cerca de 200% em abril se comparado ao mesmo período do ano anterior. Os pacientes apresentam afecções respiratórias, irritação dos olhos e manchas na pele. Segundo relatos da Saúde Popular (2015) os casos diagnosticados por conta do contato da lama e poeira são de diarreia e vômito, dermatoses, problemas respiratórios, conjuntivites e outros.

Diante de tais hipóteses, insere-se a importância de estudos que visem analisar a composição da poeira atualmente presente nas cidades afetadas pelo rejeito advindo da barragem. Tal análise terá como objetivo identificar a possível relação da lama com alterações na saúde da população.

4.8 A POEIRA E SEUS IMPACTOS À SAÚDE

Considera-se como poluente atmosférico qualquer substância presente no ar e que pela sua concentração possa torná-lo impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade (FEAM, 2001).

O material particulado (MP) é formado por diversas partículas de tamanho variável e compreende na forma mais visível de poluição atmosférica. O termo aerossóis de dispersão são partículas sólidas ou líquidas, com diâmetro inferior a 100µm, formadas por moagem de sólidos, atomização de líquidos ou dispersão de poeira. As partículas na fração de 0,001-100µm são facilmente encontradas em suspensão na atmosfera nas proximidades das fontes poluidoras. Os efeitos do MP são variados, dentre eles, capacidade de deteriorar materiais, prejudicar a visibilidade e desarmonizar a estética dos ambientes, podendo ainda, ser nocivos à saúde humana. Esse último devido principalmente as partículas menores (MANAHAN, 2013).

O material particulado (MP) é uma mistura de diversos componentes que variam de acordo com as características locais e regionais. As discussões frente a influência das partículas sob a saúde humana são relacionadas com o papel do tamanho de partícula e sua composição. No entanto, poeira de diferentes regiões que apresentam semelhanças em sua composição podem ter efeitos distintos a saúde humana. Em estudos epidemiológicos realizados pelo *Health Effects Institute* (HEI) gerou-se uma nova percepção da influência de fatores socioeconômicos sobre os efeitos das partículas na saúde da população (ENGLERT, 2004).

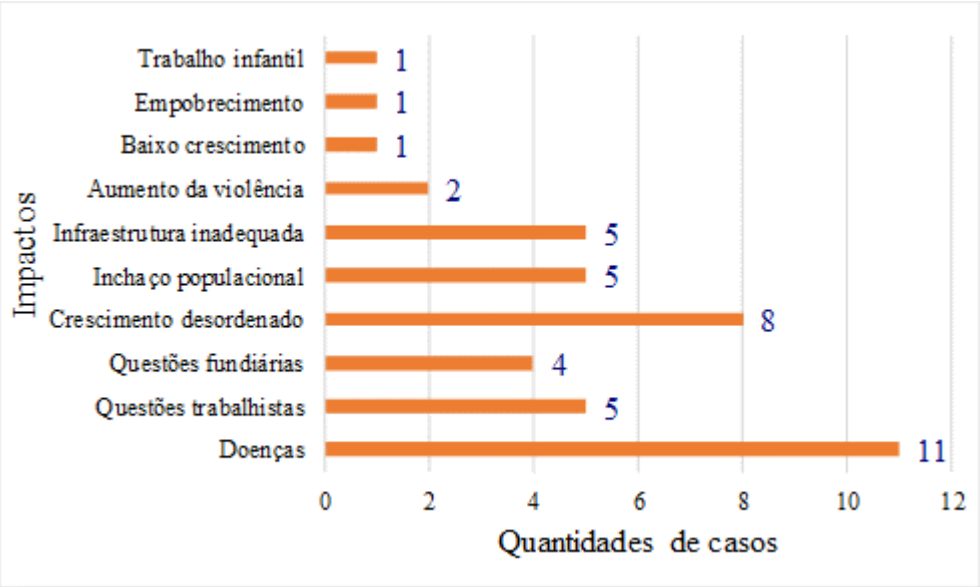
Os parâmetros de saúde frequentemente estudados em relação à PM são mortalidade, morbidade, internações hospitalares devido a doenças cardiovasculares e respiratórias, função pulmonar e os parâmetros funcionais, tal como a variabilidade da frequência cardíaca (VFC) (ENGLERT, 2004). A composição da poeira impacta nas reações pulmonares frente a deposição de poeira orgânica no pulmão, além da dose inalada. O desenvolvimento de doenças como a Silicose depende da concentração, da superfície, da granulometria (partículas menores de 1µm apresentam maior toxidade), da forma da sílica cristalina e do tempo de exposição (FINKELSTEIN, 2000).

A sílica presente na composição do rejeito de minério de ferro é extremamente tóxica para o macrófago alveolar. As micropartículas de sílica, com diâmetro inferior a 10 µm, atravessam as paredes dos alvéolos e alcançam o interior do pulmão gerando uma reação dos tecidos de caráter inflamatório com cicatrização posterior. Se o processo for repetido provoca o endurecimento e o desenvolvimento de nódulos no tecido pulmonar, e com a exposição constante este acúmulo de sílica prejudica a elasticidade do pulmão e exige um maior esforço na respiração (FAGUNDES; ZANELLATO, 2016).

O MP é um dos poluentes primários produzidos através de processos de mineração. Estudos indicam uma forte associação da poeira no ar com impactos adversos relacionados com a saúde dos trabalhadores da mineradora e a população circunvizinha da mina, tais como capacidade pulmonar reduzida, redução da função pulmonar, doença cardiovascular aumentado, câncer e efeitos neurotóxicos. A análise granulométrica e composição da poeira ajuda a compreender melhor esses impactos na saúde humana (PATRA; GAUTAM; KUMAR, 2016).

De acordo com estudos realizados por Alamino, Verdes e Fernandes (2014), em que avaliaram-se os impactos provocados por mineradoras, foi possível identificar os efeitos mais relevantes sobre a população local. Dentre os impactos sociais, os problemas de saúde foi o mais relevante. Além disso, a poluição do ar foi definida pela população como um dos três impactos ambientais mais relevantes (Figura 11).

Figura 11 – Impactos gerados pela extração mineral no estado de Minas Gerais.



Fonte: Alamino, Verde e Fernandes (2014) (modificado), 2016.

5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

5.1 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA BACIA DO RIO GUALAXO DO NORTE

A presente pesquisa foi desenvolvida na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, situado no estado de Minas Gerais, MG, entre o Quadrilátero Ferrífero (QF) e a Zona da Mata Mineira; tal bacia está inserida na bacia hidrográfica do rio Doce, uma das principais do estado. O rio Gualaxo do Norte tem sua nascente localizada no município de Ouro Preto, seu médio e baixo curso localizados, respectivamente, nos municípios de Mariana e Barra Longa.

Conforme descrito por Costa (2001), o rio Gualaxo do Norte, ao longo de sua extensão, drena várias unidades geológicas do Quadrilátero Ferrífero. A região da cabeceira apresenta rochas supracrustais, principalmente representas por quartzitos, itabiritos e filitos do Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi, no trajeto do médio e baixo curso afloram o Supergrupo Rio das Velhas e os Complexos Metamórficos Santa Bárbara, Acaiaca e Mantiqueira (Figura 12).

De acordo com Dorr II (1969) *apud* Costa (2007), o posicionamento tectônico do QF foi o embasamento para a geração de vários depósitos minerais. As diversas fases de deformação geológica que ocorreram nessa região favoreceram os processos de mineralização, dentre eles a percolação de fluidos em zonas de cisalhamento, formando concentrações elevadas de elementos como ferro (Fe), manganês (Mn), ouro (Au) e metais traço, o que pode justificar presenças anômalas de metais como As e Sb.

Segundo Rhodes (2010) o Supergrupo Minas é a unidade geológica mais estudada do QF, essencialmente devido às importantes jazidas de ferro. A formação Cauê do Grupo Itabira é a unidade economicamente mais relevante do QF e engloba todas as jazidas de minério de ferro da região. Foram cadastrados por Baltazar e Raposo (1993) 34 depósitos minerais, sendo eles, 20 de ferro, 10 de ouro, 3 de dolomito e 1 de quartzito no domínio do Supergrupo Minas.

Ainda de acordo com Baltazar e Raposo (1993), o Supergrupo Rio das Velhas foi formado em um ambiente de *rift*, condições favoráveis ao desenvolvimento de mineralizações de ouro, potencial este que pode ser estendido aos elementos: Ag, As,

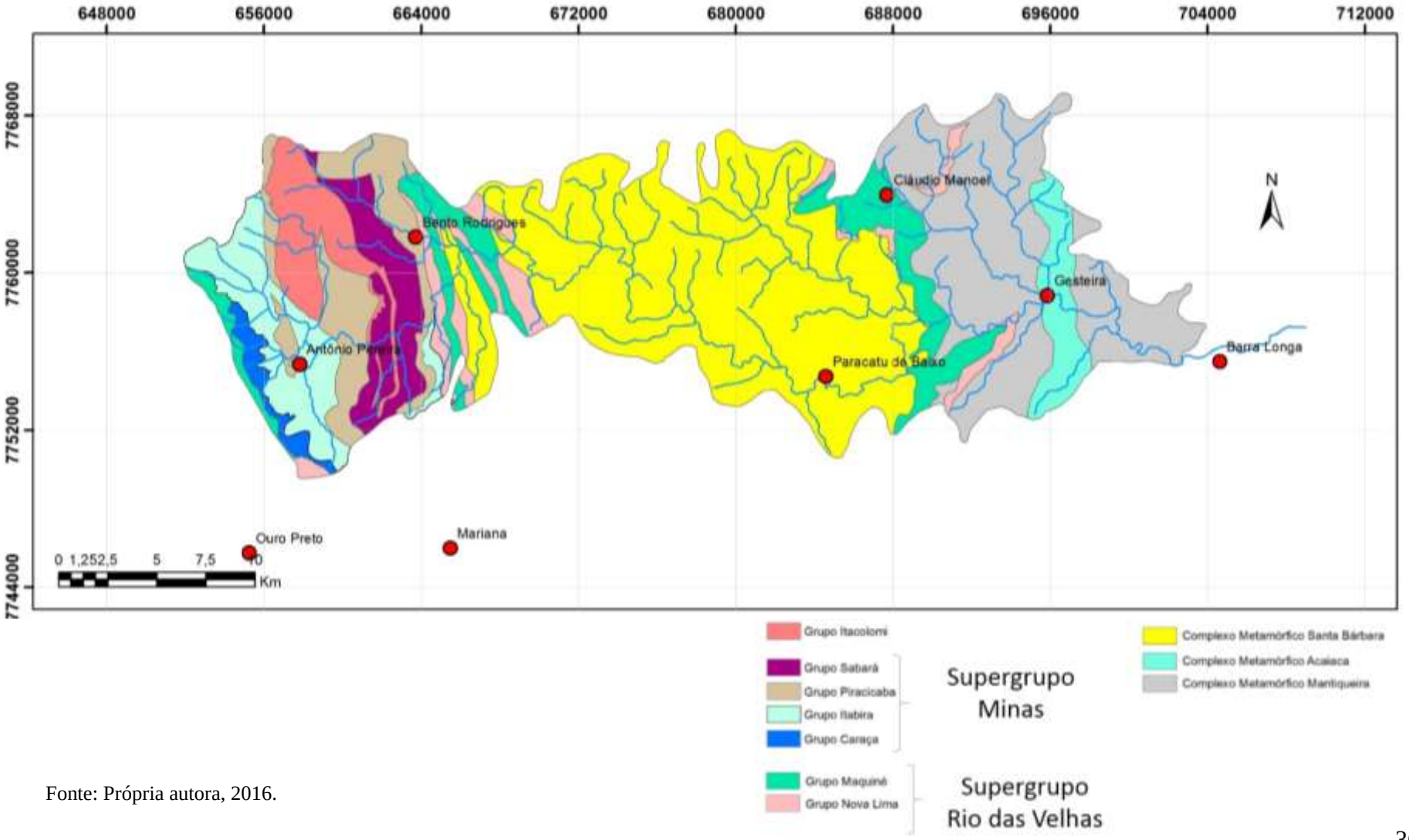
Cr, Ni, Co e Cu. Neste domínio foram cadastradas 31 depósitos de ouro, 3 de serpentinito, 2 de areia industrial e 1 de ferro e manganês.

O Grupo Itacolomi é constituído por quartzitos, filitos, itabiritos e metaconglomerados que capeiam o Supergrupo Minas. Um estudo detalhado observou-se como acessórios a hematita, magnetita, zircão, turmalina, martita, rutilo e monazito (GLOCHNER, 1981 *apud* BALTAZAR e RAPOSO (1993).

As unidades geológicas do médio e baixo curso da bacia são os Complexos Metamórficos. O grupo Santa Bárbara são constituídas basicamente por gnaisses e granitos. O Complexo Acaiaca é formada por rochas com alto grau metamórfico e constitui uma faixa que se estende do norte ao sul da bacia do rio Gualaxo do Norte (BALTAZAR e RAPOSO, 1993). O Complexo Mantiqueira, de acordo com a designação de Brandalise (1991) *apud* Rodrigues (2012) é denominado como uma sequência de gnaisses predominantemente ortoderivados de composições variadas, migmatizados e/ou com intercalações de anfibolitos e metagrabados.

Os atributos geológicos da região foram o alicerce para a formação de vários depósitos minerais na área estudada. Ainda que os elementos químicos podem estar presentes de modo natural, tanto em águas superficiais quanto subterrâneas, solos e sedimentos, as atividades minerárias que ocorrem na bacia, principalmente e, no alto curso, podem contribuir para o aumento da concentração dessas substâncias.

Figura 12 –Mapa Geológico da Bacia Hidrográfica do Rio do Gualaxo do Norte



Fonte: Própria autora, 2016.

5.2 ATIVIDADES ECONÔMICAS

A bacia está sob domínio de três municípios, e na sua área de influência encontram-se os distritos de: Antônio Pereira, município de Ouro Preto; Bento Rodrigues, Paracatu de Baixo, Claudio Manuel, município de Mariana; e Gesteira, município de Barra Longa, como ilustrado na Figura 12. As riquezas contidas nessa região beneficiaram a ocupação econômica, destacando-se as atividades de exploração de ouro, inicialmente, e de ferro, até os dias atuais.

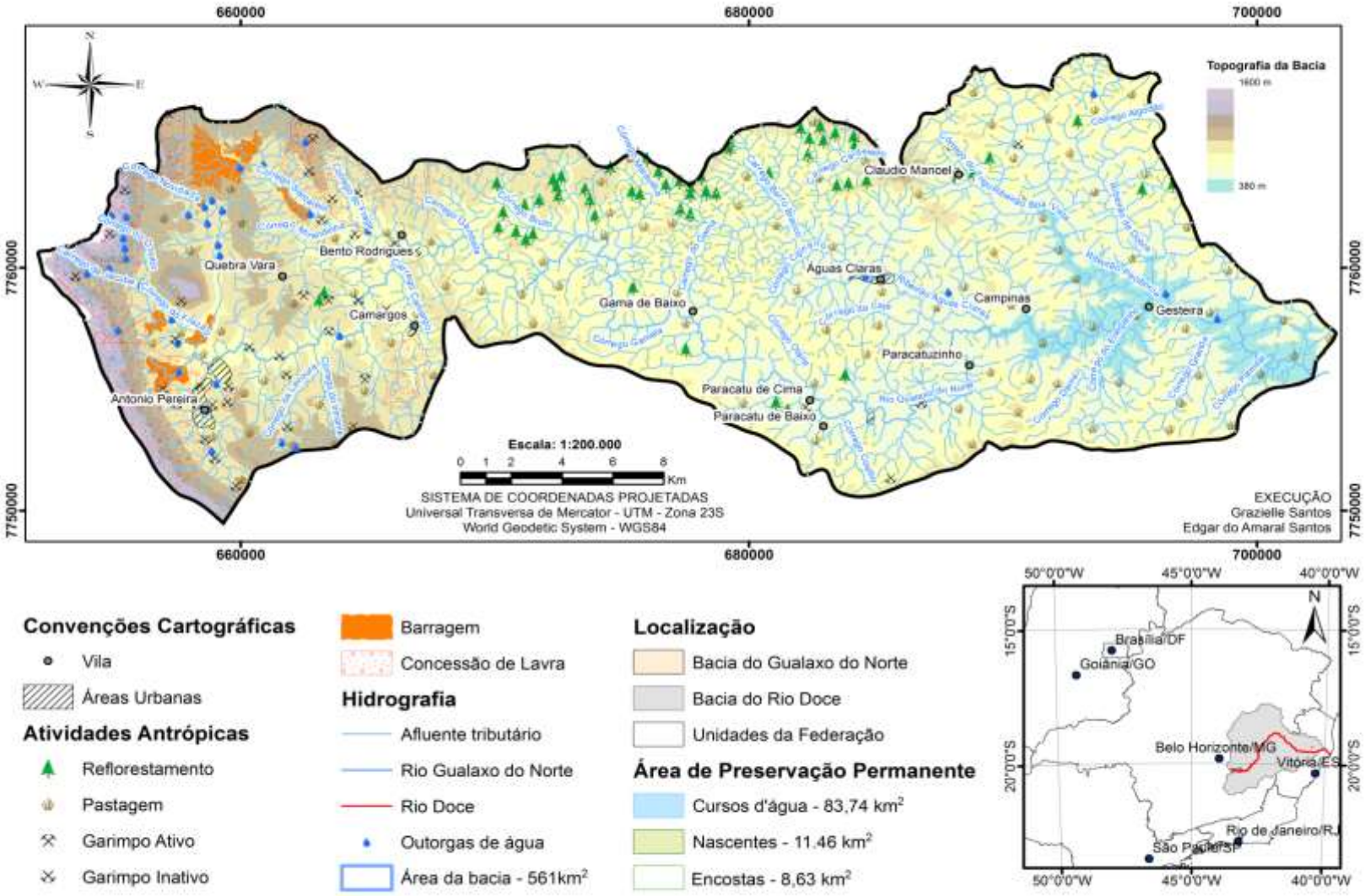
A formação desses municípios foi desencadeada quando iniciou-se a extração de ouro em Ouro Preto, no século XVII. Na bacia do rio Gualaxo do Norte essa atividade ocorre especialmente no distrito de Antônio Pereira com a utilização de técnicas que vão desde as rudimentares até as modernas. Tal atividade, frente às peculiaridades, comina em alterações ao meio ambiente, com intensidade e pluralidade de efeitos, cujos riscos nem sempre se reduzem aos limites da área de trabalho (RHODES, 2010).

Vale ressaltar que a exploração aurífera consiste em uma fonte de elementos tóxicos para o meio superficial. Segundo Costa (2001) a atividade exploratória nos depósitos auríferos pelo garimpo nas cabeceiras do rio do Gualaxo do Norte é a principal fonte antropogênica dos elementos tóxicos As, Mn, Sb, Ba e Hg em sedimentos desse rio que decrescem para a jusante e além dos limites da bacia. Borba (2002) verificou que nas mineralizações de ouro mesotermais do QF, que apresentam fluidos que transportam, além do Au e As, elementos como Ag, Sb, Cu, Pb e Zn.

Além da extração de ouro, outra atividade predominante na região é a mineração de ferro (Figura 13). No alto curso do rio Gualaxo do Norte encontram-se implantadas as minas de Timbopeba e Alegria, pertencentes à empresa VALE S.A e a unidade Germano da empresa Samarco Mineração.

Os depósitos minerais que sofrem extração, tanto do ouro como do ferro, apresentam associações minerais ricas em metais traço, que representam substâncias nocivas aos organismos. Estes elementos são inicialmente encontrados incorporados nas rochas e são, posteriormente, mobilizados para águas e sedimentos dos rios, com velocidade de mobilização e transporte intensificada pelas atividades extrativistas

Figura 13 - Mapa de Uso e Ocupação da Bacia Hidrográfica do Rio Gualaxo do Norte.



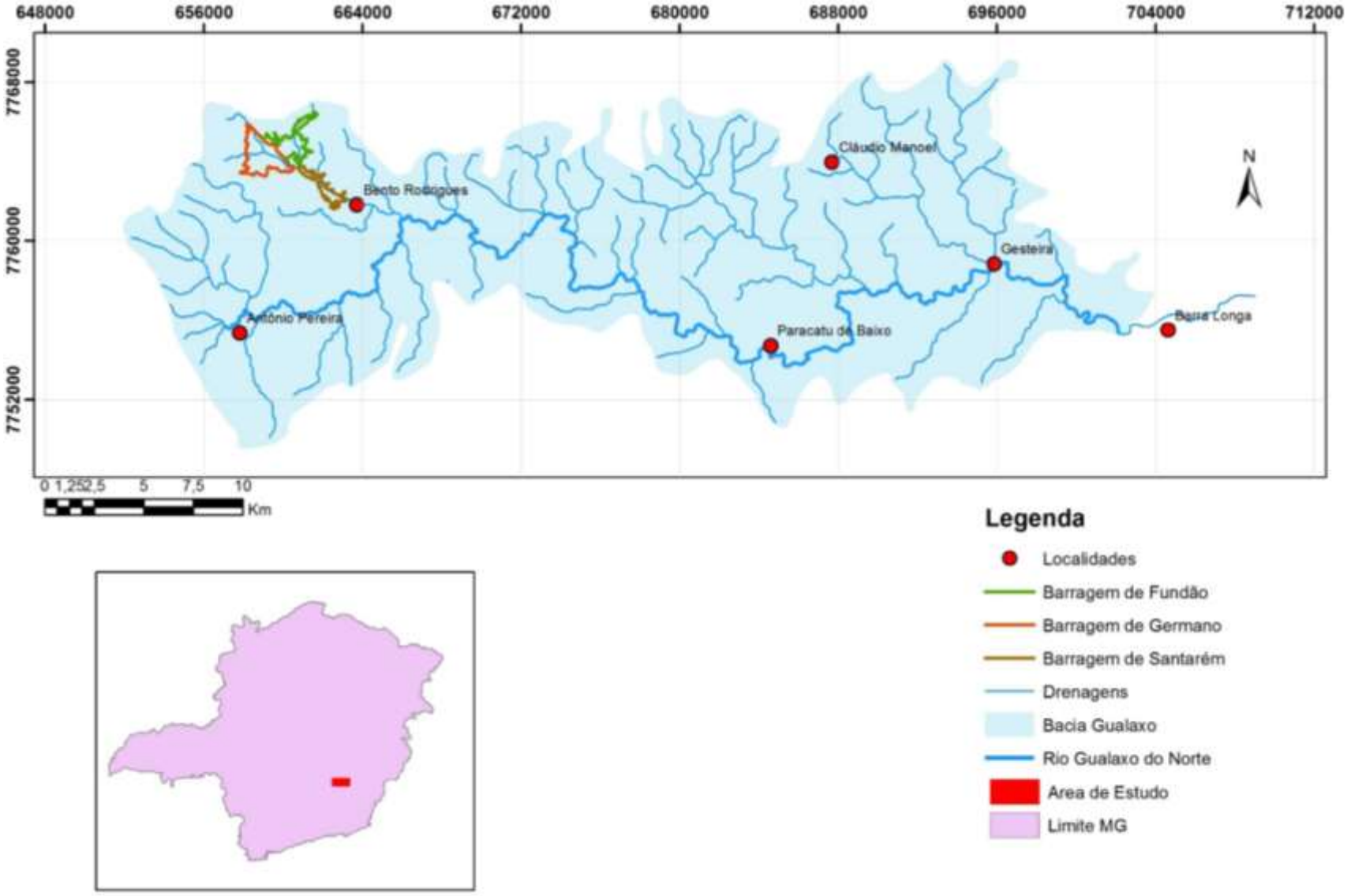
Fonte: Santos, 2018.

Ainda, na região do alto curso, é possível verificar extensas plantações de eucalipto, um vez que o solo é pouco fértil para desenvolvimento de atividades agrícolas. Tal atividade visa fornecer carvão siderúrgico utilizados em altos-fornos das indústrias da metalúrgicas, polo forte nas áreas adjacentes (COSTA, 2001). No médio curso da bacia, é possível verificar a predominância da atividade pecuária leiteira e áreas de cultivo de subsistência. Conforme Baltazar e Raposo (1993) os principais produtos agrícolas cultivados são fumo, milho, café, feijão, cana de açúcar e arroz, todos produzidos em pequenas escalas. O baixo curso, tem como o comércio local e a agropecuária como as principais práticas econômicas. Nos trabalhos de campo, pode-se observar que o distrito de Gesteira é formado por propriedades de pequeno porte, onde prevalecem a agricultura familiar e a criação de animais.

Estando a bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte inserida no QF, atrelada a forte presença de atividade minerária, a cabeceira do rio apresenta extensas áreas desmatadas e consequentemente sofre com forte erosão e assoreamento do leito do rio. Além disso, destacam-se as anomalias relacionadas à concentração de metais pesados oriundos da atividade garimpeira, que representam altos riscos de contaminação, uma vez que os elementos permanecem nas águas ou são precipitados juntamente com os sedimentos.

Embora as águas do rio Gualaxo do Norte não sejam especificamente direcionadas para abastecimento público, os elementos tóxicos podem ser incorporados indiretamente na cadeia alimentar, principalmente através da agricultura e pecuária (COSTA, 2001). Neste sentido, ressalta-se à presença de metais pesados em planícies de inundação, locais comumente utilizados para atividades agrícolas (FRIESE *et al*., 2000), predominante no médio curso da bacia. De Paracatu de Baixo até Gesteira é possível verificar atividade de pecuária leiteira extensiva e, vinculada a essa prática, áreas desmatadas para criação de animas, além da supressão de mata nativa para áreas de cultivo de agricultura de subsistência.

Figura 14 - Imagem da área de estudo com os pontos de amostragem georreferenciada



Fonte: Própria autora, 2016.

A mineração é potencialmente degradadora do meio ambiente e caso não seja bem conduzida pode alterá-lo de forma significativa e muitas vezes irreversível. Diversas são as etapas envolvidas no processo de extração mineral, transformando a mesma em uma atividade complexa em termos de insumos e produtos finais, portanto para que não haja extensos passivos ambientais é necessário planejamento, conhecimento científico e recursos humanos qualificados (MOREIRA, 2003).

A exploração mineral no QF gera passivos ambientais nos solos, águas superficiais e sedimentos. Isso ocorre, tanto pelo lançamento de fundo das barragens nos rios quanto pelo assoreamento devido a retirada da vegetação e ainda porque os rejeitos estocados nas estruturas de contenção, quando não devidamente tratados, podem trazer consequências para as características físico-químicas das águas e sedimentos de fundo (BORBA, 2002). Além disso, um dos impactos que a atividade exploratória gera à comunidade vizinha e aos trabalhadores da mineração é a poluição atmosférica. Segundo Silva (2007) a poeira e os gases emitidos pela extração de minério advêm do uso de explosivos, do tráfego de veículos pesados e do beneficiamento do minério.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Com base nos relatórios elaborados por instituições, organizações não governamentais e pesquisadores, e informações fornecidas pela mídia após o rompimento da barragem de Fundão da Mineradora Samarco, foi definida a área de estudo para o presente trabalho. A partir daí foi estipulada uma metodologia específica com objetivo de analisar a poeira produzida a partir da deposição da lama de rejeito nas cidades e povoados mais afetados, identificadas na área de estudo. A metodologia proporcionou a identificação de elementos químicos presente nas partículas de ar das amostras avaliadas.

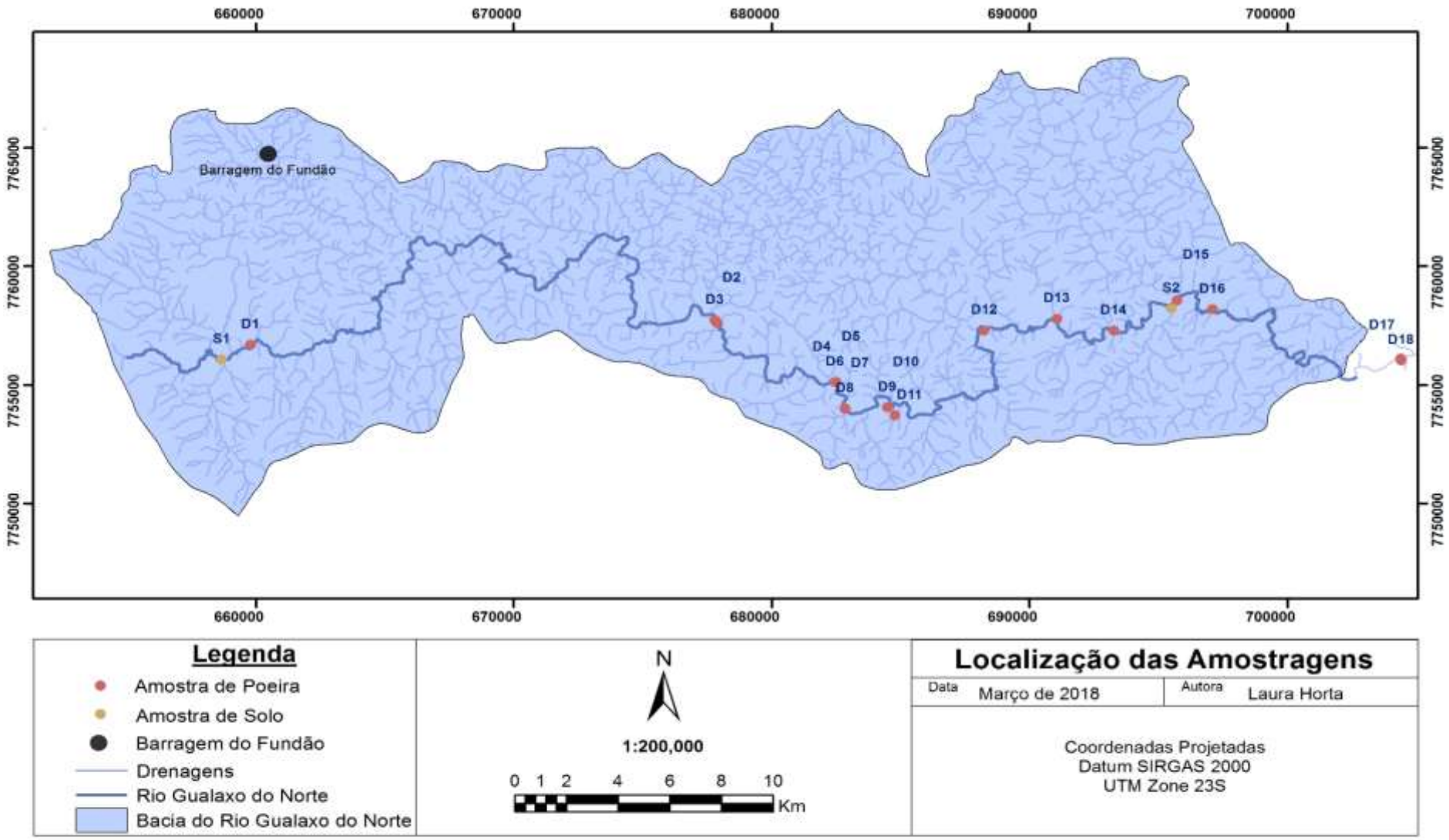
6.1 ÁREA DE ESTUDO E PONTOS DE AMOSTRAGEM

A presente pesquisa foi desenvolvida ao longo da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, inserida na bacia hidrográfica do rio Doce. A região de estudo se localiza nos municípios de Ouro Preto, Mariana e Barra Longa e para a definição dos locais de coleta foram identificadas áreas povoadas mais atingidas pela lama de rejeito proveniente do rompimento da barragem de Fundão, assim como regiões não afetadas. Esses pontos foram definidos por meio de coleta de informações oficiais (imagens de satélite e relatórios do diagnóstico atual da área), juntamente com visitas de campo.

Este trabalho se desenvolveu através de 3 visitas de campo, sendo que o primeiro ocorreu no dia 01 de julho de 2017 e consistiu na instalação dos coletores de poeira em 18 pontos de amostragens ao longo da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte. A segunda, 22 de agosto de 2018, sucedeu em observações das amostras e na última, nos dias 28 e 29 de setembro de 2018, ocorreu a retirada dos coletores. A localização dos pontos de coleta das amostras está descrita na Figura 15.

A confecção dos mapas necessários para desenvolver este trabalho foi baseada em bases cartográficas disponibilizadas por diversas instituições, como IBGE; e foram elaborados por meio das ferramentas do conjunto de *softwares* contidos nos programas *ArcGIS 10.1* e no *QGIS 2.18 Las Palmas.* Os postos de amostragem foram mapeados por meio de coordenadas geográficas e pela projeção UTM (Universal Transversa de Mercator). Esses dados, bem como a altitude foram obtidos utilizando o aparelho GPS (*Geographic Coordinate System*) da marca Garmin.

Figura 15 – Distribuição dos pontos de amostragens realizados neste trabalho.



As amostras sólidas utilizadas foram coletadas em 18 pontos, inseridos no trecho situado entre o distrito de Antônio Pereira (município de Ouro Preto) e o município de Barra Longa.

O procedimento de coleta das amostras consistiu na deposição livre da poeira em potes de plásticos com capacidade para 2 litros, considerando- a estação do ano propícia a produção de poeira, ou seja, foram obtidas amostras representativas do período de seca. Os potes foram instalados durante trabalho de campo realizado no dia 01 de julho de 2016, a 1,8m de altura, em árvores ao longo do trecho estudado. A retirada dos potes foi realizada nos dias 28 e 29 de setembro de 2016, início do período chuvoso. Dessa forma os potes ficaram dispostos para acúmulo de poeira durante 89/90 dias. Infelizmente, ocorreram inesperadas e fortes chuvas às vésperas do recolhimento do material devido à mudança do regime de chuva e temperatura característico da estação, e assim, algumas amostras encontravam-se misturadas a água no momento do recolhimento dos potes.

No momento da retirada, os potes foram tampados e transportados ao laboratório para serem processadas. A fim de obter a caracterização física da lama foi coletado amostra do material sólido depositado na comunidade de Gesteira no dia 01 de julho de 2016. Esse material se apresentava seco e foi submetido ao processo de peneiramento.

Foram coletadas também amostras de solo no distrito de Antônio Pereira, em área não afetada pelo derramamento da Barragem de Fundão porém, historicamente afetada pela exploração artesanal de ouro. Além destas, foram coletadas amostras de lama seca no distrito de Gesteira. Tais amostras foram utilizadas como parâmetros de comparação.

O Quadro 2 apresenta a descrição/caracterização dos pontos que foram utilizados nesta pesquisa. As fotos dos pontos (ANEXO 4) foram retiradas no 1° trabalho de campo, no dia 01 de julho de 2017.

Quadro 2 - Descrição dos pontos amostrados na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte/MG

Ponto	Coordenada	Distrito	Município	Zona
D1	S 20° 16.847 'W 43°28.185'	António Pereira	Ouro Preto	Rural
D2	S 20° 16.257'W 43°17.802'	-	Mariana	Rural
D3	S 20° 16.191'W 43° 17.850'	-	Mariana	Rural
D4	S 20° 17.582'W 43°15.132'	-	Mariana	Rural
D5	S 20° 17.579'W 43°15.137'	-	Mariana	Rural
D6	S 20° 17.578'W 43°15.160	-	Mariana	Rural
D7	S 20° 18.185'W 43° 14. 924'	-	Mariana	Rural
D8	S 20° 18.179'W 43° 14. 929'	-	Mariana	Rural
D9	S 20° 18.142'W 43° 14. 987'	Paracatu de Baixo	Mariana	Rural
D10	S 20° 18.142' W 43° 14. 987'	Paracatu de Baixo	Mariana	Rural
D11	S 20° 18.327'W 43° 13.815'	Paracatu de Baixo	Mariana	Rural
D12	S 20° 16. 326'W 43° 11.352'	-	Mariana	Rural
D13	S 20° 16. 079'W 43° 10. 235'	-	Mariana	Rural
D14	S 20° 16. 338'W 43° 08. 966'	-	Mariana	Rural
D15	S 20° 15. 632'W 43° 07. 560'	Gesteira	Barra Longa	Rural
D16	S 20° 16. 911'W 43° 02. 565'	-	Barra Longa	Urbana
D17	S 20° 16. 949' W 43° 02. 558'	-	Barra Longa	Urbana
D18	S 20° 16. 949'W 43° 02. 558'	-	Barra Longa	Urbana

6.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE POEIRA

Após retirada de materiais não relevantes (galhos, folhas, insetos, etc) as amostras coletadas foram centrifugadas para a remoção da água. Para a centrifugação, cada amostra foi dividida em partes iguais (visualmente) e acondicionada em dois tubos de plásticos do tipo Falcon de 50 mL. Subsequentemente, os tubos de cada amostra foram pesados individualmente e as massas foram completadas com água destiladas até que alcançassem o mesmo peso. As amostras foram agitadas por 25 minutos, a 4000 rotações por minuto (rpm), à 25 °C na centrífuga Multifuge X1R (modelo Heraeus e rotor Thermo Scientific). A agitação se repetia para as amostras que apresentavam turbidez excessiva e para aquelas que continham maiores quantidades de água. Os líquidos extraídos das amostras foram armazenados em vidros e conservados em temperatura de 6 a 10 °C, tal como os tubos das amostras (Figura 16). Em seguida, as amostras foram armazenadas para secagem em temperatura ambiente de 03 de novembro de 2016 até o dessecamento completo das amostras, 16 de janeiro de 2017.

Figura 16 - Tubos de Falcon com as amostras sólidas e vidros com os líquidos extraídos de cada amostra.

Fonte: Própria autora, 2016.

Após a secagem das 18 amostras da poeira que foram submetidos a extração da água oriunda de chuvas, o material foi submetido ao peneiramento utilizando peneiras de abertura entre 0,088, 0,053 e 0,044 mm do laboratório de Tecnologia Farmacêutica e Tecnologia de Cosméticos da Escola de Farmácia da UFOP, com

intuito de obter frações granulométricas das amostras para em seguida serem analisadas. Após a agitação mecânica a fração retida em cada peneira foi pesado.

6.3 ANÁLISES DAS AMOSTRAS DE SOLO DE GESTEIRA E ANTÔNIO PEREIRA

Foram coletadas duas amostras de solo, com o intuito de caracterizar regiões afetada, Gesteira, e não afetada, Antônio Pereira. Vale ressaltar que a última região, mesmo não afetada pelo rompimento, sofre diversas perturbações ambientais causados pela intensa exploração de minério proveniente da empresa Vale S.A, onde se localiza próxima à esse distrito. As amostras foram submetidas a análise granulométrica por peneiramento utilizando peneiras de 400, 325, 270, 170, 140, 120, 80, 60, 45 e 40 mesh. Após a agitação mecânica a fração retida em cada peneira foi pesada e calculada a porcentagem em relação ao total. A curva granulométrica foi gerada marcando-se no eixo das abcissas, o diâmetro das partículas, em escala logarítmica na base 10 e no eixo das ordenadas, os percentuais das partículas passantes em cada peneira, em escala natural.

A fim de obter o diâmetro aerodinâmico das partículas ultrafinas, as amostras da fração com abertura $x<0,044$ (400 mesh) foram dispersas em água ultrapura, em seguida foram medidas por dispersão de luz dinâmica (DLS) através do equipamento NanoZS Zetasizer (Malvern Instruments-UK) do Laboratório Multi-Usuário do Departamento de Farmácia da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Além do tamanho das partículas, o equipamento também forneceu o índice de polidispersão indicando a homogeneidade das amostras. Cada análise foi realizada em triplicata, apresentando a média aritmética como resultado final. As amostras foram analisadas diluindo-se 1 mg de uma suspensão de MP em 2mL água Milli-Q, obtendo uma dispersão de 0,5 $mg.mL^{-1}$. As suspensões assim produzidas foram acondicionadas em cubetas apropriadas e submetidas ao espalhamento de luz dinâmico com ângulo fixo de 173°, à 25°C.

Para a análise quantitativa dos elementos inorgânicos presentes nas amostras de poeira estudadas foi utilizado a Fluorescência de Raio – X por Reflexão Total (TXRF). O método é baseado na medição da fluorescência emitida através de átomos irradiados com um feixe de raio-X. O feixe é direcionado em um ângulo muito baixo

para a superfície da amostra que tem como efeito a reflexão total, isto faz com que a absorção e dispersão da radiação seja reduzida (MEYER, 2012). As amostras de poeira foram analisadas no Equipamento S2 Picofox TXRF (Bruker) do Laboratório de Caracterização Molecular e Espectrometria de Massas do Departamento de Química da UFOP, seguindo as orientações do Manual de operação do equipamento. Os resultados foram organizados em matrizes com o auxílio do software Excel 2013, para posterior discussão em forma de tabelas e gráficos, sendo esse último, em função das diferentes magnitudes dos valores, foram apresentados em escala logarítmica.

Os elementos inorgânicos presentes na amostra de Gesteira foram quantificados através do equipamento espectrometria de emissão atômica com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), marca Varian modelo 725-ES, após passar pelo processo de digestão ácida (ou abertura) para remover os compostos orgânicos presentes conforme protocolo descrito no Anexo 2. As análises foram executadas no Laboratório de Biohidrometalurgia e Tratamento de Efluentes da Escola de Minas da UFOP.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos das análises realizadas em 18 pontos ao longo da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, estão descritos a seguir.

7.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM

Foram coletadas amostras de poeira, solo e sedimentos em diferentes pontos da bacia do rio Gualaxo do Norte. Entre os dias 01 de julho de 2016 e 29 de setembro de 2016. O ponto D1 localiza-se no município de Ouro Preto, os pontos de D2 a D14 estão inseridos no município de Mariana e os demais, D15 a D18, estão em Barra longa. Os pontos escolhidos eram de acesso fácil e apresentavam, em sua maioria, grande movimentação de maquinários e automóveis de grande porte devido às obras de recuperação da área à jusante da barragem de Fundão.

7.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE SOLO DE ANTÔNIO PEREIRA E GESTEIRA

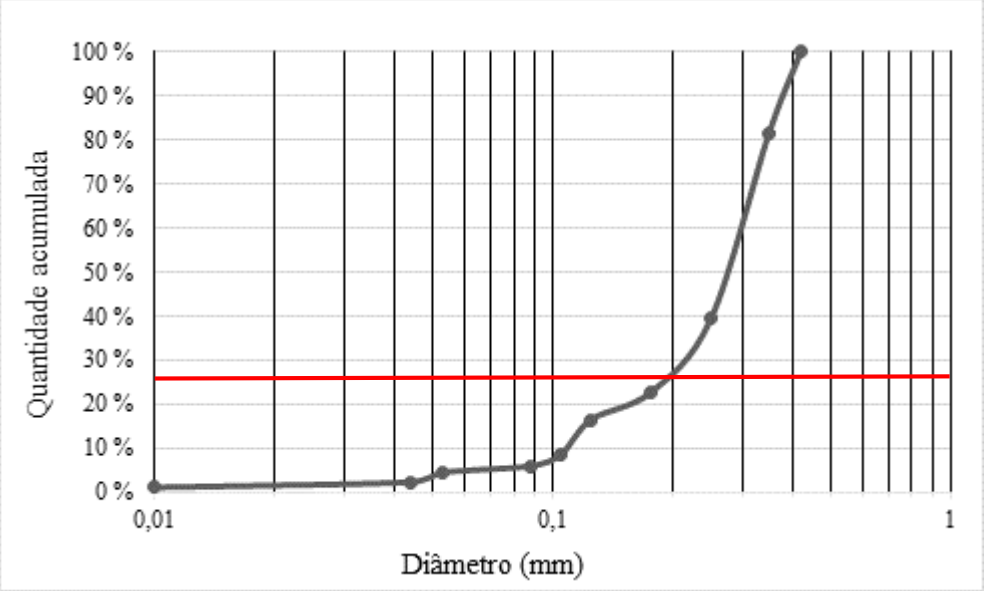
Para a avaliação da distribuição granulométrica das amostras de Antônio Pereira e Gesteira, esta pesquisa utilizou o método por peneiramento para obtenção das porcentagens das frações das amostras coletadas. Posteriormente, pesou-se a massa retida em cada peneira (m_i), calculou-se a porcentagem da quantidade retida (Q_r) em relação ao total (m_t) e a acumulada. Para calcular a quantidade retida utilizou a seguinte fórmula: $Qr = \left(\frac{m_i}{m_t}\right) * 100$

A Tabela 2 indica a composição granulométrica por peneiramento da amostra de Antônio Pereira utilizando uma série de peneiras com aberturas de 40 a 400 mesh. A partir daí, traçou-se a curva de distribuição granulométrica (Figura 17).

Tabela 2 - Resultado da distribuição granulométrica por peneiramento da amostra de Antônio Pereira.

Peneira (Mesh)	Abertura (mm)	Massa (g)	Massa (%)	Quantidade acumulada (%)
400	X < 0,044	0,92	1,073	1,073
325	0,044 < X < 0,053	1,04	1,213	2,285
270	0,053 < X < 0,088	1,89	2,204	4,489
170	0,088 < X < 0,105	1,251	1,459	5,948
140	0,105 < X < 0,125	2,252	2,626	8,573
120	0,125 < X < 0,177	6,793	7,92	16,494
80	0,177 < X < 0,250	5,362	6,252	22,746
60	0,250 < X < 0,350	14,241	16,605	39,351
45	0,350 < X < 0,420	36,253	42,27	81,621
40	X > 0,420	15,763	18,379	100
		85,765	100	100

Figura 17 - Curva de distribuição granulométrica por peneiramento da fração granulométrica da amostra de Antônio Pereira (Solo S1)



A partir da curva de distribuição granulométrica da amostra de Antônio Pereira, observa-se que cerca de 75% da granulometria do solo analisado é formada por areia média, com diâmetro compreendidos entre 0,2 mm e 0,60 mm segundo os limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos da NBR 6502/95 (ABNT, 1995).

A Tabela 3 apresenta, por sua vez, a composição granulométrica por peneiramento da amostra de Gesteira utilizando a mesma série de peneiras; e a curva de distribuição granulométrica está indicada na Figura 18.

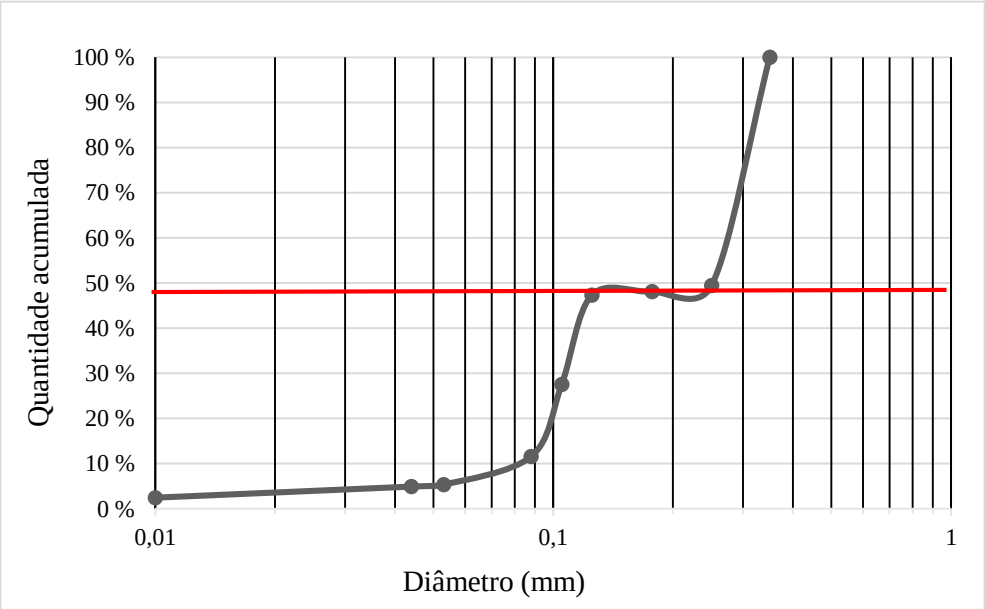
Pode-se verificar que a amostra de Gesteira é formada por areia fina, pois apresenta partículas com diâmetros entre 0,06 - 0,2 mm; e areia média devido à presença de partículas com diâmetro compreendidos entre 0,2 mm e 0,60 mm segundo os limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos da NBR 6502/95 (ABNT, 1995).

Considerando-se que aproximadamente 50% do material sólido depositado em Gesteira, como consequência do desastre ambiental ocorrido em novembro de 2015, está dentro da faixa granulométrica mais fina e que, dentre estas partículas encontram-se aproximadamente 30% do total de micropartículas com dimensões médias menores do que 1 µm e, é necessário apontar a possibilidade de que tais partículas sejam facilmente inaláveis e passíveis de absorção.

Tabela 3 – Resultado da distribuição granulométrica por peneiramento da amostra de Gesteira (Solo S2).

Peneira (Mesh)	Abertura (mm)	Massa (g)	Massa (%)	Quantidade acumulada (%)
400	X < 0,044	35,26	1,12	1,12
325	0,044 < X < 0,053	41,79	1,33	2,46
270	0,053 < X < 0,088	76,94	2,45	4,91
170	0,088 < X < 0,105	12,7	0,41	5,32
140	0,105 < X < 0,125	196,48	6,27	11,58
120	0,125 < X < 0,177	499,3	15,92	27,51
80	0,177 < X < 0,250	621,02	19,81	47,31
60	0,250 < X < 0,350	24,56	0,78	48,1
45	0,350 < X < 0,420	42,11	1,34	49,44
40	X > 0,420	1585,37	50,56	100
		3135,53	100	100

Figura 18 – Curva de distribuição granulométrica por peneiramento da fração granulométrica da amostra de Gesteira.



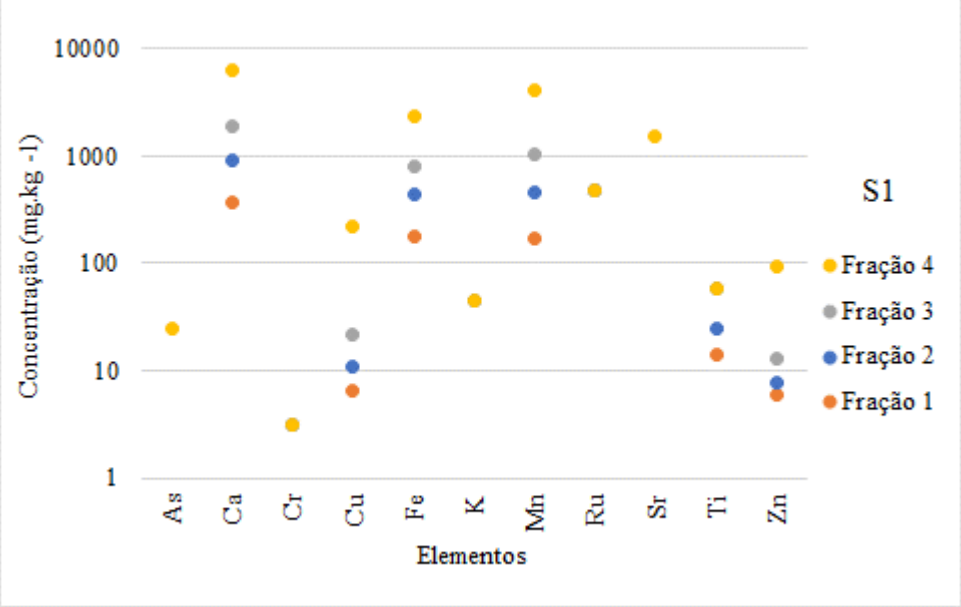
Salienta-se que o solo coletado na região afetada representa o material formado pelo rejeito e os detritos acumulados na trajetória percorrida pela lama. A análise do tamanho da amostra de Antônio Pereira ($AP_{0,5}$) realizada com suspensão 0,5 mg.mL $^{-1}$ evidenciam tamanho das amostras em torno da média aritmética de 3,992 µm com desvio padrão de 1,382 µm, obtendo em um desvio padrão relativo de 34,62%; e para Gesteira ($G_{0,5}$), na mesma condição, apresentou tamanho das amostras com desvio padrão de 0,1486 µm em torno da média aritmética de 0,8555 µm, implicando em um desvio padrão relativo de 17,37%. Sendo assim, esperava-se partículas mais finas no solo afetados pelo desastre, o que foi constatado pela análise granulométrica realizada, que permitiu verificar que a composição do solo da região não afetada é constituída por partículas com maiores diâmetros quando comparado a região afetada.

A Tabela 4 apresenta a avaliação da concentração dos elementos avaliados no solo de Antônio Pereira.

Tabela 4 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto S1 (Antônio Pereira).

Ponto S1	Concentração (mg.Kg $^{-1}$)			
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
Elemento	X > 0,088	0,088 >X > 0,053	0,053 > X > 0,044	X < 0,044
	(mm)			
As	-	-	-	24,9
Ca	371,7	540,7	1027	4454
Cr	-	3,15	-	-
Cu	6,51	4,42	10,86	197,5
Fe	176,8	253,8	374,4	1590
K	-	-	45,8	-
Mn	170,6	294,4	568,6	3126
Ru	-	480	-	-
Sr	-	-	-	1561
Ti	13,9	10,45	34,3	-
Zn	6,05	1,82	5,16	79,4

Figura 19 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto S1 (Antônio Pereira) para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 > X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044.



Avaliando os valores da Tabela 4 e da **Erro! Fonte de referência não e ncontrada.** é possível inferir que os metais Ca, Fe e Mn são os que apresentam ocorrências em maiores concentrações. Tal fato é esperado uma vez que solo do QF são caracterizados por concentrações elevadas de ferro e manganês gerados pelos processos geogênicos e antropogênicos; segundo Costa (2001) o alto teor de Fe provém do Complexo Metamórfico e o Mn, possivelmente, da barragem de rejeito, além disso as concentrações de cálcio também apresentam concentrações elevadas nessa região.

Tabela 5 - Resultado da análise do ponto S2 (Gesteira) através do ICP.

Elemento	Tubo 1	Tubo 2	Concentração mg.kg $^{-1}$
Aluminio	4,630850	4,534850	916,57
Arsênio	0,504338	0,367199	87,1537
Cromo	0,823413	0,813473	163,6886
Magnêsio	1,236270	0,378726	161,4996
Manganês	1,655450	1,477000	313,245
Chumbo	0,097867	0,226506	32,4373
Antimônio	0,024184	0,031884	5,6068
Silica	2,469060	2,394930	486,399
Zinco	5,375010	0,254155	562,9165

No solo de Gesteira as maiores concentrações foram de alumínio, zinco, sílica e manganês, respectivamente. A região é marcada pela agricultura e pecuária de subsistência, porém, como em muitas regiões, essas atividades agropecuárias muitas vezes não são realizadas da melhor forma, no tocante a preocupação com a qualidade do solo; tal fato pode ser responsável pelo alto teor de alumínio. Para as concentrações de magnésio e manganês, os valores são devido a litologia da região, que por intemperismo das rochas, acabam liberando metais e, pelas intensas atividades de mineração de ouro e ferro da região.

Andrade *et al*. (2012) afirma que a presença natural de metais pesados em solo é devida fortemente a litologia da região. Assim, a ocorrência de As, Ca, Fe, Mn podem estar ligados a esse fato. Os autores afirmam ainda que os elementos considerados tóxicos o arsênio (As), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobalto (Co), chumbo (Pb), cobre (Cu), mercúrio (Hg), níquel (Ni), zinco (Zn), ferro (Fe), manganês (Mn) e alumínio (Al). Conjuntamente com a questão geológica, outras propriedades do solo podem disponibilizar metais pesados, como a formação dos minerais, concentração de matéria orgânica e as características físico-químicas dos solos.

Morabet (2018) afirma que a poluição do ar deve ser tratada como uma preocupação emergente no tocante as consequências na saúde pública. Pesquisas científicas já estabeleceram a relação entre o aumento dos níveis de poluição do ar e taxas de mortalidade. Elementos presentes no material particulado podem causar enfermidades pulmonares e cardiovasculares, além de distúrbios nervosos. Forman e Finch (2018) afirmam que o material particulado atmosférico e inalação referente ao hábito de fumar estão associados a 15 milhões de morte por ano.

Serbula *et al*., (2017), em pesquisa desenvolvida para verificar a contaminação do ar atmosférico por processos oriundos das atividades mínero-metalúrgicas, também comentaram com o fato de que elevadas concentrações de contaminantes advindos de processos industriais afetam a saúde humana. Nesse estudo, os autores avaliaram amostras provenientes de áreas com processos de mineração e metalurgia e área rurais, no município de Bor, localizado no leste da Sérvia. Entre os elementos avaliados, chamou a atenção a concentração de As que, nos dados avaliados anualmente, excederam a legislação Servia, em todos os locais avaliados.

Zheng *et al*., (2010) realizaram um estudo na China, em uma região que possui uma fundição de zinco, para avaliar o risco associado a poeira com metais pesados com a saúde humana. Foi avaliada a poeira urbana na cidade de Huladão, onde as concentrações máximas de Hg, Pb, Cd, Zn e Cu foram de 5.212, 3903, 726.2, 79.869 e 1.532 mg kg^{-1}·e, respectivamente, 141, 181, 6724, 1257 e 77,4 vezes os valores encontrados nos sedimentos de fundo, avaliados também na região. O estudo afirma ainda que as concentrações variam com a distância da fonte de poluição, e que além da indústria, o tráfego contribui, de forma menos intensa, para a geração de metais pesados no ar.

Segundo Oliveira, *et al*. (2016) a necessidade de conhecer a composição mineralógica das fontes de poeiras de uma determinada região deve-se ao fato de que parte importante do fluxo de minerais, elementos e/ou compostos químicos que chega à atmosfera transportada pelos ventos é oriunda de solos. Portanto, o conhecimento da composição química do solo na região estudada foi relevante, uma vez que possibilitou a compreensão da magnitude dos possíveis impactos gerados pelo rompimento da barragem de Fundão na composição do ar.

Uma das premissas da pesquisa foi avaliar se a presença de elementos da poeira, como consequência do dessecamento da lama, poderia estar relacionada aos problemas de saúde recorrentemente reportados pela população das regiões afetadas e registrados, pós desastre, no município de Barra Longa. Nesse sentido interessante ocorrência foi observado quando a comparação entre amostras provenientes do ar de Barra Longa e Ouro Preto, afetada e não afetada, respectivamente, foram avaliadas.

Algumas ressalvas devem ser realizadas quando o compartimento avaliado é o ar; sabe-se que as variações das correntes de ventos podem influenciar de forma significativa o conceito de região afetada e não afetada, uma vez que as partículas do ar acabam tendo essa mobilidade. Porém salienta-se que, na região considerada não afetada, as concentrações encontradas para os metais avaliados são muito coerentes com as atividades desenvolvidas na região, e, ainda, com os valores de background da região.

Nesse sentido, é possível refletir que as concentrações dos metais encontradas nas amostras coletadas no município de Barra Longa podem não estar

necessariamente ligadas a poeira, consequente da lama. Porém importante a ser relatado é que, inegavelmente em Barra Longa, a sensação do ar “pesado” era sentida nitidamente nos trabalhos de campo. Esse fato remete a conclusão de que, os relatos de problemas de saúde recorrentes, imediatamente pós desastre, podem estar relacionados a grande concentração de partículas atmosféricas a que a população ficou exposta.

7.3 CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS DE POEIRA

7.3.1 PENEIRAMENTO DAS AMOSTRAS

As 18 amostras coletadas foram separadas em peneiras com abertura de 0,088, 0,053 e 0,044 mm (170, 270 e 325 mesh), nesta ordem. Posteriormente, quantificou-se a massa de cada fração, como demonstrado na Tabela 7.

De modo geral, ao longo dos meses de coleta, foram depositadas aproximadamente 5,00 gramas de poeira em cada pote coletor com capacidade para dois litros e área superficial de aproximadamente 0,021 m^2 o que poderia representar uma deposição de poeira média da ordem de quase 238 g de poeira por m^2.

Tabela 6 – Caracterização granulométrica das amostras de poeira avaliadas

Amostras	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
	X > 0,088 (mm) (mais grossa)	0,088 > X > 0,053 (mm)	0,053 > X > 0,044 (mm)	X< 0,044 (mm) (mais fina)
D1	1,136 g	1,087 g	1,098 g	1,099 g
D2	1,127 g	1,090 g	1,110 g	1,263 g
D3	1,187 g	1,115 g	1,159 g	1,712 g
D4	1,105 g	1,096 g	1,091 g	1,390 g
D5	1,124 g	1,092 g	1,117 g	1,299 g
D6	1,168 g	1,112 g	1,154 g	1,215 g
D7	1,566 g	1,272 g	1,348 g	1,700 g
D8	1,351 g	1,151 g	1,166 g	1,153 g
D9	1,246 g	1,719 g	1,857 g	2,350 g
D10	1,317 g	1,449 g	1,491 g	2,196 g
D11	1,172 g	1,089 g	1,105 g	1,107 g
D13	1,094 g	1,095 g	1,088 g	1,194 g
D14	1,139 g	1,099 g	1,097 g	1,116 g
D15	1,884 g	1,633 g	1,428 g	1,817 g
D16	1,161 g	1,113 g	1,118 g	1,109 g
D17	1,178 g	1,107 g	1,112 g	1,143 g
D12	1,165 g	1,094 g	1,113 g	1,167 g
D18	1,145 g	1,087 g	1,096 g	1,107 g

Analisando-se a Tabela 7 pode-se deduzir que a massa média das amostras de poeira foi de 5,036 g com desvio padrão de 0,89. Todavia, observa-se que as amostras D7, D9, D10 e D15 influenciaram o valor da média uma vez que apresentaram valores de massas elevados. Vale ressaltar que para esses pontos, os coletores foram instalados próximos a rodovias, o que possivelmente favoreceu ao maior acúmulo de

partículas. Tal fato pode ser atrelado ao tráfego intenso de máquinas e caminhões pesados da Samarco devido às obras de reconstrução das áreas afetadas.

O material particulado coletado apresentou-se homogêneo quanto à sua granulometria com aproximadamente 25% da massa de partículas sendo distribuída em cada uma das quatro faixas granulométricas adotadas. A distribuição granulométrica das amostras D3, D9 e D10 entretanto, seguiu outro padrão, uma percentagem maior que 30% foi observada na fração com abertura x>0,088. As amostras D2, D4, D5 e D7 indicaram percentagem entre 27 e 30% na fração com a mesma abertura. Ressalta-se que a amostra D9 apontou percentagem menor que 20% na fração com abertura x<0,044.

7.3.2 TAMANHO DAS PARTÍCULAS

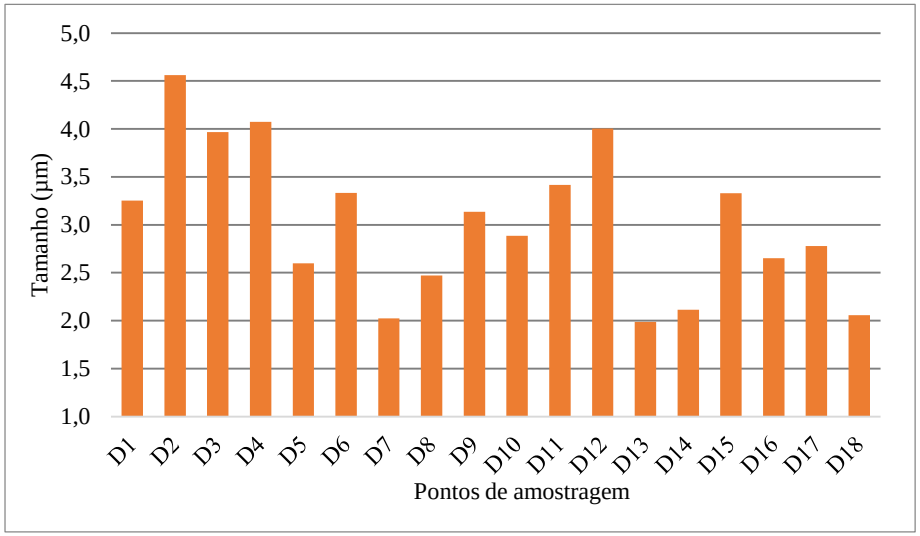
A Tabela a seguir apresenta a média do tamanho das partículas e do índice de polidispersão. Assim conclui-se que a dimensão das partículas apresentou desvio padrão de 0,78 em torno da média aritmética de 3,04 µm das partículas mais finas (Fração 4), implicando em um desvio padrão relativo de 25,60%. O índice de polidispersão observado ficou em torno de uma média aritmética de 0,91, apresentando desvio padrão de 0,10 e desvio padrão relativo de 10,98%, indicativo, portanto, de heterogeneidade do material. De acordo com Malvern (2013) o índice de polidispersão maior que 0,5 é indicativo de uma amostra polidispersa ou seja, as amostras são heterogêneas contendo partículas, agregados e poeira, ainda que tenham sido peneiradas.

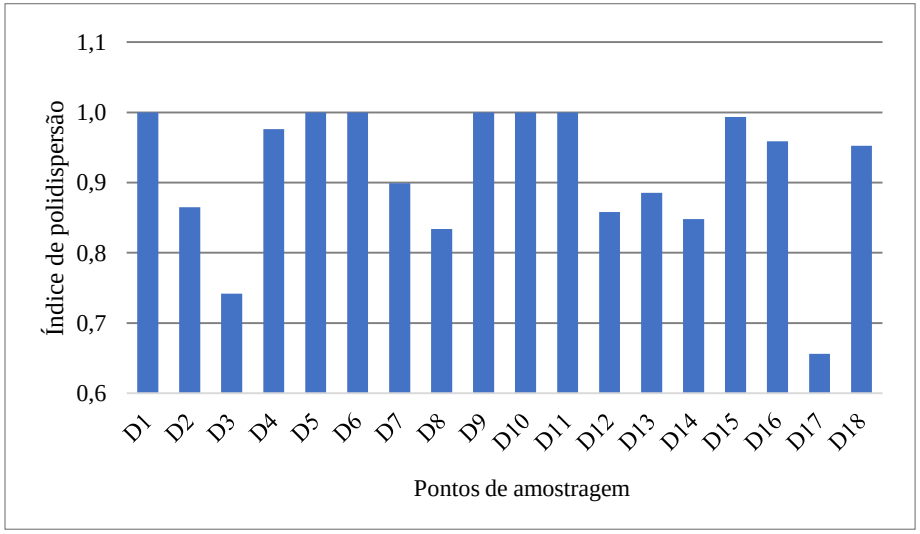
Tabela 7 – Peso e distribuição percentual de cada amostra em função da fração avaliada.

Pontos de amostragem	Peneiramento (g)				Massa total (g)	Percentagem (%)				Massa total (%)
	X > 0,088 mm	0,088 >X > 0,053 mm	0,053 > X > 0,044 mm	X < 0,044 mm		X > 0,088 mm	0,088 >X > 0,053 mm	0,053 > X > 0,044 mm	X < 0,044 mm	
	(mm)					(mm)				
D1	1,099	1,098	1,087	1,136	4,420	24,86	24,84	24,59	25,70	100,00
D2	1,263	1,11	1,09	1,127	4,590	27,52	24,18	23,75	24,55	100,00
D3	1,712	1,159	1,115	1,187	5,173	33,09	22,40	21,55	22,95	100,00
D4	1,39	1,091	1,096	1,105	4,682	29,69	23,30	23,41	23,60	100,00
D5	1,299	1,117	1,092	1,124	4,632	28,04	24,11	23,58	24,27	100,00
D6	1,215	1,154	1,112	1,168	4,649	26,13	24,82	23,92	25,12	100,00
D7	1,7	1,348	1,272	1,566	5,886	28,88	22,90	21,61	26,61	100,00
D8	1,153	1,166	1,151	1,351	4,821	23,92	24,19	23,87	28,02	100,00
D9	2,35	1,857	1,719	1,246	7,172	32,77	25,89	23,97	17,37	100,00
D10	2,196	1,491	1,449	1,317	6,453	34,03	23,11	22,45	20,41	100,00
D11	1,107	1,105	1,089	1,172	4,473	24,75	24,70	24,35	26,20	100,00
D12	1,167	1,112	1,094	1,165	4,538	25,72	24,50	24,11	25,67	100,00
D13	1,194	1,088	1,095	1,094	4,471	26,71	24,33	24,49	24,47	100,00
D14	1,116	1,097	1,099	1,139	4,451	25,07	24,65	24,69	25,59	100,00
D15	1,817	1,428	1,633	1,884	6,762	26,87	21,12	24,15	27,86	100,00
D16	1,109	1,118	1,113	1,161	4,501	24,64	24,84	24,73	25,79	100,00
D17	1,107	1,096	1,087	1,145	4,435	24,96	24,71	24,51	25,82	100,00
D18	1,143	1,112	1,107	1,178	4,540	25,18	24,49	24,38	25,95	100,00
				Média	5,036					
				Desvio padrão	0,890					
				RSD %	17,678					

Figura 20 – Tamanho das partículas e índice de polidispersão das amostras de poeira (Fração 4, X < 0,044 mm) coletadas nos pontos D1 à D18.

Pontos de amostragem	Média do tamanho das particulas (µm)	Média do índice de polidispersão
D1	3,25	1,00
D2	4,56	0,87
D3	3,97	0,74
D4	4,07	0,98
D5	2,60	1,00
D6	3,33	1,00
D7	2,02	0,90
D8	2,47	0,83
D9	3,14	1,00
D10	2,89	1,00
D11	3,42	1,00
D12	4,00	0,86
D13	1,99	0,89
D14	2,11	0,85
D15	3,33	0,99
D16	2,65	0,96
D17	2,78	0,66
D18	2,06	0,95
Média	3,04	0,91
Desvio padrão	0,78	0,10
RSD %	25,60	10,98





Considerando-se que aproximadamente 25% do material sólido depositado nos potes coletores de poeira encontrava-se dentro da faixa granulométrica mais fina ($x \leq 0,044$ mm) e que, dentre estas partículas encontravam-se micropartículas com dimensões médias menores do que 2,5 µm, é necessário apontar a possibilidade de que tais partículas sejam inaláveis e passíveis de serem depositadas no trato respiratório.

As doenças respiratórias foram uma das principais queixas relatadas pela população da área afetada após o rompimento da barragem de Fundão conforme apurado pela organização Greenpeace (2017) que constatou, em estudo realizado em Barra Longa, após o acidente, que cerca de 40,5% dos problemas de saúde relatados pelos pacientes alvo do estudo estavam relacionados às perturbações respiratórias. Analisando-se os mesmos dados e levando-se em consideração as faixas etárias, percebe-se que esse índice é de 60% para crianças de 0 a 13 anos e 30,6% e 35,5% para os idosos e adultos, respectivamente. Patologias associadas à pele foram registradas por 15,8% dos pacientes estudados sendo estes valores de 19,1% para os residentes próximos ao rio, 14,1% para os moradores do centro da cidade e 11,1% para aqueles residentes na zona rural do município.

Em um estudo anterior, realizado por Braga *et al*. (2007) sobre os impactos da exploração de minério na cidade de Itabira, MG, percebeu-se que os efeitos dos poluentes gasosos e do material particulado inalável, gerados por essa atividade, podem ser comparados aos dos poluentes atmosféricos emitidos em grandes centros urbanos. O material particulado lançado na atmosfera pode causar doenças cardiovasculares na circunvizinhança. Este estudo constatou, ainda, que a poluição do ar na cidade está relacionada a aumentos nos atendimentos de pronto-socorro por doenças respiratórias entre crianças e adolescentes, e por doenças cardiovasculares entre adultos.

A relação entre os MP e as perturbações respiratórias é notório, porém é relevante destacar ainda possível relação destes contaminantes com as afecções da pele. Durante realização dos trabalhos de campo, algumas das pessoas contactadas fortuitamente em Barra Longa e proximidades, queixaram-se de afecções nos olhos. Esses indivíduos, expostos à poeira, alegaram que, por efeito do MP, os olhos permaneciam “secos”, irritados e vermelhos. A hipótese de que a poeira gerada com a deposição da lama, contribuiu para os distúrbios identificados nos indivíduos expostos

ao MP inalável no município de Barra Longa e vizinhança, torna-se plausível, frente às nossas observações e aos relatos acima mencionados.

7.3.3 CONCENTRAÇÃO DE METAIS

Na Tabela 8 estão apresentados os resultados da frequência de detecção dos elementos químicos nas diferentes frações granulométricas das amostras analisadas por TXRF para cada um dos 18 pontos de amostragem.

As análises químicas realizadas apontaram frequências variáveis para os elementos presentes no material particulado coletado nos pontos de amostragem. De acordo com a Tabela 8 os elementos Eu, Lu, Nb, Sc, Tl, In, Pb, U, Ce, Ru, Ge, Se e Th apresentaram frequência inferior a 10% embora o Th tenha sido encontrado nas 4 frações das amostras. Os demais elementos foram observados em todas as amostras coletadas, com frequência superior a 10%.

Os elementos Br, Ti, K, Cu, Ca, Zn, Mn e Fe apresentaram uma média de frequência dos pontos maior que 50%. Destaque especial deve ser dado ao Fe que expressou uma média de 100% de frequência. Tal fato não causou estranheza visto que as concentrações de Fe em rejeitos do beneficiamento de minério, contido nas barragens localizadas no alto curso da bacia são elevadas (COSTA, 2001). É importante ressaltar que, o elemento Fe, principalmente, na forma de seus óxidos e/ou hidróxidos, possui grande capacidade de captura de metais potencialmente tóxicos influenciando na distribuição de elementos Ba, As, Mn, Cu, Pb e Ni (RODRIGUES, 2012).

Merece destaque a presença de As nas amostras analisadas, embora este elemento não fosse descrito como presente nos sedimentos depositados na Barragem de Fundão. Segundo Usese *et al*., (2017) sua ocorrência pode ser devida a fatores naturais, litológicos, e antrópicos, como consequência da mineração de ouro e do uso de pesticidas e herbicidas. Alguns estudos na bacia hidrográfica do rio do Gualaxo do Norte relatam concentrações elevadas de As tanto nos solos e sedimentos fluviais quanto em águas, principalmente, nas áreas intensamente afetadas pela atividade garimpeira de ouro na região (COSTA, 2001; RODRIGUES, 2012).

Tabela 8 – Frequência dos elementos em ordem crescente presentes nas diferentes frações granulométricas das amostras coletadas.

Elemento	Fração 1 X > 0,088 mm	Fração 2 0,088 >X > 0,053 mm	Fração 3 0,053 > X > 0,044 mm	Fração 4 X < 0,044 mm	Média da Frequência dos Pontos (%)	Frequência das Frações (%)
	Frequência (%)					
Eu	0,00	0,00	5,56	0,00	1,39	1
Lu	0,00	0,00	5,56	0,00	1,39	1
Nb	0,00	0,00	5,56	0,00	1,39	1
Sc	0,00	0,00	5,56	0,00	1,39	1
Tl	5,56	0,00	0,00	0,00	1,39	1
In	5,56	0,00	0,00	5,56	2,78	2
Pb	0,00	5,56	0,00	5,56	2,78	2
U	0,00	0,00	11,11	0,00	2,78	1
Ce	5,56	0,00	5,56	5,56	4,17	3
Ru	0,00	0,00	16,67	0,00	4,17	1
Ge	22,22	0,00	0,00	0,00	5,56	1
Se	0,00	16,67	0,00	22,22	9,72	2
Th	16,67	5,56	11,11	5,56	9,72	4
Ag	22,22	5,56	16,67	11,11	13,89	4
Ba	22,22	16,67	11,11	5,56	13,89	4
Cr	22,22	16,67	5,56	22,22	16,67	4
V	11,11	27,78	27,78	16,67	20,83	4
Rb	27,78	27,78	22,22	16,67	23,61	4
As	38,89	33,33	33,33	27,78	33,33	4
Ni	50,00	38,89	44,44	38,89	43,06	4
Sr	27,78	38,89	50,00	66,67	45,83	4
Br	61,11	50,00	55,56	38,89	51,39	4
Ti	55,56	61,11	66,67	66,67	62,50	4
K	66,67	72,22	72,22	77,78	72,22	4
Cu	83,33	100,00	94,44	88,89	91,67	4
Ca	100,00	94,44	94,44	94,44	95,83	4
Zn	94,44	100,00	100,00	88,89	95,83	4
Mn	100,00	100,00	94,44	100,00	98,61	4
Fe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	4

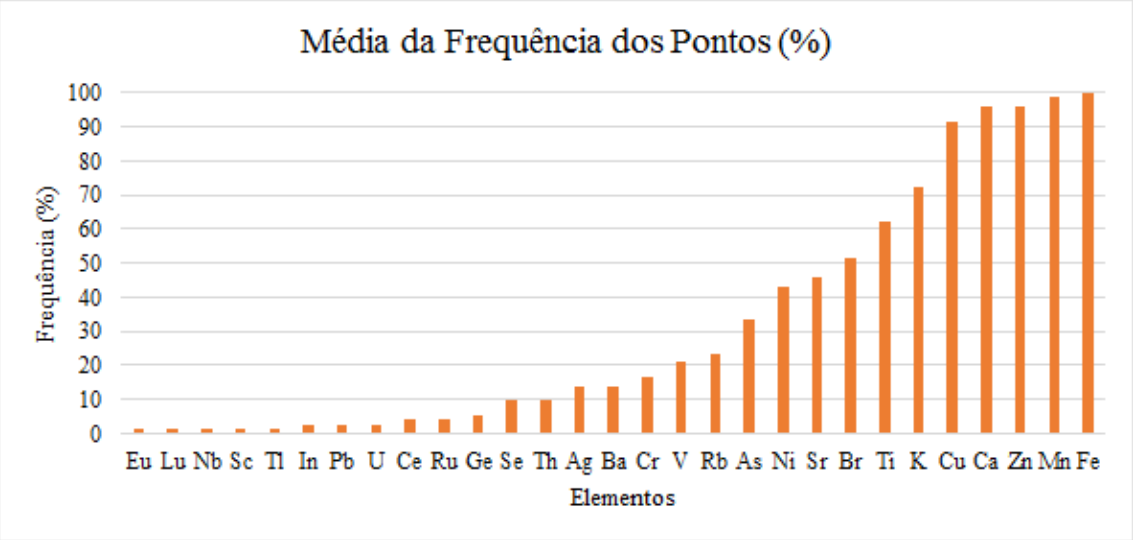
Ainda, no caso específico do arsênio, é importante ressaltar que uma parte considerável da população mundial tem contato com o arsênio através da água potável, estando expostos a riscos de saúde visto que o As é tóxico e a seus compostos podem causar câncer de pele e de pulmão, quando a inalação do ar contaminado ocorre (TROIANO *et al*., 2017).

A partir dos dados apresentados na Tabela 8 foi gerado um gráfico para possibilitar melhor visualização da frequência relativa de cada elemento nos pontos de amostragem. A partir disso, optou-se por investigar, mais detalhadamente, os elementos que apresentaram frequência superior a 20% ou seja, V, Rb, As, Ni, Sr, Br, Ti, K, Cu, Ca, Zn, Mn e Fe, em ordem crescente de frequência. Tratam-se de elementos cuja ocorrência está relacionada tanto às características geológicas da região de estudo quanto às interferências de caráter antropogênico. Foram encontrados, com frequência

relativamente alta, Zn, Fe, e elementos traço classificados como metais pesados de reconhecido perfil toxicológico como Br e Cu além de elementos ultra traço como o Mn, o As, o V e o Ni. Como esperado, os elementos constituintes de minerais e rochas, de origem predominante de fontes naturais, tais como Rb, Ti, Ca e K também foram frequentemente encontrados.

Para facilitar a discussão as diversas amostras coletadas e a sua composição química serão discutidas seguindo-se a ordem de localização dos pontos em relação ao curso do rio Gualaxo do Norte. Os pontos serão agrupados em três grupos principais, Alto, Médio e Baixo curso do rio Gualaxo do Norte.

Figura 21 - Ocorrência de elementos químicos nas amostras analisadas (%)



Alto curso - rio Gualaxo do Norte

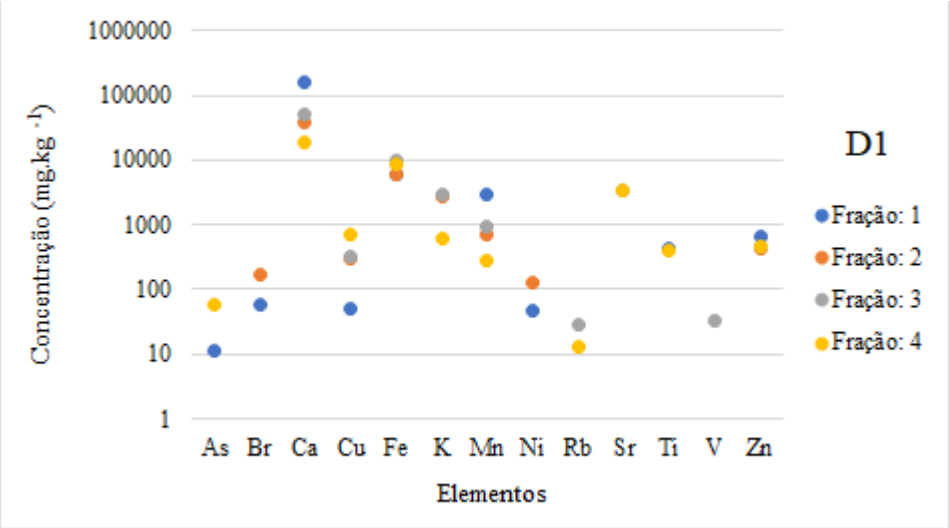
A Tabela 9 e a Figura 21 apresentam a variação dos elementos para o ponto D1, localizado no alto rio Gualaxo do Norte, sendo possível destacar a presença, nas quatro frações, de Ca, Cu, Fe, Mn e Zn. Verifica-se que o elemento Ca, quando comparado aos demais, apresentou concentrações elevadas em todas as frações, em particular para a Fração 1, cerca de 163400,00 $mg.Kg^{-1}$. Mendonça (2012) sugere que os valores anômalos de íons Ca no alto curso do rio Gualaxo do Norte estão relacionados ao processo de intemperismo que ocorrem nas rochas carbonáticas, característica do Quadrilátero Ferrífero.

Outro elemento com valor em destaque é o Fe, que apresentou concentrações na ordem de 9940,00 mg.Kg^{-1}, para a Fração 3. Novamente ressalta-se o quanto as características geológicas e as atividades minerárias desenvolvidas na região influenciam, uma vez que a extração de minério de ferro nessa área leia-se, Quadrilátero Ferrífero, é uma prática constante e intensa.

Tabela 9 – Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D1.

Ponto D1	Concentração (mg.Kg $^{-1}$)			
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
Elemento	X > 0,088	0,088 >X > 0,053	0,053> X > 0,044	X < 0,044
	(mm)			
As	11,40	0,00	0,00	58,10
Br	57,80	174,70	0,00	0,00
Ca	163400,00	38240,00	51700,00	18450,00
Cu	51,50	296,00	329,00	696,00
Fe	6100,00	5980,00	9940,00	8490,00
K	0,00	2750,00	2940,00	627,00
Mn	3011,00	694,00	970,00	271,00
Ni	45,60	124,00	0,00	0,00
Rb	0,00	0,00	28,40	12,90
Sr	0,00	Not det.	3512,00	3376,00
Ti	426,00	0,00	0,00	398,00
V	0,00	0,00	33,60	0,00
Zn	635,00	414,00	471,00	458,00

Figura 22 – Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D1 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 > X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044.



Para o ponto D1 ainda destacam-se alguns elementos importantes, como por exemplo o As, que apresentou maior concentração na fração 4, com cerca de 58,10 $mg.Kg^{-1}$. Sobre a presença desse elemento verifica-se que sua ocorrência na região é antiga e muito relacionada a extração do ouro, principalmente no distrito de Antônio Pereira – OP, na qual sua prática ainda é realizada de forma bem rudimentar (COSTA, 2001).

O Br e Ni apresentaram consideráveis valores na fração 2, respectivamente 174,70 e 124,00 $mg.Kg^{-1}$. O K também obteve concentrações notáveis na fração 1, 2940,00 $mg.Kg^{-1}$, e na fração 2, 2750,00 $mg.Kg^{-1}$. A presença de Ti foi identificada nas frações 1 e 4, apresentando valores de 426,00 $mg.Kg^{-1}$ e 398,00 $mg.Kg^{-1}$, respectivamente.

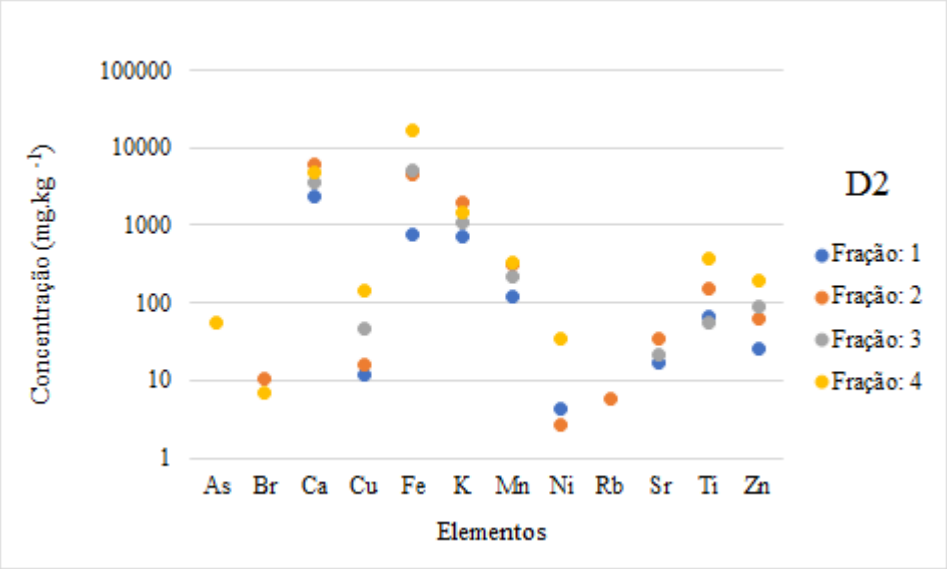
Médio curso – rio Gualaxo do Norte

Na porção média do rio estavam localizados 12 pontos de coleta, denominados sequencialmente como D2 a D14. Mais especificamente os D2 e D3 estavam localizados no distrito de Olaria enquanto os demais, localizavam-se no distrito de Paracatu de Baixo, ambos pertencentes ao município de Mariana – MG. Nas Figura 23 e 23 estão apresentadas as concentrações dos diversos elementos nos pontos D2 e D3, destacando-se para ambos a presença de Ca, Cu, Fe, K, Mn, Ti e Zn, em todas as frações avaliadas. Ainda, deve-se ressaltar as elevadas concentrações de Ca, Fe e K.

Tabela 10 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D2.

Ponto D2	Concentração (mg.Kg $^{-1}$)			
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
Elemento	X > 0,088	0,088 >X > 0,053	0,053> X > 0,044	X < 0,044
	(mm)			
As	0,00	0,00	0,00	54,90
Br	0,00	10,67	0,00	7,07
Ca	2412,00	5935,00	3603,00	4676,00
Cu	12,06	15,90	46,20	140,40
Fe	776,80	4427,00	5207,00	17000,00
K	738,00	1980,00	1065,00	1460,00
Mn	122,50	312,40	214,50	332,00
Ni	4,31	2,70	0,00	35,60
Rb	0,00	5,76	0,00	0,00
Sr	16,76	33,80	21,90	Not det.
Ti	66,90	152,20	54,80	372,00
Zn	25,80	61,90	91,30	199,10

Figura 23 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D2 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 > X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044.

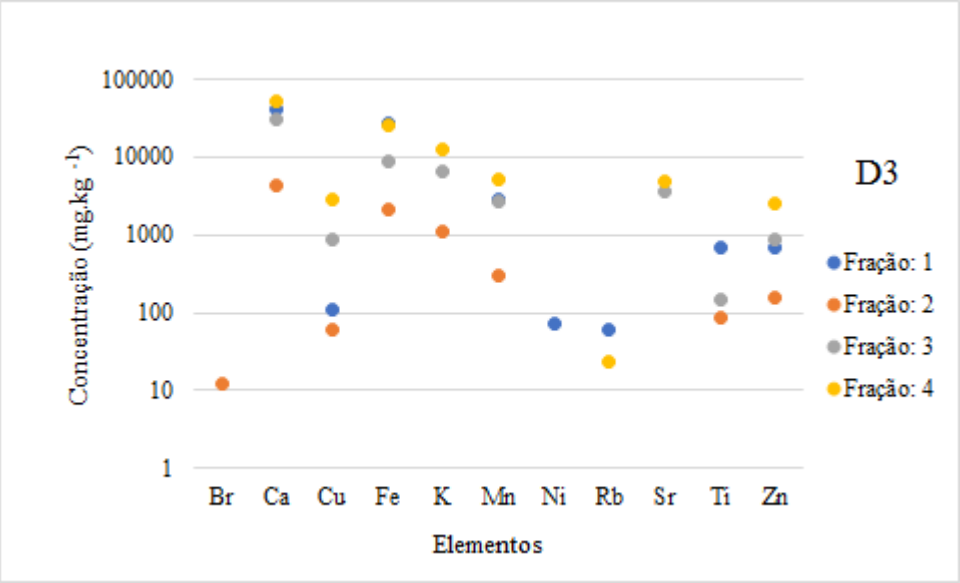


Como já mencionado, a presença de Ca e Fe está diretamente relacionada às características do solo presente a montante do rio. Tais minerais, durante o processamento do ferro ou através de processos intempéricos, acabam por liberar, o íon cálcio. O elemento potássio pode estar associado ao descarte de efluentes não tratados na região, fazendo com que esse componente se integre aos solos e esteja presente nas partículas de poeiras.

Tabela 11 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D3.

Ponto D3	Concentração (mg.Kg $^{-1}$)			
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
Elemento	X > 0,088	0,088 >X > 0,053	0,053> X > 0,044	X < 0,044
	(mm)			
Br	0,00	11,90	0,00	0,00
Ca	42200,00	4415,00	30710,00	51700,00
Cu	107,00	59,10	852,00	2785,00
Fe	27030,00	2076,00	8980,00	25150,00
K	0,00	1129,00	6520,00	12280,00
Mn	2790,00	303,00	2749,00	5240,00
Ni	72,00	0,00	0,00	0,00
Rb	60,70	0,00	Not det.	23,40
Sr	Not det.	Not det.	3706,00	4980,00
Ti	699,00	85,60	149,00	0,00
Zn	680,00	160,10	892,00	2522,00

Figura 24 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D3 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 > X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044.



Em relação aos pontos localizados em Paracatu de Baixo, D4 a D14, observou-se que os elementos Ca, Fe, Mn e Zn apresentaram altas concentrações em todas as frações avaliadas, sendo os maiores valores observados para os elementos Ca e Fe, sendo que o ponto D4 apresentou as mais altas concentrações quando comparado aos demais. Santos *et al.*, (2016) em pesquisa realizada pela Fundação COPPETEC inferiram que os valores altos de concentrações de Fe encontrados em sedimentos analisados nas áreas atingidas são totalmente previsíveis, uma vez que a região é

marcada pela intensa atividade de extração desse metal, sendo o rejeito formado principalmente de compostos que possuem Fe como constituinte majoritário. Fato esse corroborado pelo estudo de Gomes *et al*., (2011) que realizaram a caracterização dos finos presentes no rejeito do beneficiamento do minério de ferro, encontrando teores de 48,08% de FeO_3.

O Cu esteve presente em quase todos os pontos, sendo 13,27 $mg.Kg^{-1}$ o valor mínimo, observado no ponto D11, fração 1. No ponto D5 detectou-se maiores concentrações na fração 4 (mais finas) obtendo o valor máximo de 5393,00 $mg.Kg^{-1}$ de Cu. O K não foi detectado em todas as frações, mas visto sua relação com a atividade antropogênica, torna-se um componente importante. O máximo valor observado foi de 48600,00 $mg.Kg^{-1}$ na fração 2, no ponto D4 enquanto as menores concentrações, 138,10 $mg.Kg^{-1}$, foram encontradas na fração 1, do ponto D6.

Um elemento que mereceu atenção especial devido à sua toxicidade foi o As. É importante ressaltar que a área de estudo estava compreendida dentro e uma região onde as altas concentrações de As são esperadas, dadas as características geológicas locais. Em sua pesquisa, Santos *et al*., (2016) ainda afirma que os altos valores de As, Mn e Zn encontrados estão de acordo com o background da região, corroborados por estudos de Costa *et al*., (2003), Rodrigues *et al*., (2015) e CPRM (2015). Sendo assim os valores das concentrações encontrados para as amostras avaliadas podem estar também relacionados com os componentes do solo da região.

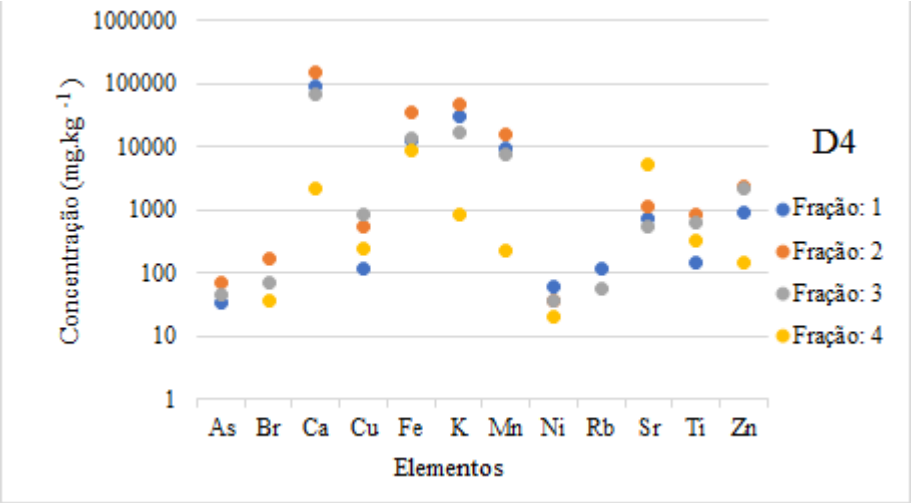
Outro fator relevante observado nesses pontos se refere a localização dos mesmos, isto é, verificou-se que os situados nas margens do rio Gualaxo do Norte apresentaram valores superiores aos que foram instalados no interior do que restou de algumas estruturas construídas (D9 e D11). Tal fato pode ser explicado devido as barreiras que os locais acabavam apresentando para a contenção das partículas de poeira, ou também relacionados aos solos característicos das margens do rio, uma vez que, estima-se que, os metais encontrados na água, estão ligados aos metais que estavam presentes nos sedimentos e que foram revolvidos com o volume de lama que atingiu o corpo d'água (FERNANDES, *et al*., 2016). Merece destaque o ponto D9, que apresentou valor máximo de As de 82,80 $mg.Kg^{-1,}$ na fração 3, bastante fina.

Tabela 12 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D4 e D5.

Ponto D4	Concentração ($mg.Kg^{-1}$)			
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
Elemento	X > 0,088	0,088 >X > 0,053	0,053> X > 0,044	X < 0,044
	(mm)			
As	33,8	70,5	47,3	0
Br	0	166	69,1	36,3
Ca	95450	155400	69760	2196
Cu	120,7	561	876	242
Fe	13240	35410	13660	9120
K	31220	48600	16570	824
Mn	9860	15820	7660	226
Ni	59,3	35,4	35,4	20,9
Rb	119,3	0	55,2	Not det.
Sr	727	1136	550	5193
Ti	152	845	636	326
Zn	943	2346	2191	148,9

Ponto D5	Concentração ($mg.Kg^{-1}$)			
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
Elemento	X > 0,088	0,088 >X > 0,053	0,053> X > 0,044	X < 0,044
	(mm)			
As	4,28	0,00	7,55	42,70
Br	6,21	12,16	0,00	59,60
Ca	4255,00	4604,00	2827,00	42540,00
Cu	539,40	30,10	102,70	5393,00
Fe	2934,00	2558,00	630,30	29350,00
K	1184,00	0,00	750,00	11840,00
Mn	764,40	487,00	321,90	7606,00
Ni	6,52	0,00	6,39	66,90
Rb	Not det.	0,74	2,80	Not det.
Sr	Not det.	11,39	5,71	Not det.
Ti	72,50	100,60	1301,40	443,00
V	0,00	0,00	24,50	0,00
Zn	425,20	84,50	105,40	4251,00

Figura 25 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D4 e D5 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 > X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044.



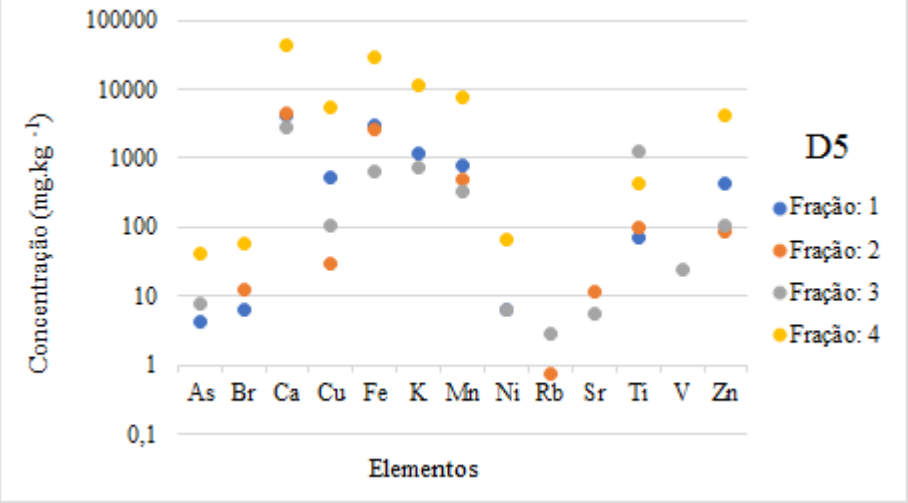
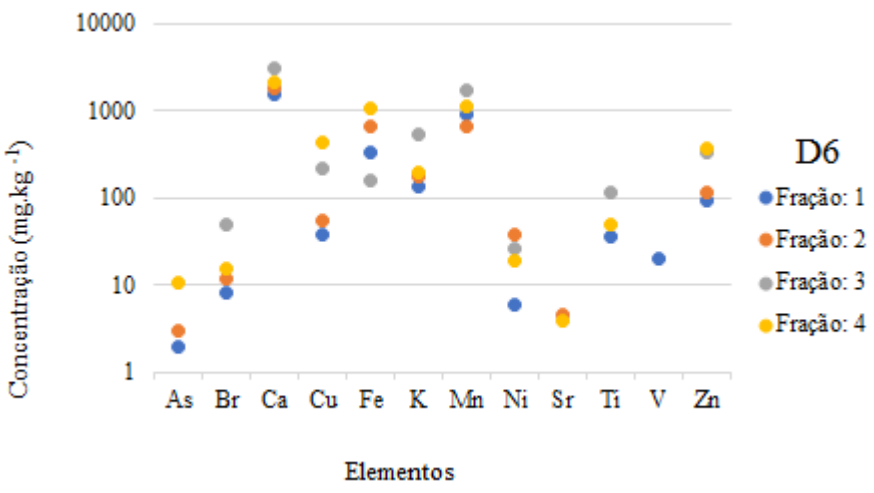


Tabela 13 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D6 e D7.

Ponto D6	Concentração (mg.Kg $^{-1}$)			
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
Elemento	X > 0,088	0,088 >X > 0,053	0,053> X > 0,044	X < 0,044
	(mm)			
As	2,01	2,96	0,00	10,66
Br	8,39	12,13	50,80	15,16
Ca	1552,00	1845,00	3138,00	2108,00
Cu	38,50	55,10	213,00	429,20
Fe	338,10	660,40	159,80	1080,00
K	138,10	179,00	532,00	192,00
Mn	897,60	652,00	1677,00	1115,00
Ni	5,89	38,90	26,40	19,10
Rb	0,00	Not det.	7080,00	0,00
Ti	35,30	0,00	118,00	50,50
V	20,70	0,00	0,00	0,00
Zn	92,40	115,80	332,00	361,20

Ponto D7	Concentração (mg.Kg $^{-1}$)			
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
Elemento	X > 0,088	0,088 >X > 0,053	0,053> X > 0,044	X < 0,044
	(mm)			
As	0,00	22,20	0,00	49,20
Ba	78,80	0,00	0,00	0,00
Br	0,00	0,00	8,41	0,00
Ca	2000,00	953,00	2290,00	1172,00
Cu	12,30	107,30	472,90	114,10
Fe	2884,00	229,00	179,00	185,00
K	406,00	0,00	421,00	0,00
Mn	331,90	268,00	644,00	323,00
Ni	0,00	80,10	0,00	0,00
Rh	379,00	0,00	0,00	0,00
Zn	55,60	65,10	236,70	46,20

Figura 26 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D6 e D7 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 > X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044.



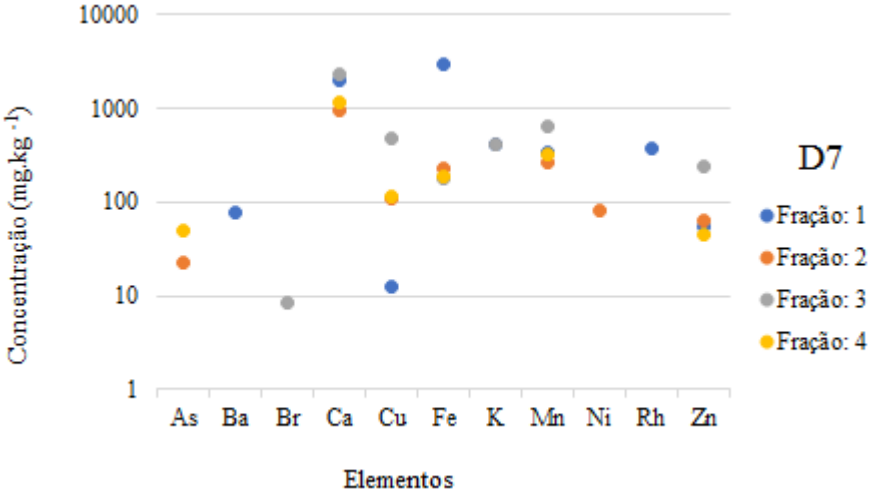
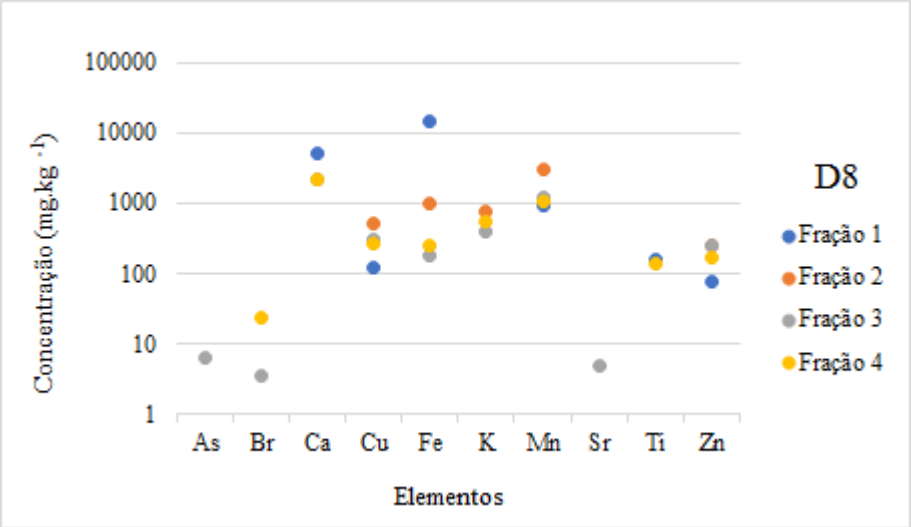


Tabela 14 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D8 e D9.

Ponto D8	Concentração (mg.kg $^{-1}$)			
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
Elemento	X > 0,088	0,088 >X > 0,053	0,053> X > 0,044	X < 0,044
	(mm)			
As	0,00	0,00	6,30	0,00
Br	0,00	0,00	3,63	23,10
Ca	5200,00	0,00	2192,00	2218,00
Cu	123,70	510,00	314,20	264,30
Fe	14970,00	1016,00	186,10	257,00
K	0,00	744,00	390,00	549,00
Mn	920,00	3065,00	1193,00	1045,00
Sr	0,00	Not det.	5,04	0,00
Ti	159,00	0,00	0,00	142,00
Zn	76,40	250,00	243,30	171,70

Ponto D9	Concentração (mg.kg $^{-1}$)			
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
Elemento	X > 0,088	0,088 >X > 0,053	0,053> X > 0,044	X < 0,044
	(mm)			
As	0,00	0,00	82,80	0,00
Br	0,00	0,00	0,00	18,20
Ca	361,00	794,00	0,00	781,00
Cu	41,80	17,30	58,90	0,00
Fe	2574,00	1887,00	10080,00	4814,00
K	0,00	0,00	392,00	0,00
Mn	101,30	178,60	156,00	295,00
Ti	0,00	0,00	163,00	0,00
V	0,00	95,20	186,00	0,00
Zn	44,30	34,60	36,60	65,40

Figura 27 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D8 e para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 >X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044.



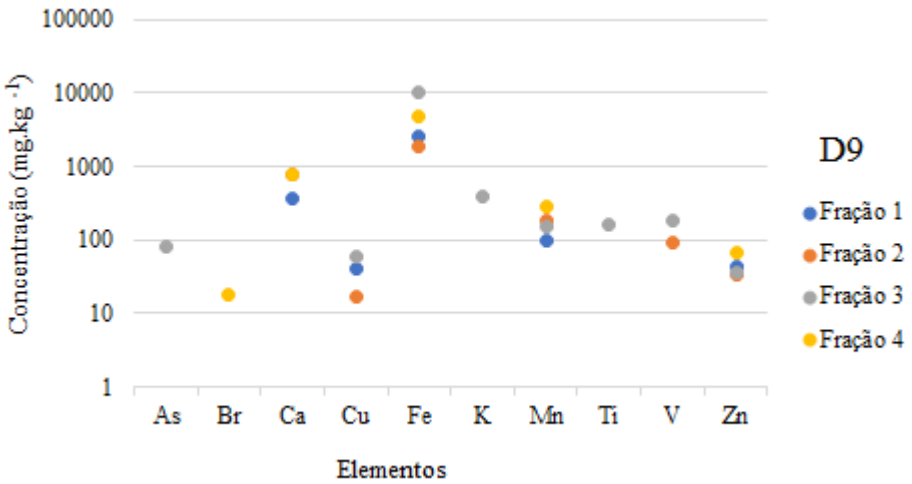
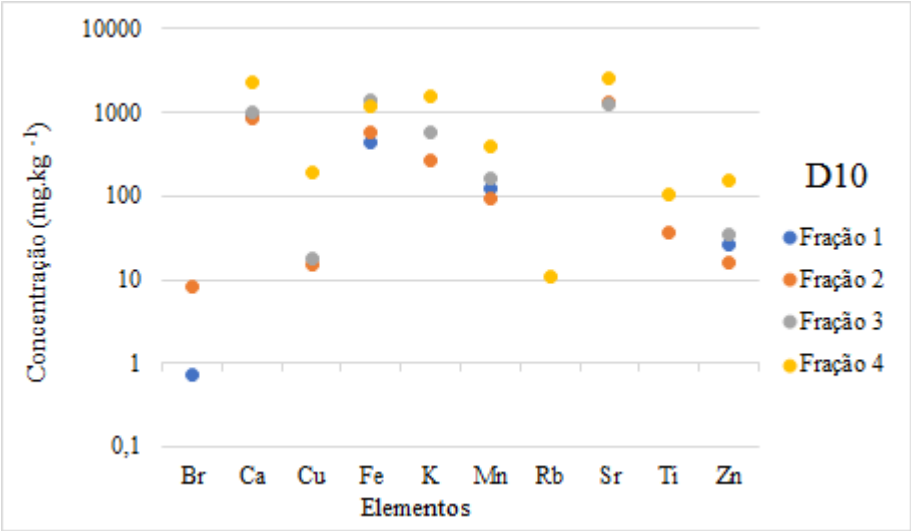


Tabela 15 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D10 e D11.

Ponto D10	Concentração (mg.kg $^{-1}$)			
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
Elemento	X > 0,088	0,088 >X > 0,053	0,053> X > 0,044	X < 0,044
	(mm)			
Br	0,71	8,42	0,00	0,00
Ca	878,00	852,00	1009,00	2359,00
Cu	0,00	15,50	17,40	191,20
Fe	437,00	568,20	1373,00	1175,00
K	0,00	274,00	567,00	1583,00
Mn	126,50	93,60	165,80	394,00
Rb	0,00	0,00	0,00	10,90
Sr	0,00	1309,70	1267,00	2619,00
Ti	0,00	37,30	0,00	105,80
Zn	26,70	16,20	34,50	151,10

Ponto D11	Concentração (mg.kg $^{-1}$)			
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
Elemento	X > 0,088	0,088 >X > 0,053	0,053> X > 0,044	X < 0,044
	(mm)			
As	0,00	6,32	73,70	0,00
Br	12,29	12,26	136,30	0,00
Ca	7054,00	15530,00	3420,00	4110,00
Cu	13,27	76,60	0,00	143,20
Fe	467,50	1165,00	1421,00	742,00
K	204,00	751,00	0,00	0,00
Mn	392,60	786,00	0,00	210,00
Ni	1,68	0,00	0,00	0,00
Sr	Not det.	70,60	0,00	2470,00
Ti	0,00	0,00	0,00	106,00
Zn	91,60	182,90	98,20	94,20

Figura 28 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D10 e D11 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 >X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044.



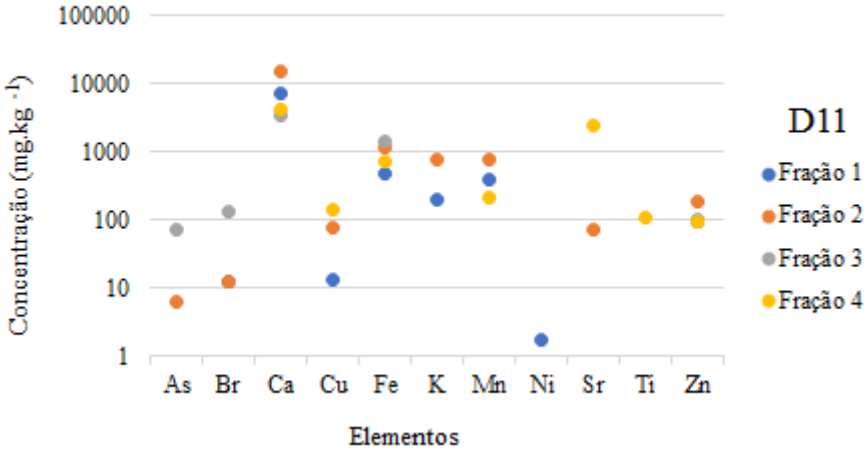
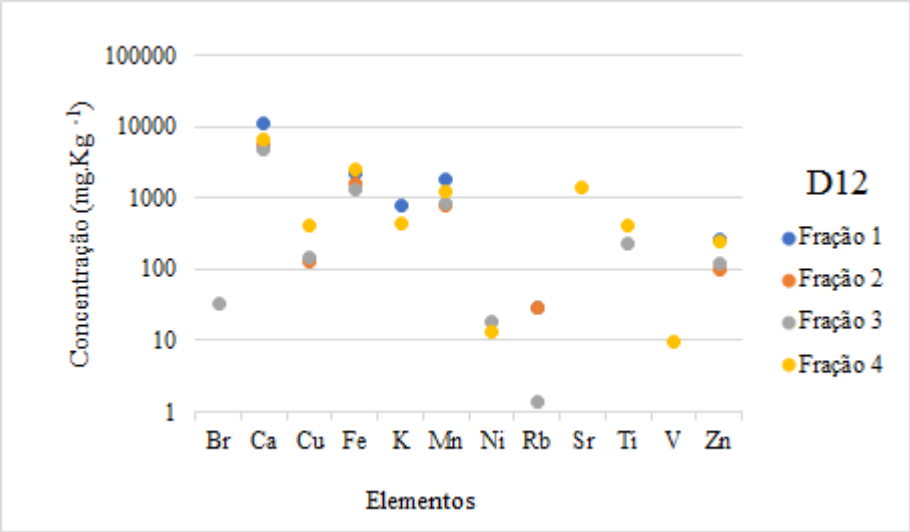


Tabela 16 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D12 e D13

Ponto D12	Concentração (mg.kg $^{-1}$)			
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
Elemento	X > 0,088	0,088 >X > 0,053	0,053> X > 0,044	X < 0,044
	(mm)			
Br	0,00	0,00	33,90	0,00
Ca	11060,00	5350,00	4920,00	6480,00
Cu	0,00	132,00	150,60	423,20
Fe	2164,00	1571,00	1305,00	2520,00
K	779,00	0,00	0,00	428,00
Mn	1780,00	767,00	820,00	1241,00
Ni	0,00	0,00	18,80	13,30
Rb	29,30	29,40	1,40	0,00
Sr	0,00	0,00	Not det.	1409,00
Ti	0,00	0,00	227,00	410,00
V	0,00	0,00	0,00	9,80
Zn	259,00	99,70	119,10	251,70

Ponto D13	Concentração (mg.kg $^{-1}$)			
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
Elemento	X > 0,088	0,088 >X > 0,053	0,053> X > 0,044	X < 0,044
	(mm)			
Br	30,10	0,00	27,80	0,00
Ca	3345,00	4127,00	4785,00	6280,00
Cu	0,00	148,60	126,10	580,00
Fe	432,00	567,00	378,90	433,00
K	393,00	653,00	0,00	1264,00
Mn	1523,00	2540,00	2317,00	2373,00
Ni	0,00	0,00	15,60	0,00
Sr	Not det.	0,00	0,00	25,70
Ti	72,50	127,00	1301,40	0,00
V	0,00	120,00	0,00	0,00
Zn	85,60	162,00	219,70	530,00

Figura 29 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D12 e D13 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 >X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044.



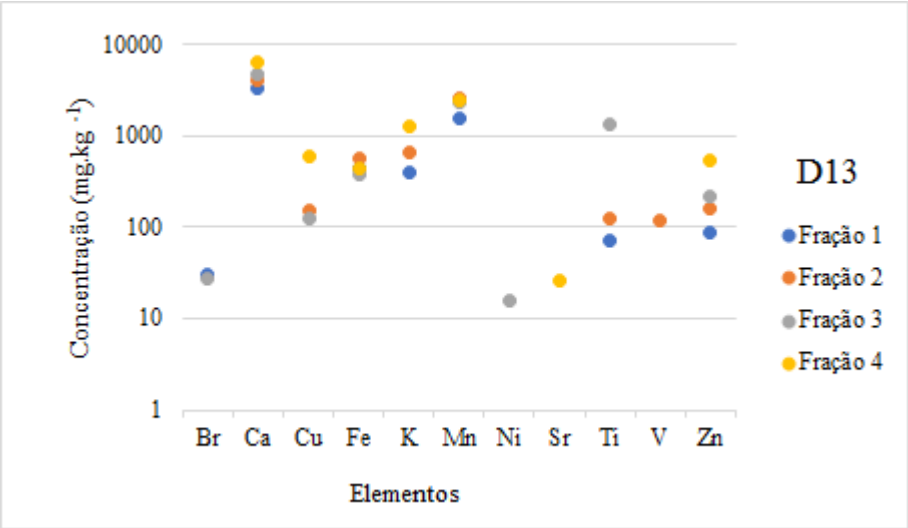
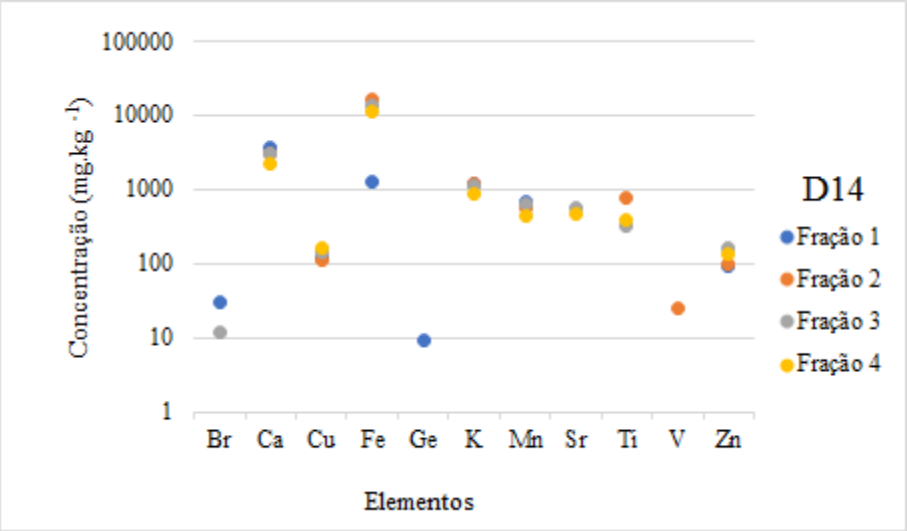


Tabela 17 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D14.

Ponto D14	Concentração (mg.kg $^{-1}$)			
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
Elemento	X > 0,088	0,088 >X > 0,053	0,053> X > 0,044	X < 0,044
	(mm)			
Br	30,20	0,00	11,64	0,00
Ca	3651,00	3015,00	2975,00	2178,00
Cu	121,10	109,10	139,40	164,70
Fe	1260,00	16050,00	13554,00	11090,00
Ge	9,00	0,00	0,00	0,00
K	1206,00	1161,00	1137,00	871,00
Mn	688,00	556,00	653,00	449,00
Sr	Not det.	0,00	576,90	479,00
Ti	0,00	782,00	326,00	394,00
V	0,00	25,70	0,00	0,00
Zn	94,30	97,80	159,40	138,40

Figura 30 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D14 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 >X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044.



O desastre de Fundão acometeu severamente a parte média da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte e nesse sentido os distritos de Paracatu de Baixo e Olaria foram severamente afetados com o rejeito. Segundo Lacaz *et al.*, (2017) a lama atingiu cera de 1430,00 hectares de terra, tornando-as improdutivas, devido a alteração da fertilidade do solo. Sendo assim, nessa região, verifica-se que o rejeito não foi retirado, isto é, ainda estão sobre o solo dessas regiões causando preocupação

visto que, de acordo com Paterlini (2007) uma das fontes de material particulado ocorre pela ressuspensão de materiais presentes no solo.

Nesse sentido, intui-se que o material particulado das regiões afetadas, poderá apresentar características, em termos de composição química elementar, semelhantes às da lama advinda do barramento. Pires e seus colaboradores, (2003) realizaram pesquisa com o intuito de averiguar o potencial poluidor do resíduo processado pela Samarco Mineração e para tal avaliaram a composição química do material minerado e do rejeito produzido durante o processo de beneficiamento de minério de ferro. Na avaliação, entre outros elementos, foram identificados Fe (0,069 $\mu g.ml^{-1}$) e Mn (0,006 $\mu g.ml^{-1}$), estando ambos abaixo dos limites estabelecidos pela legislação: 0,3 e 0,1 $\mu g.ml^{-1}$para Fe e Mn respectivamente, para o rejeito que chega ao barramento.

Na mesma pesquisa os autores afirmam que, além dos metais apresentarem concentrações inferiores ao permitido pela legislação, análise realizada para os metais Cd, Cr, Pb, Mn, Fe e Na, a goetita, presente como parte do rejeito, apresenta a propriedade de reter tais metais, por meio da adsorção. Sendo assim, os mesmos concluem que os metais pesados, são detectados ainda em concentrações menores no extrato líquido, devido ao processo de absorção na goetita.

Assim, considerando-se tais fatos, é possível que a origem dos metais detectados no material particulado coletado e avaliado, esteja correlacionada ao revolvimento dos sedimentos de fundo de rio, que ocorreu devido a energia com que a lama de rejeito atingiu o corpo d'água, e solos da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte.

Baixo curso – rio Gualaxo do Norte

No baixo curso do rio Gualaxo do Norte foram amostrados quatro pontos. Um no distrito de Gesteira (D15) enquanto os outros três, localizavam-se na cidade de Barra Longa (D16, D17 e D18). O primeiro distrito, como já mencionado, foi um dos locais mais afetados com a deposição da lama; o segundo teve as regiões próximas ao rio atingidas diretamente pela lama, enquanto outras áreas foram afetadas por um grande volume de poeira produzida após a secagem da mesma. Segundo relatórios do Greenpeace (2017), esta poeira gerada após a dessecação da lama pode estar relacionada às enfermidades relatadas pela população do município.

Nos pontos D15 os elementos Ca, Cu, Fe, Mn e Zn foram detectados em todas as frações avaliadas. No ponto D15 também foram observadas concentrações de As e Br de 29,50 e 55,60 $mg.Kg^{-1}$, respectivamente, na fração 1, 24,90 $mg.Kg^{-1}$ de Ni na fração 3, 75,40 $mg.Kg^{-1}$ de K na fração 4 e 16,40 $mg.Kg^{-1}$ de Ti na fração 2. A concentração para os elementos Ca, Cu, Fe e Mn, foram as menores quando comparadas aos pontos localizados na mesma região.

As concentrações do ponto D16 foram maiores que o D15, sendo os valores detectados para o Ca, o Fe e o Mn de, respectivamente, 122100,00, 38510,00 e 4347,00 $mg.Kg^{-1}$, para a fração 1 e ainda 471,00 $mg.Kg^{-1}$ de Cu, na fração 3. Ainda na fração 1 (D16) foram encontradas altas concentrações de K, 4347,00 $mg.Kg^{-1}$ e Br, 51,00 $mg.Kg^{-1}$. Na fração 3 da mesma amostra, foram encontrados 965,00 $mg.Kg^{-1}$ de Zn. O ponto D16 não apresentou concentrações de As e dois elementos foram identificados em apenas uma fração, sendo eles Ni, com um concentração de 19,80 $mg.Kg^{-1}$ na fração 4 e Rb, com uma concentração de 1,32 $mg.Kg^{-1}$ na fração 2.

O ponto D17 apresentou concentração elevadas na fração 1, sendo elas Ca 17510,00 $mg.Kg^{-1}$, Cu 43,80 $mg.Kg^{-1}$, Fe 19281,00 $mg.Kg^{-1}$, K 1494,00 $mg.Kg^{-1}$, Mn 368,20 $mg.Kg^{-1}$ e Zn 101,50 $mg.Kg^{-1}$, destaque para a concentração elevada de Ca e Fe. O ponto D18 apresentou maiores concentração de Ca (27310,00 $mg.Kg^{-1}$), Fe (15174,00 $mg.Kg^{-1)}$, K (1784,00 $mg.Kg^{-1}$) e Mn (382,60 $mg.Kg^{-1}$), na fração 4, sendo essa a que apresenta maior risco a saúde.

Sabe-se ainda que a região do alto rio Gualaxo do Norte é marcada pela intensa exploração de minério de Fe, devido a presença de rochas de formação Cauê. Segundo Rodrigues (2012) todos os metais relacionados com o processo de beneficiamento do Fe podem apresentar concentrações em toda a extensão da bacia, corroborando com os valores encontrados para os pontos avaliados na cidade de Barra Longa.

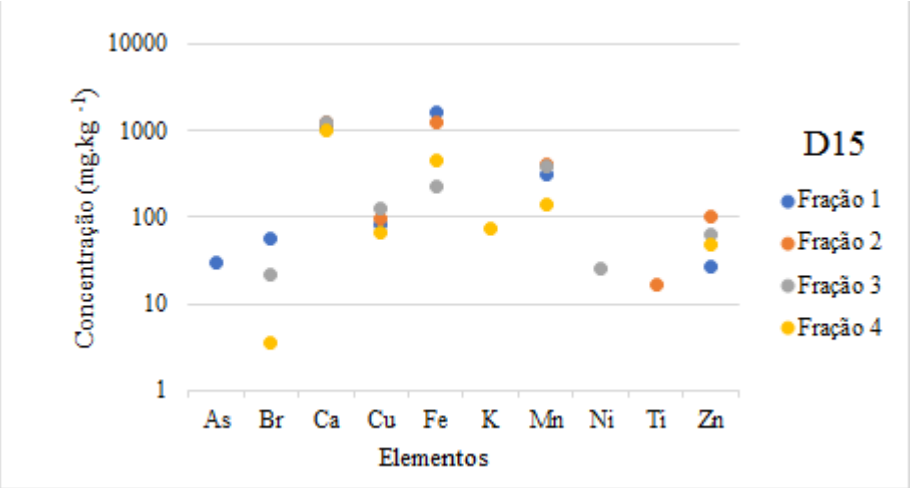
Os maiores valores encontrados para os pontos D16, D17 e D18 podem estar relacionados a maior intensidade de tráfego e maior fluxo de pessoas, devido aos trabalhadores relacionados as ações de mitigação da cidade e o abrigo das famílias que tiveram suas residências afetadas pela lama, e a retirada da lama das ruas da cidade, o que contribuiu para o aumento da disponibilidade de material particulado.

Tabela 18 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D15 e D16.

Ponto D15	Concentração (mg.kg $^{-1}$)			
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
Elemento	X > 0,088	0,088 >X > 0,053	0,053> X > 0,044	X < 0,044
	(mm)			
As	29,50	0,00	0,00	0,00
Br	55,60	0,00	22,20	3,57
Ca	1079,00	1258,00	1217,00	1001,00
Cu	82,90	94,00	128,10	66,70
Fe	1622,00	1261,00	224,70	443,40
K	0,00	0,00	0,00	75,40
Mn	307,00	412,90	383,00	138,00
Ni	0,00	0,00	24,90	0,00
Ti	0,00	16,40	0,00	0,00
Zn	27,50	102,50	64,10	48,60

Ponto D16	Concentração (mg.kg $^{-1}$)			
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
Elemento	X > 0,088	0,088 >X > 0,053	0,053> X > 0,044	X < 0,044
	(mm)			
Br	51,00	32,30	40,40	0,00
Ca	122100,00	61000,00	95400,00	6700,00
Cu	144,80	97,00	471,00	157,40
Fe	38510,00	24900,00	18670,00	5826,00
K	5910,00	2960,00	0,00	0,00
Mn	4347,00	2018,00	3180,00	238,00
Ni	0,00	0,00	0,00	19,80
Rb	0,00	1,32	0,00	0,00
Sr	414,00	Not det.	356,00	2,07
Ti	2345,00	1551,00	1496,00	221,00
V	0,00	0,00	0,00	99,10
Zn	874,00	447,00	965,00	160,50

Figura 31 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D15 e D16 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 >X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044.



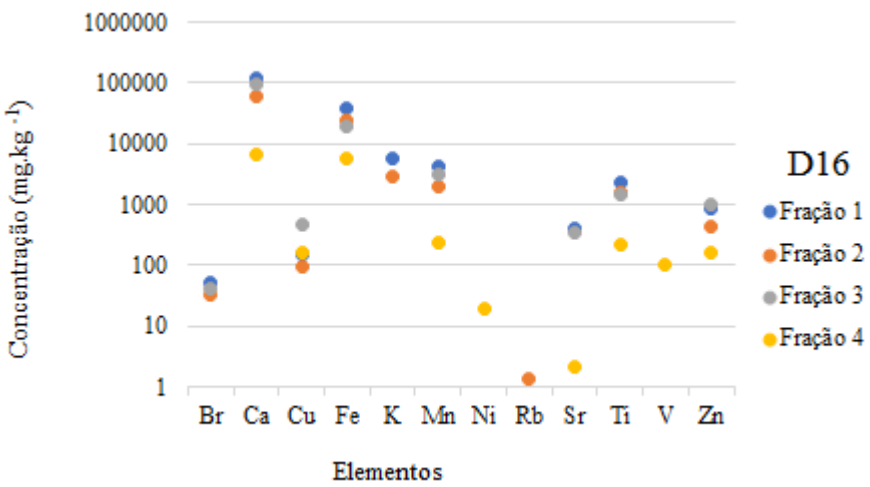
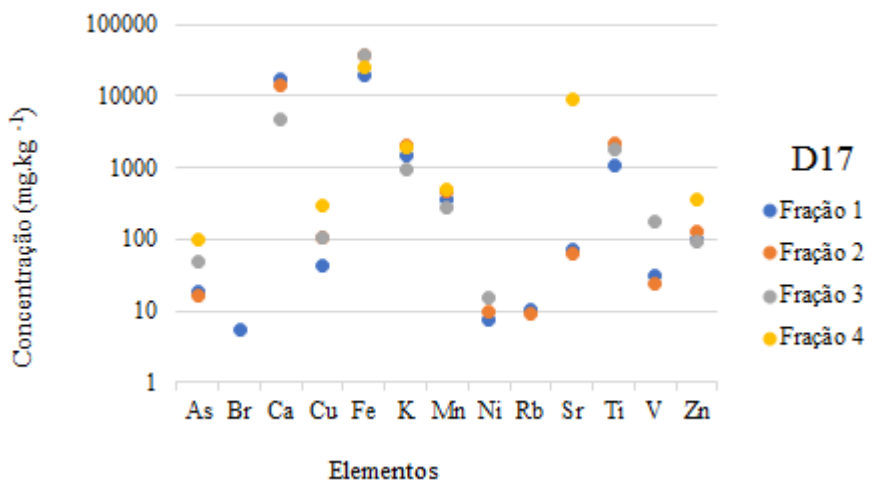


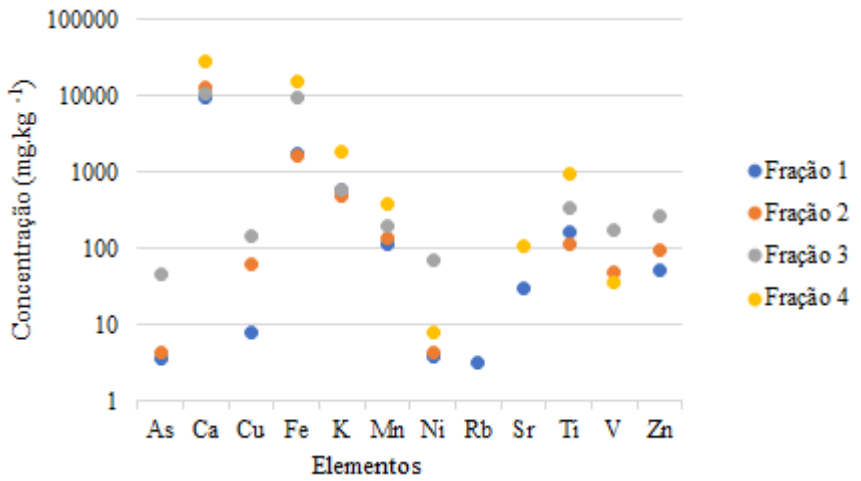
Tabela 19 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D17 e D18.

Ponto D17	Concentração (mg.kg $^{-1}$)			
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
Elemento	X > 0,088	0,088 >X > 0,053	0,053 > X > 0,044	X < 0,044
	(mm)			
As	19,20	16,02	48,60	97,00
Br	5,55	0,00	0,00	0,00
Ca	17510,00	14353,00	4588,00	0,00
Cu	43,80	108,10	105,60	292,00
Fe	19281,00	36677,00	37260,00	24730,00
K	1494,00	2004,00	962,00	1920,00
Mn	368,20	469,00	277,00	492,00
Ni	7,79	10,08	15,70	0,00
Rb	10,57	9,11	0,00	0,00
Sr	71,00	64,70	Not det.	8970,00
Ti	1065,00	2249,00	1756,00	0,00
V	30,40	24,00	175,00	0,00
Zn	101,50	127,70	95,20	372,00

Ponto D18	Concentração (mg.kg $^{-1}$)			
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4
Elemento	X > 0,088	0,088 >X > 0,053	0,053 > X > 0,044	X < 0,044
	(mm)			
As	3,51	4,33	46,00	0,00
Ca	9380,00	12360,00	10650,00	27310,00
Cu	7,78	60,90	146,10	0,00
Fe	1718,00	1632,00	9550,00	15174,00
K	573,00	495,00	569,00	1784,00
Mn	109,90	139,70	193,00	382,60
Ni	3,89	4,29	69,90	8,10
Rb	3,20	0,00	Not det.	0,00
Sr	29,66	Not det.	Not det.	104,70
Ti	162,70	109,80	341,00	944,00
V	Not det.	49,50	171,00	35,90
Zn	52,70	94,60	266,00	0,00

Figura 32 - Concentração dos elementos inorgânicos encontrados no ponto D17 e D18 para diferentes frações granulométricas: Fração1, X > 0,088 mm; Fração 2, 0,088 > X > 0,053 mm; Fração 3, 0,053 > X > 0,044 mm; Fração 4, X < 0,044.





Uma comparação relevante pode ser feita com as concentrações encontradas para os metais nos pontos D1 e D18, uma vez que estes localizam-se em Antônio Pereira e Barra Longa, representando região afetada e não afetada respectivamente. Como já mencionado, toda a bacia avaliada se encontra sobre intensas atividades antropogênicas, principalmente as que estão voltadas para o processo de extração mineral.

Nesse contexto é de se esperar que as partículas que estão presentes no ar contenham concentrações de metais que são recorrentes em regiões que ocorrem atividades ligadas a mineração, especialmente de ferro e ouro, como é o caso deste trabalho. Assim, uma das hipóteses levantadas é a de que os elementos presentes na poeira, consequência da presença da lama em Barra Longa, eram os responsáveis por enfermidades diagnosticadas em cidadões de Barra Longa.

Analisando-se as concentrações encontradas para os elementos pesquisados verificou-se que para as frações 1, 2 e 3, quase todos os metais apresentaram maiores valores para o ponto amostrado em Antônio Pereira, na prática não atingido pelo volume de rejeitos, uma vez que esse local se encontra a montante do complexo minerário de Germano. Para a fração 4, os elementos Ca, Cu, K e Mn do ponto D18 apresentaram concentrações elevadas em comparação a mesma fração do ponto D1.

O rompimento da barragem de Fundão liberou cerca de 43 milhões de m^3 afetando uma extensão de 668 km de corpos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Oceano Atlântico, e consequentemente causou danos ambientais ainda não mensurados. O volume de lama acometeu ecossistemas como a Mata Atlântica, assim como ambientes estuarinos, costeiros e marinhos, além do Quadrilátero Ferrífero, demonstrando assim, a extensão do desastre (CARMO *et al*., 2017).

Segundo Bowker e Chambers, (2015) uma das medidas que devem ser tomadas, quando ocorrem desastres com intenso deslocamento de massa, é a remoção dos rejeitos, sendo essa considerada uma ação emergencial e uma das mais frequentes. O Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA), em um relatório técnico produzido pós desastre, inferiu que a empresa responsável deveria avaliar em cada região afetada a possibilidade de retirada e descarte adequado do rejeito.

Ressalta-se que em Barra Longa a empresa responsável pela barragem de Fundão promoveu a retirada dos rejeitos que se encontravam nas ruas atingidas pela lama e tal processo gerou uma quantidade elevada de poeira na cidade. Além disso, foram estabelecidas sedes administrativas em Barra Longa, para que ações emergenciais fossem desenvolvidas nas localizações a montante, intensificando assim todas as atividades da região, dentre eles o tráfego de transporte, o que contribui de forma relevante para geração de particulado no ar.

Cesar, Nascimento e Carvalho (2013) realizaram um estudo no qual verificaram qual a relação entre a exposição a material particulado e a quantidade de internações de crianças, em uma cidade no interior de São Paulo (SP). Eles avaliaram que materiais particulados com diâmetro inferiores a 10 micrômetros, principalmente as que apresentam fração menores que 2,5, são as mais maléficas ao organismo. E, as principais formas de poluição do ar podem estar relacionadas a intensidade do tráfego e, no caso de SP, queima de combustíveis e biomassa. O estudo conclui que a exposição a MP com tamanho inferior a 2,5 micrômetros estava relacionada a maior intensidade de internações em crianças. Ferreira *et al*., (2013) realizaram um estudo da concentração de metais pesados presentes no ar da cidade de Divinópolis. O município possui atividades antrópicas ligadas a metalurgia e siderurgia, e nos sete pontos monitorados no entorno do perímetro urbano, foram observadas elevadas concentrações de ferro e alumínio, que foram justificadas, em menor grau, pela presença de desses elementos no solo da cidade e, em maior grau, pelas atividades de metalurgia e siderurgia, que tipicamente possuem esses elementos como fontes poluidoras. Olawoyin *et al*., (2018) avaliaram o risco a saúde, causado pela inalação de material particulado contaminado com metais pesados. Foram coletadas amostras em 19 pontos, localizados em uma região com atividades industriais no Canadá; foram determinadas as concentrações dos elementos As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Ni, Zn. Os resultados demonstraram que a concentração de partículas com diâmetros inferiores a 2,5 micrômetros se apresentou quatro vezes maior que o indicado pela Organização Mundial da Saúde, assim como a concentração de Pb, que foi de 3,6 superior ao indicado pelo órgão responsável no país. As formas mais recorrentes de contaminação ocorrem através da inalação e ingestão de alimentos contaminados, sendo as emissões causadas principalmente, por atividades antrópicas, e carreadas pelas correntes de vento. Segundo os autores crianças apresentam maiores probabilidades de

desenvolverem convalescência relacionada a câncer, decorrentes de exposições a matérias particulados contaminados; também destacam que os adultos são expostos aos mesmos riscos em menor grau.

Com relação ao Quadrilátero Ferrífero, Braga *et al*., (2007) em pesquisa desenvolvida no município de Itabira, concluíram que a presença de material particulado no ar, se relaciona positivamente com atendimentos às doenças respiratórias entre crianças e adolescentes e doenças cardiovasculares entre adultos. Itabira é uma cidade marcada pela extração do minério de ferro, formada pelas minas de Conceição, Cauê e o Complexo Dois Córregos, regiões de beneficiamento e de depósito de material estéril. Ressalta-se que essas estruturas se localizam próximas à cidade, intensificando a exposição dos moradores a poluentes gerados a partir do processo de beneficiamento do minério.

Santos *et al*., (2016) em pesquisa realizada pela Fundação COPPETEC inferiu que os valores altos de concentrações de Fe encontrados em sedimentos analisados nas áreas atingidas são totalmente previsíveis, uma vez que a região é marcada pela intensa atividade de extração desse metal, sendo o rejeito formado principalmente de compostos que possuem Fe como constituinte majoritário. Fato esse corroborado pelo estudo de Gomes *et al*., (2011) que realizaram a caracterização dos finos presentes no rejeito do beneficiamento do minério de ferro, encontrando teores de 48,08% de FeO_3.

Em sua pesquisa, Santos *et al*., (2016) ainda afirmam que os valores de As, Mn e Zn estão de acordo com o background da região corroborados por estudos de Costa *et al*., (2003), Rodrigues *et al*., (2015) e CPRM (2015). Sendo assim os valores das concentrações encontrados para as amostras avaliadas podem estar também relacionados aos componentes do solo da região.

Por outro lado, independente da origem dos contaminantes, é importante ressaltar que o material particulado com diâmetro abaixo de 10 μm ao ser inalado pode causar aumento de doenças respiratórias e cardiovasculares (Souza, 2015). Esse fato é intensificado quando no material inalado ocorre a presença de elementos metálicos, uma vez que esses contribuem de forma significativa para a má qualidade do ar; principalmente considerando-se que, inúmeros contaminantes inorgânicos, ainda que em baixas concentrações, são extremamente maléficos a saúde humana.

De acordo com o documento apresentado pela Samarco ao Ministério Público, a empresa havia retirado, um ano após o ocorrido, algo em torno de 0,17 milhão de m^3, na área urbana de Barra Longa, sendo que, em um primeiro momento o rejeito não havia sido descartado de forma correta. Portanto, as ocorrências de doenças respiratórias relatadas na cidade de Barra Longa podem estar associadas a disponibilidade de material particulado no ambiente, devido as inúmeras atividades que estão acontecendo no local.

Não restam dúvidas de que a poeira presente nas regiões afetadas contém partículas advindas da lama e do solo que, devido a ação do vento e às próprias ações de mitigação, acabam sendo transportadas para regiões que não foram diretamente afetadas pelo derramamento da lama. Os elementos presentes na poeira, podem ter sua origem relacionada tanto as substâncias constituintes do rejeito propriamente, quanto aos elementos que estavam presentes nos sedimentos dos rios, que foram revolvidos à superfície, pela intensidade da chegada da lama.

A comparação dos resultados obtidos após análise dos materiais coletados nas regiões afetadas e não afetadas pelo desastre ambiental pode contribuir para uma melhor compreensão de alguns dos distúrbios de saúde registrados no município de Barra Longa. Os problemas de saúde relatados pelas populações podem não estar exatamente vinculados à composição química da poeira dispersa na região mas sim à intensificação da contaminação atmosférica por materiais particulados, independentemente de sua composição química. Tal afirmativa fundamenta-se no fato de que as amostras coletadas em regiões não afetadas pela deposição da lama de rejeitos, apresentam teores de metais mais elevados que as amostras coletadas nas áreas afetadas.

Nesse contexto, verifica-se que a avaliação das quantidades de materiais particulados dispersos no ambiente, bem como das concentrações de metais presentes nestas partículas distribuídas nas regiões afetadas é de extrema relevância e, diante da intensidade deste desastre, todas as ações que tenham como foco gerar informações que auxiliem, de alguma forma, na avaliação dos impactos passados e futuros e bem como na recuperação das áreas afetadas são relevantes.

8 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com esse trabalho poderão auxiliar diversas pesquisas que estão acontecendo no local e que, devido a proporção do desastre, ainda serão desenvolvidas na região por um longo período de tempo.

A pesquisa desenvolvida referente à granulometria na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, a primeira a ser afetada com o volume de lama advindo do colapso da barragem de Fundão, auxiliou no sentido de compreender que diversos compartimentos ambientais foram alterados com o desastre, incluindo-se o compartimento atmosférico.

A partir dos dados obtidos, verificou-se que Ca, Fe, Mn e Zn são os elementos que apresentaram maiores concentrações nas amostras avaliadas. Elementos potencialmente tóxicos como As e Mn foram frequentemente encontrados, geralmente mais concentrados nas frações mais finas do material coletado. Tais substâncias estão associadas ao perfil litológico da bacia e também à sua exploração para atividades de mineração.

Ainda relativo às concentrações dos elementos, observou-se que amostras coletadas no alto rio Gualaxo do Norte apresentaram maiores concentrações de elementos potencialmente tóxicos quando comparadas aos demais pontos analisados.

A determinação granulométrica e de concentrações de metais nos solos de Antônio Pereira e Gesteria foi importante uma vez que o material particulado encontrado no ar, é, em parte, formado pelas partículas advindas no solo. Sendo assim, os resultados no compartimento solo foram de encontro aos encontrados no ar, isto é, os elementos encontrados em concentrações relevantes no material particulado foram, da mesma forma, encontrados nas amostras de solo e rejeito.

As queixas de saúde da população afetada podem estar atreladas não apenas à composição química da poeira mas também à intensificação da presença de materiais particulados, em geral, na atmosfera após o desastre.

É incontestável a contribuição de todos os trabalhos que estão sendo desenvolvidos na região afetada pelo desastre. A compreensão da dinâmica dos contaminantes inorgânicos no ambiente atmosférico, sobretudo, após o rompimento,

tem destaque, uma vez que esse este é um compartimento ambiental de extrema relevância para a saúde. Nesse sentido, a caracterização da poeira representa a possibilidade de melhor compreensão do nível do impacto do evento sobre a atmosfera e a dimensão do desastre sobre a qualidade de vida humana.

.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e Solo. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1995. 18 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - Classificação. 2° ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004. 71 p.

ALAMINO, Renata de Carvalho Jimenez; VERDES, Rodrigo Braga da Rocha Villa; FERNANDES, Francisco Rego Chaves. O Peso da mineração na Região Sudeste. In: FERNANDES, Francisco Rego Chaves; ALAMINO, Renata de Carvalho Jimenez; ARAÚJO, Eliane Rocha (Ed.). **Recursos Minerais e Comunidade:** Impactos humanos, socioambientais e econômicos. Rio de Janeiro: Cetem, 2014. p. 226-233.

ALVES, Wellington; FERREIRA, Paula; ARAÚJO, Madalena. Sustainability Assessment of The Mining Sector In Brazil. **24th World Mining Congress Proceedings: Sustainability in Mining,** Rio de Janeiro, v. 1, n. 24, p.439-451, nov. 2016.

ANDRADE, L. N.; LEITE, M. G. P.; BACELLAR, L. A. P. Composição mineralógica e geoquímica dos solos do parque estadual do Itacolomy – Ouro Preto/MG. **Quaternary and Environmental Geosciences,** vol. 3, p. 1-8, 2012.

ANA - Agência Nacional de Águas (Org.). **Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce:** Rompimento da barragem em Mariana/MG. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2016. 50 p. Disponível em: <http://www.ana.org.br>. Acesso em: 18 set. 2016.

ANEEL (Org.). **Agência Nacional de Energia Elétrica.** Disponível em: <http://www.aneel.org.br>. Acesso em: 22 set. 2016.

ARAÚJO, E. R., OLIVIERI, R. D., FERNANDES, F. R. C. Atividades Mineradoras Geram Riquezas e Impactos Negativos nas Comunidades e no Meio Ambiente. In: FERNANDES, Francisco Rego Chaves; ALAMINO, Renata de Carvalho Jimenez; ARAUJO, Eliane Rocha (Ed.). **Recursos minerais e comunidades:** Impactos humanos, socioambientais e econômicos. Rio de Janeiro: Cetem, 2014. p. 1-12.

ARAÚJO, G. S. *et al.* Geoquímica de Sedimentos e Hidroquímica na Bacia do Rio do Carmo e Sub-bacia do Rio Gualaxo do Norte: Avaliação após um ano do Rompimento de Barragem de Rejeitos de Minério de Ferro, Leste do Quadrilátero Ferrífero, MG. In: 15O SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE – GEOSUDESTE 2017. Diamantina, MG. **Anais Geosudeste 2017.**

AZEVEDO, Úrsula Ruchkys de *et al*. Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG): Proposta. In: SCHOBBENHAUS, Carlos; SILVA, Cassio Roberto da (Org.). **Geoparque no Brasil:** Propostas. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2012. Cap. 7. p. 183-220. Disponível em: <www.cprm.gov.br>. Acesso em: 10 nov. 2016.

AZEVEDO, Úrsula Ruchkys. Geoparques e a Musealização do Território: Um estudo sobre o Quadrilátero Ferrífero. **Instituto de Geociências: USP,** São Paulo, v. 5, p.35-46, nov. 2009. Publicação Especial.

BALTAZAR, O. F; RAPOSO, F. O. (Orgs.). Mariana: folha SF.23-X-B-I: estado de Minas Gerais. Brasília: DNPM; CPRM, 1993. 196 p. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB.

BROWN, David. et al. 501 Desastres mais devastadores de todos os tempos. Trad. Catharina Pinheiro. 1ª edição brasileira. São Paulo: Editora Lafonte, 2012.

BAIRD, C. Química Ambiental. Porto Alegre: **Bookman**. 2002.

BENZECRY, R. N. O aumento dos níveis de metais pesados nos rios e no solo de minas gerais e espírito santo, após o acidente de Mariana: seus efeitos e consequências. **FESPPR Publica**, Curitiba, v. 2, n. 1, 2018.

BRAGA, A.L.F. PEREIRA, L. A. A.; PROCÓPIO, M.; ANDRÉ; PAULO, P. A.; SALDIVA, H. N. Associação entre poluição atmosférica e doenças respiratórias e cardiovasculares na cidade de Itabira, Minas Gerais, Brasil. Cadernos de Saúde Pública, vol.23, n.4, pp. 570-578. 2007. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/ S0102-311X2007001600017

CANATTO, Bruno F.; NALINI, Hermínio A. Jr. Geoquímica dos Sedimentos da Bacia do Rio Gualaxo do Norte, MG. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUIMICA, 16, 2017, Búzios, Rio de Janeiro. **Anais Geoquímica Ambiental.** 2017.

CARMO, F. F. *et al*. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global contexto. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 15, n. 3, Jul–Sep 2017, p. 145-151.

CBH-DOCE - Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (Org.). **A Bacia.** 2016. Disponível em: <http://www.cbhdoce.org.br/>. Acesso em: 12 ago. 2016.

CESAR, A. C. G.; NASCIMENTO, L. F. C.; CARVALHO, J. A.; Associação entre exposição ao material particulado e internações por doenças respiratórias em crianças. **Rev. Saúde Pública**, v. 47, n. 6, p. 1209-1212, 2013.

CHAN, L. *et al*. Spatial variation of mass concentration of roadside suspended particulate matter in metropolitan Hong Kong. **Atmospheric Environment,** 35, p. 3167-3176, 2001.

COPAM - CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL. **DN COPAM N° 62/2002**: Critérios de Classificação de Barragens de Contenção de Rejeitos, de Resíduos e de Reservatório de Água em Empreendimentos Industriais e de Mineração no Estado de Minas Gerais. 62 ed. Minas Gerais: COPAM, 2002. 9 p.

COSTA, A.T. **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. 2001. 146 p. Dissertação (Mestrado) –

Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.

COSTA, A.T. **Registro histórico de contaminação por metais pesados, associados à exploração aurífera no alto e médio curso da bacia do ribeirão do Carmo, QF**: Um estudo de sedimentos de planícies de inundação e terraços aluviais. 2007. 257 p. Tese (Doutorado) - Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

CPRM. **Monitoramento Especial da Bacia do Rio Doce**, Dezembro de 2015, Relatório II, Relatório 02: Geoquímica, Segunda Campanha de Campo, 12 a 23 de novembro de 2015, Belo Horizonte, Dezembro/2015

DATASUS. Sistema de Apoio à Construção **do Relatório de Gestão.** 2016. Disponível em: <http://datasus.saude.gov.br/informacoes-de-saude/sistemas-de-gestao/sargsus>. Acesso em: 10 nov. 2016.

DIAS, Claudia F. Salles. Miners Municipalities and Territorial Development: In which measure major minerals projects changes the dynamics of municipalities and promotes the sustainability. **24th World Mining Congress Proceedings: Sustainability in Mining,** Rio de Janeiro, v. 1, n. 24, p.253-262, out. 2016.

DICIONÁRIO DO AURÉLIO ONLINE. **Dicionário de Português.** 2016. Disponível em: <https://dicionariodoaurelio.com/>. Acesso em: 10 dez. 2016.

DNPM (Org.). **Informe mineral.** Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 2015. 22 p. Disponível em: <http://www.ibram.org.br>. Acesso em: 14 nov. 2016.

DNPM. **Departamento Nacional de Produção Mineral.** Disponível em: <http://www.dnpm.org.br>. Acesso em: 14 nov. 2016.

ENGLERT, Norbert. Fine Particles and Human Health: A review of epidemiological studies. **Toxicology Letters,** Berlin, v. 149, p.235-242, abr. 2004.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **METHOD 1311**: TOXICITY CHARACTERISTIC LEACHING PROCEDURE. USA: EPA, 1992. 35 p. Disponível em: <www.epa.gov>. Acesso em: 24 nov. 2016.

FAGUNDES, Gilmare; ZANELLATO, Maria Aparecida. **Silicose doença pulmonar ocupacional no trabalhador de mineração.** Disponível em: <http://www.saudeetrabalho.com.br/download/silicose-gilmara.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2016.

FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente) (Org.). **Plano de Controle da Poluição por Veículos em Uso em Minas Gerais.** Belo Horizonte: FEAM, 2001.

FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente) (Org.). **Inventário de Barragem do Estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2015. 54 p. Disponível em: <www.feam.br>. Acesso em: 12 ago. 2016.

FERNANDES, G. W.; GOULART, F. F.; RANIERI, B. D.; COELHO, M. S.; BOESCHE, K. D. N.; BUSTAMANTE, M.; CARVALHO, F. A.; CARVALHO, D. C.; DIRZO, R.; FERNANDES, S.; GALETTI JÚNIOR, P. M.; MILLAN, V. E. G.; MIELKE, C.; RAMIREZ, J. L.; NEVES, A.; ROGASS, C.; RIBEIRO, S. P. R.; FILHO, B. S. Deep into the mud: 29 ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. **Natureza e Conservação**, vol. 2, n. 2, p. 35 – 45, 2016.

FERREIRA, B. A.; VILELA, P.; R.; DE OLIVEIRA, R.C.; DA CUNHA, C. H.; NOGUEIRA, S. A.; MELO, A. C. Estudo ecológico da qualidade do ar do município de Divinópolis, Minas Gerias, Brasil. **Biochemistry and Biotechnology Reports.** Edição Especial, vol. 2, n. 2, p. 140-142, jun. 2013.

FINKELSTEIN, M. M. Silica, Silicosis, and Lung Cancer: A risk assessment. **American Journal Of Industrial Medicine**, Toronto, p. 8-18, ago. 2000.

FREITAS, C. M. *et al*. Desastres naturais e saúde: uma análise da situação do Brasil. **Ciênc. Saúde Coletiva.** Rio de Janeiro, vol.19, n.9. p. 3645-3656, set. 2014.

FORMAN, H. J., FINCH, C. E. A critical review of assays for hazardous components of air pollution. **Free Radical Biology and Medicine**, v. 117, p. 202-217, 2018

FRIESE K., MIEHLICH G., WITTER B., BRACK W., BUETTNER O., GRÖNGRÖFT A., KRÜGER F., KUNERT M., RUPP H., SCHWARTZ R., VAN DER VEEN A., ZACHMANN D.W. 2000. Distribution and Fate of Organic and Inorganic Contaminants in a River Floodplain-Results of a Case Study on the river Elbe, Germany. **Remediaton Engineering of Contaminated Soils**. New York-Basel, p. 373-426.

GELENCSÉR, A. *et al*. The red mud accident in Ajka (Hungary): characterization and potential health effects of fugitive dust. **Environ. Sci. Technol,** vol. 45, p. 1608-1615, jan. 2011.

GOLDER ASSOCIATES (Org.). **Rompimento da Barragem de Fundão:** Plano de Recuperação. Mariana: Golder Associates, p. 2016. 412.

GOMES, M. A.; PEREIRA, C. A.; PERES, A. E. C. Caracterização tecnológica de rejeito de minério de ferro. **Re. Esc. Minas,** Ouro Preto, vol. 64, n. 2, p. 233-236, 2011.

GREENPEACE, Instituto Saúde e Sustentabilidade (Org.). **Avaliação dos Riscos em Saúde da População Afetada pelo Desastre de Mariana.** São Paulo: Greenpeace, p. 217. 2017.

IBAMA. **Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta Relativo ao Rompimento da Barragem de Fundão em Mariana/MG:** Componente: Programas socioambientais. Brasília: IBAMA, 2016. 101 p. Nota técnica N° 001/2016 - PRESID/IBAMA.

IBGE (Org.). **Censo Demográficos 2010.** Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 15 nov. 2016.

IBRAM (Org.). **Informações Sobre a Economia Mineral Brasileira 2015.** Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração, 2015. 25 p. Disponível em: <http://www.ibram.org.br>. Acesso em: 14 nov. 2016.

IBRAM (Org.). **Informações sobre a Economia Mineral do Estado de Minas Gerais.** Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração, 2015. 15 p. Disponível em: <http://www.dnpm.org.br>. Acesso em: 14 nov. 2016.

ICMBIO - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (Org.). **Sobrevôo de Monitoramento da Pluma de Rejeitos Provenientes da Barragem de Fundão.** Vitória: ICMBIO, 2016. 20 p. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/>. Acesso em: 5 set. 2016.

IMPERIAL METALS, 2017. **Remediation and Monitoring.** Disponível em: https://www.imperialmetals.com/our-operations/mount-polley-mine/mount-polley-updates. Acesso em: 01 jan. 2018.

JUSTIÇA GLOBAL (Org.). **Vale de Lama:** Relatório de inspeção em Mariana após o rompimento da barragem de rejeitos do Fundão. Rio de Janeiro: Justiça Global, 2016. 44 p. Disponível em: <http://www.global.org.br>. Acesso em: 02 ago. 2016.

LACAZ, F. A. C; PORTO, M. F. S; PINHEIRO, T. M. M. Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/Samarco. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, São Paulo, v.42, e9, p 2017.

LIMA, R. M. F; LUZ, J. A. M. Análise Granulométrica por Técnicas que se baseiam na Sedimentação Gravitacional: Lei de Stokes. **Rem: Revista Escola de Minas,** Ouro Preto, v. 54, n. 2, p.155-159, jun. 2001.

LINDSAY, N. B.; CHAMBERS, D. M. the risk, public liability, & economics of tailings storage facility failures. **Earthwork Act**, 2015. 56 p

LOPES, L. R. **Influência de Fatores Biológicos na Mobilidade de Arsênio Presente em Solos da Cidade de Ouro Preto.** 2014. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

MAE - MUNICIPAL AFFAIRS AND ENVIRONMENT. **Government of Newfoundland and Labrador.** 2017. Disponível em: http://www.mae.gov.nl.ca/waterres/southbrook/gullbridgedam.html. Acesso em: 02 jan. 2018.

MALVERN (Org.). **Malvern Instruments.** 2016. Disponível em: <http://www.malvern.com/en>. Acesso em: 12 nov. 2016.

MALVERN. **Zetasizer Nano Series:** User manual. Malvern: Malvern, 2009. 250 p.

MANAHAN, Stanley E. **Química Ambiental.** 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. p. 912.

MENDONÇA, F. P. C. **Influência da Mineração na Geoquímica das Águas Superficiais e dos Sedimentos no Alto Curso da Bacia do Ribeirão Mata Porcos,**

Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais. 155 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação Crustal e Recursos Naturais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

MEYER, Andreas *et al*. Total Reflection X-Ray Fluorescence Spectrometry as a Tool for The Quantification of Gold and Platinum Metallodrugs: Determination of recovery rates and precision in the ppb concentration range. **Journal of Pharmaceutical And Biomedical Analysis,** New York, v. 70, p.713-717, nov. 2012.

MICROLAB (Org.). **Departamento de Geologia:** Facilidades laboratoriais. Disponível em: <http://www.degeo.ufop.br>. Acesso em: 17 nov. 2016.

MORABET, R. E. Effects of Outdoor Air Pollution on Human Health. **Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences,** v. 1, 2018. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11012-7

MOREIRA, H. F. **O desenvolvimento sustentável no contexto do setor mineral brasileiro.** 2003. 58f. Dissertação (Pós-Gradução em Gestão Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - Escola Politécnica - Instituto Brasil PNUMA - Comitê Brasileiro do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. 2003.

MORI, E.; MORI, C. M. C.; FERNANDES, W. R. Avaliação da Função de Macrófagos Alveolares em Cavalos Clinicamente Sadios. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia,** Belo Horizonte, v. 53, n. 2, p.1-7, abr. 2001.

NAZÁRIO, J. E. C. Mining Contribution for The Municipalities Development. **24th World Mining Congress Proceedings: Sustainability in Mining,** Rio de Janeiro, v. 1, n. 24, p.271-278, nov. 2016.

OBED MOUNTAIN MINE. Disponível em: <https://obed.ca/>. Acesso em: 12 dez. 2016.

OLAWOYIN, R., SCHWEITZER, L., ZHANG, K., OKAREH, O., STALES, K. Index analysis and human health risk model application for evaluating ambient air-heavy metal contamination in Chemical Valley Sarnia. **Ecotoxicology and Environmental Safety,** v. 148, p. 72-81, 2018.

OLIVEIRA, M. *et al*. Características mineralógicas e granulométricas das fontes de poeiras no Polo Cerâmico de Santa Gertrudes - SP. **Cerâmica**, São Paulo, v. 62, n. 362, p. 198-205, jun. 2016.

PATERLINI, W. C. **Fontes e composição das partículas atmosféricas na área urbana e rural da região central do Estado de São Paulo**. 2007. 68 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química. 2007. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/105659>.

PATRA, Aditya Kumar; GAUTAM, Sneha; KUMAR, Prashant. Emissions and Human Health Impact of Particulate Matter from Surface Mining Operation - A review. **Environmental Technology & Innovation,** v. 5, p. 233-249, abr. 2016.

PIRES, J, M, M *et al*. Potencial poluidor de resíduo sólido da Samarco Mineração: Estudo de caso da barragem de Germano. **Revista Árvore,** v. 27, n. 3, p. 393-397, jun. 2003.

POEMAS (Org.). **Antes Fosse Mais Leve a Carga:** Avalição dos aspectos econômicos, políticos dos aspectos econômicos, políticos e sociais do desastre. Juiz de Fora: Mimeo, 2015. p. 103.

RUYTERS, S., *et al*. The Red mud accident in Ajka (Hungary): plant toxicity and trace metal bioavailability in red mud contaminated Soil. **Environ. Sci. Technol**, v. 45, p. 1616 - 1622, 2011.

RIBEIRO, V.Q.F. **Proposta de Metodologia para Avaliação do Efeito de Rupturas de Estruturas de Contenção de Rejeitos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

RHODES, V. P. **Distribuição de mercúrio e arsênio nos sedimentos da área afetada por garimpo de ouro – Rio Gualaxo do Norte, Mariana, MG**. Ouro Preto: DEGEO/EM/UFOP, 2010. 93 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

SAÚDE POPULAR (Org.). **Saúde Popular:** Notícias. 2015. Disponível em: <https://saude-popular.org/>. Acesso em: 20 set. 2016.

SAMARCO (Org.). **Sobre a Samarco.** 2016. Disponível em: <http://www.samarco.com>. Acesso em: 20 ago. 2016.

SANTANA, Paulo Ribeiro de. **Arrecadação da CFEM 2016 (em R$).** Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br>. Acesso em: 15 nov. 2016.

SANTOS, D. A. M; CURI, A; SILVA, J. M. Técnicas para a Disposição de Rejeitos de Minério de Ferro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA A CÉU ABERTO, 6., 2010, Belo Horizonte. **VI Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto.** Belo Horizonte: CBMINA, 2010. v. 1, p. 1 - 9.

SANTOS, G. R. **Técnicas de Reconhecimento de Padrões para a Avaliação de Corpos Hídricos Afetados por Rejeito do Rompimento de Fundão.** 156 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2018.

SANTOS, M. A *et al*. Avaliação da conformidade de amostras de sedimentos na calha dos rios impactados e na foz do rio doce pelo acidente com rompimento da barragem de fundão em Mariana –MG. Fundação Coppetec: **Avaliação dos impactos da ruptura da barragem de rejeitos de fundão em mariana nove meses após o desastre.** COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. cap. 9. 2016.

SERBULA, S.M., MILOSAVLJEVIC, J.S., RADOJEVIC, A.A., KALINOVIC, J.V., & KALINOVIC, T.S. (2017). Extreme Air Pollution with Contaminants Originating from the Mining-Metallurgical Processes. **The Science of the total environment**, v. 586, p.1066-1075. 2017.

SILVA, J. P. L. Impactos ambientais causados por mineração. Revista Espaço da Sophia, n. 8, pp.1-13. Nov. 2007.

SOUZA, P. S. T. **Distribuição dos metais nas poeiras colhidas em Estarreja: estudo da mobilidade e impacto potencial dos metais no ambiente**. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Geociência da Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2015.

USESE, A., CHUKWU, O., L.; RAHMAN, M.; M., NAIDU, R., ISLAM, S., OYEWO, E., O. Concentrations of arsenic in water and fish in a tropical open lagoon, Southwest-Nigeria: Health risk assessment. **Environmental Technology & Innovation**, v. 8, 2017, p. 164-171. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.06.005.

Tailings Mine Info. **Knowlegde - Accidents** Disponível em: <www.tailings.info/knowledge/accidents.htm>. Acessado em: 26 Dez, 2016

TROIANO, G.; MERCURIO, I; MELAI, P.; NICOLA, N.; LANCIA, M.; BACCI, M. Suicide behaviour and arsenic levels in drinking water: a possible association? A Review of the Literature about the Effects of Arsenic Contamination in Drinking Water on Suicides. **Egyptian Journal of Forensic Sciences**, v. 7, n. 2 jul. 2017. http://doi.org/10.1186/s41935-017-0005-y.

WISE URANIUM PROJECT. **Chronology of major tailings dam failures**. Disponível em: <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>. Acessado em: 31 Dez. 2017.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide, Bonn, Germany, 2003. 98p.

ZHENG, N., LIU, J., WANG, Q.; LIANG, Z. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China. **Science of the Total Environment,** v. 408, p. 726-733, 2010.

ANEXO 1

PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO - S2 Picofox TXRF (Bruker)

1. Linhas Gerais de Procedimento

- Limpeza das placas de quartzo (pré-análise)
- Preparo de amostra sólida
- Calibração do equipamento
- Análise das amostras

2. Referências

Manual de operação do equipamento S2 Picofox TXRF (Bruker)

3. Procedimentos Específicos

3.1. Limpeza das placas de quartzo

a. Separar as placas de quartzo de acordo com a marca, são dois conjuntos.
b. Com o auxílio de um algodão, passar acetona P.A. para remover a graxa das placas de quartzo.
c. Montar no suporte todo o conjunto de placas (cuidado para não apertar demasiadamente e quebrar as placas de quartzo).
d. Colocar o suporte dentro de um béquer e cobrir até o nível das placas de quartzo com solução de extran M02 neutro. Aquecer a solução por 10 min. Não deixar ebulir.
e. Retirar o suporte da solução e eliminar o excesso de solução de extran com água ultra-pura.
f. Colocar o suporte dentro de um béquer e cobrir até o nível das placas de quartzo com solução de ácido nítrico a 20% (preparado com água ultra-pura). Aquecer a solução por 2 horas. Não deixar ebulir.
g. Retirar o suporte da solução e eliminar o excesso de solução de ácido nítrico com água ultra-pura.
h. Colocar o suporte dentro de um béquer e cobrir até o nível das placas de quartzo com água ultra-pura. Aquecer a solução por 10 min.
i. Retirar o suporte da solução e passar água ultra-pura.
j. Secar na estufa (pode colocar com o suporte).

3.2.Preparo de amostra sólida

a. Pulverizar a amostra utilizando graal e pistilo previamente limpos.
b. Pesar 0,0500 g da amostra pulverizada.
c. Adicionar a amostra 10 µL de padrão 1000 mg/L (para água, geralmente, Ga e Y).
d. Adicionar 2,5 mL de Triton X-100 1% V.
e. Sonicar por 15 minutos.
f. Aplicar 10 µL da mistura na placa de quartzo, utilizando o guia.
g. Deixar a placa de quartzo secar por completo na capela com o fluxo ligado.
h. Fazer um branco (solução de Triton X-100 1% V adicionar os padrões).

3.2.1. Preparo da solução 1% de Triton X 100

a. Pipetar 100 µL (aspirar o Triton X-100 lentamente para não dar bolha) e transferir para balão de 10 mL.
b. Completar com água ultra pura para volume final de 10 mL.
c. O volume final da solução de Triton X-100 1% V deve ser calculado de acordo com a quantidade de amostras.

3.3. Análise

3.3.1. Ligar o equipamento

a. Virar a chave que fica a frente do equipamento, da posição 0 (desligado) para posição 1 (ligado).
b. Abrir o software S2 Picofox que se encontra na área de trabalho. Selecionar a opção e clicar em “continuar”.
c. Enquanto o símbolo na barra de ferramentas do programa S2 Picofox estiver piscando a voltagem ainda não está estabilizada.

3.3.2. Calibração do equipamento (realizar toda vez que ligar a voltagem)

a. Clicar no botão preto na frente do equipamento, logo abaixo da chave, abrirá o porta placas. Colocar no leitor a placa de arsênio 1000 ng.
b. Clicar na barra de ferramentas do programa: *Device >> Gain correction*.
c. Abrirá a janela. Selecionar as opções: arsênio e *k-alpha*.
d. Clicar em start. O programa realizará automaticamente duas leituras de 60 segundos cada.
e. Quando terminarem as leituras clicar em OK.
f. Clicar na barra de ferramentas do programa: *Device >> Sensitivity*.

g. Abrirá a janela. Selecionar as opções: arsênio e *k-alpha*.
h. Clicar em start.
i. Ao final da leitura aparece mensagem “Standart element not detected”, clicar em OK.
j. Quando terminar a leitura clicar em OK.
k. Trocar a placa de quartzo de arsênio pela de manganês (1000 ng).
l. Na barra de ferramentas mudar o método para *Standard*, clicar em start na barra de ferramentas.
m. Clicar em OK na mensagem de limpeza.
n. Na barra de ferramentas clicar na tabela periódica, em seguida clicar em Mn. No espectro clicar em cima da linha de emissão do Mn (*k-alpha*). Clicar na barra de ferramentas em: *Device >> Calibrate FWHM >> calculate >> OK >> yes*.

3.3.3. Análise das amostras

a. Colocar placa de quartzo com a amostra no leitor.
b. Selecionar na barra de ferramentas o método, normalmente utiliza-se o método *Standard*. Pode-se aumentar ou reduzir o tempo de análise de acordo com o tipo de amostra.
c. Selecionar na barra de ferramentas o PI utilizado e sua concentração final na amostra. Também pode-se alterar o tipo de amostra (sólido, líquido, etc).

OBS: Na amostra adiciona-se mais de um PI, mas utiliza-se apenas um para a quantificação. Caso ocorra algum problema com o primeiro PI selecionado, o software pode fazer uma reanálise do espectro utilizando o outro PI.

d. Clicar em play ►na barra de ferramentas.
e. Para melhorar o formato das bandas clique em: *Spectrum >> Smooth*.
f. Para auto identificação clique na barra de ferramentas na tabela periódica e em seguida *auto indentification*.
g. Para reduzir o background clique na barra de ferramentas em: *Spectrum >> C=A-B.*
h. Após o termino da análise clique em: *File >> Save spectrum as*. Selecione ou crie uma pasta para os dados e nomeie o arquivo.
i. Para gerar o arquivo *PDF* com os resultados clique na aba *Report* logo acima do espectro, em seguida clique no ícone salvar

ANEXO 2

PROCEDIMENTO DE DIGESTÃO EM ÁGUA RÉGIA – PROTOCOLO DE ACORDO COM LOPES (2014) MODIFICADO.

Reagentes:

- Água Mili-Q ou destilada
- Água Clorídrico 12,0 mol.L^{-1} d: 1,19 g.ml^{-1}
- Ácido Nítrico 15,8 mol.L^{-1} d: 1,42 g.mL^{-1}

Procedimento de extração:

1) Colocar 5g de solo seco na estufa a 100°C por 2h.
2) Pesar 1g ± 0,001 do solo seco em um béquer de 100 mL.
3) Adicionar 0,5-1,0 mL de água Mili-Q ou destilada, 7 mL de Ácido Clorídrico e 2,4 mL de Ácido Nítrico.
4) Tampar o béquer com vidro de relógio e deixar em repouso por 16h dentro de uma capela em temperatura ambiente.
5) Ligar uma chapa aquecedora até atingir aproximadamente 100°C, colocar o béquer tampado e deixar por 2h em temperatura constante. Se começar a ferver, deve-se abaixar a temperatura e lavar as paredes do béquer com água Mili-Q ou destilada durante esse processo. Se a amostra secar, deve-se fazer outra.
6) Deixar esfriar lentamente em temperatura ambiente.
7) Separar um balão de 50 mL e pesar um papel filtro quantitativo com poro de 12,5 cµ
8) Molhar a membrana dentro do funil com Mili-Q ou destilada para melhorar a aderência do papel ao funil.
9) Deixar o filtrado passar através do filtro e armazenar no balão.
10) Lavar o béquer e o vidro de relógio com água Mili-Q ou destilada e filtrar o líquido resultante no mesmo papel filtro até completar 50mL do balão.
11) Passar o conteúdo do balão para um frasco com tampa, homogeneizar e guardar até o momento de análise.

ANEXO 3

CONCENTRAÇÃO DOS ELEMENTOS INORGÂNICOS NOS 18 PONTOS

FRAÇÃO 1

Fração 1 (X > 0,088 mm)				Concentração (mg.kg $^{-1}$)					
Elemento	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Ag	16350,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2490,00	0,00
As	11,40	0,00	37500,00	33,80	4,28	2,01	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	896,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Br	57,80	0,00	0,00	0,00	6,21	8,39	8,41	0,00	0,00
Ca	163400,00	2412,00	42200,00	95450,00	4255,00	1552,00	2290,00	5200,00	361,00
Ce	585,00	0,00	0,00	Not det.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr	0,00	19,10	0,00	0,00	0,00	5,39	0,00	50,40	0,00
Cu	51,50	12,06	107,00	120,70	539,40	38,50	472,90	123,70	41,80
Fe	6100,00	776,80	27030,00	13240,00	2934,00	338,10	179,00	14970,00	2574,00
Ge	0,00	3,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
In	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K	0,00	738,00	0,00	31220,00	1184,00	138,10	421,00	0,00	0,00
Mn	3011,00	122,50	2790,00	9860,00	764,40	897,60	644,00	920,00	101,30
Ni	45,60	4,31	72,00	59,30	6,52	5,89	0,00	0,00	0,00
Rb	0,00	0,00	60,70	119,30	Not det.	0,00	0,00	0,00	0,00
Sr	0,00	16,76	Not det.	727,00	Not det.	Not det.	0,00	0,00	0,00
Th	0,00	0,00	0,00	39,30	13,13	0,00	0,00	0,00	0,00
Ti	426,00	66,90	699,00	152,00	72,50	35,30	0,00	1590,00	0,00
Tl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
V	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,70	0,00	0,00	0,00
Zn	635,00	25,80	680,00	943,00	425,20	92,40	236,70	76,40	44,30

Fração 1 (X > 0,088 mm)				Concentração (mg.kg $^{-1}$)					
Elemento	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18
Ag	1355,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
As	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	29,50	0,00	19,20	3,51
Ba	0,00	0,00	429,00	0,00	775,00	550,00	0,00	0,00	0,00
Br	0,71	12,29	0,00	30,10	30,20	55,60	51,00	5,55	0,00
Ca	878,00	7054,00	11060,00	3345,00	3651,00	1079,00	122100,00	17510,00	9380,00
Ce	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr	0,00	0,00	0,00	40,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cu	0,00	13,27	0,00	0,00	121,10	82,90	144,80	43,80	7,78
Fe	437,00	467,50	2164,00	432,00	1260,00	1622,00	38510,00	19281,00	1718,00
Ge	0,00	0,00	0,00	0,00	9,00	17,40	0,00	0,00	2,30
In	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	760,00	0,00	0,00	0,00
K	0,00	204,00	779,00	393,00	1206,00	0,00	5910,00	1494,00	573,00
Mn	126,50	392,60	1780,00	1523,00	688,00	307,00	4347,00	368,20	109,90
Ni	0,00	1,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,79	3,89
Rb	0,00	0,00	29,30	0,00	0,00	0,00	0,00	10,57	3,20
Sr	0,00	Not det.	0,00	Not det.	Not det.	0,00	414,00	71,00	29,66
Th	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,41
Ti	0,00	0,00	0,00	72,50	0,00	0,00	0,00	1065,00	162,70
Tl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,27
V	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30,40	Not det.
Zn	26,70	91,60	259,00	85,60	94,30	0,00	874,00	101,50	52,70

FRAÇÃO 2

Fração 2 (0,088 >X > 0,053)				Concentração (mg.kg $^{-1}$)					
Elemento	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Ag	0,00	0,00	0,00	0,00	4490,00	0,00	0,00	0,00	0,00
As	0,00	0,00	0,00	70,50	0,00	2,96	22,20	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	2350,00	0,00	207,00	0,00	0,00	0,00
Br	174,70	10,67	11,90	166,00	12,16	12,13	0,00	0,00	0,00
Ca	38240,00	5935,00	4415,00	155400,00	4604,00	1845,00	953,00	0,00	794,00
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	24,40	0,00	0,00	0,00	22,70
Cu	296,00	15,90	59,10	561,00	30,10	55,10	107,30	510,00	17,30
Fe	5980,00	4427,00	2076,00	35410,00	2558,00	660,40	229,00	1016,00	1887,00
K	2750,00	1980,00	1129,00	48600,00	0,00	179,00	0,00	744,00	0,00
Mn	694,00	312,40	303,00	15820,00	487,00	652,00	268,00	3065,00	178,60
Ni	124,00	2,70	0,00	35,40	0,00	38,90	80,10	0,00	0,00
Pb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rb	0,00	5,76	0,00	0,00	0,74	0,00	0,00	Not det.	0,00
Se	0,00	0,00	0,00	55,80	0,00	12,29	0,00	0,00	14,00
Sr	Not det.	33,80	Not det.	1136,00	11,39	4,62	0,00	Not det.	0,00
Th	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ti	0,00	152,20	85,60	845,00	100,60	0,00	0,00	0,00	0,00
V	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	95,20
Zn	414,00	61,90	160,10	2346,00	84,50	115,80	65,10	250,00	34,60

Fração 2 (0,088 >X > 0,053)				Concentração (mg.kg $^{-1}$)					
Elemento	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18
Ag	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
As	0,00	6,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,02	4,33
Ba	0,00	500,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Br	8,42	12,26	0,00	0,00	0,00	0,00	32,30	0,00	0,00
Ca	852,00	15530,00	5350,00	4127,00	3015,00	1258,00	61000,00	14353,00	12360,00
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34,80	0,00
Cu	15,50	76,60	132,00	148,60	109,10	94,00	97,00	108,10	60,90
Fe	568,20	1165,00	1571,00	567,00	16050,00	1261,00	24900,00	36677,00	1632,00
K	274,00	751,00	0,00	653,00	1161,00	0,00	2960,00	2004,00	495,00
Mn	93,60	786,00	767,00	2540,00	556,00	412,90	2018,00	469,00	139,70
Ni	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,08	4,29
Pb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,70	0,00
Rb	0,00	0,00	29,40	0,00	0,00	0,00	1,32	9,11	0,00
Se	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sr	1309,70	70,60	0,00	0,00	0,00	0,00	Not det.	64,70	Not det.
Th	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,80	0,00	0,00
Ti	37,30	0,00	0,00	127,00	782,00	16,40	1551,00	2249,00	109,80
V	0,00	0,00	0,00	120,00	25,70	0,00	0,00	24,00	49,50
Zn	16,20	182,90	99,70	162,00	97,80	102,50	447,00	127,70	94,60

FRAÇÃO 3

Fração 3 (0,053 > X > 0,044)				Concentração (mg.kg $^{-1}$)					
Elemento	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Ag	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
As	0,00	0,00	0,00	47,30	7,55	0,00	0,00	6,30	82,80
Ba	1128,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	219,00	0,00
Br	0,00	0,00	0,00	69,10	0,00	50,80	8,41	3,63	0,00
Ca	51700,00	3603,00	30710,00	69760,00	2827,00	3138,00	2290,00	2192,00	0,00
Ce	0,00	80,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	65,00	0,00	0,00	0,00
Cu	329,00	46,20	852,00	876,00	102,70	213,00	472,90	314,20	58,90
Eu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	9940,00	5207,00	8980,00	13660,00	630,30	159,80	179,00	186,10	10080,00
K	2940,00	1065,00	6520,00	16570,00	750,00	532,00	421,00	390,00	392,00
Lu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mn	970,00	214,50	2749,00	7660,00	321,90	1677,00	644,00	1193,00	156,00
Ni	0,00	0,00	0,00	35,40	6,39	26,40	0,00	0,00	0,00
Nb	0,00	0,00	0,00	Not det.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rb	28,40	0,00	Not det.	55,20	2,80	0,00	0,00	0,00	0,00
Ru	0,00	0,00	9800,00	0,00	0,00	7080,00	0,00	0,00	330,00
Sc	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sr	3512,00	21,90	3706,00	550,00	5,71	Not det.	0,00	5,04	0,00
Th	0,00	11775,00	0,00	0,00	3,56	0,00	0,00	0,00	0,00
Ti	0,00	54,80	149,00	636,00	1301,40	118,00	0,00	0,00	163,00
U	0,00	0,00	0,00	75,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
V	33,60	0,00	0,00	0,00	24,50	0,00	0,00	0,00	186,00
Zn	471,00	91,30	892,00	2191,00	105,40	332,00	236,70	243,30	36,60

Fração 3 (0,053 > X > 0,044)				Concentração (mg.kg $^{-1}$)					
Elemento	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18
Ag	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1099,00	14500,00	48,60	0,00
As	0,00	73,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	46,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Br	0,00	136,30	33,90	27,80	11,64	22,20	40,40	0,00	0,00
Ca	1009,00	3420,00	4920,00	4785,00	2975,00	1217,00	95400,00	4588,00	10650,00
Ce	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cu	17,40	0,00	150,60	126,10	139,40	128,10	471,00	105,60	146,10
Eu	0,00	1046,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	1373,00	1421,00	1305,00	378,90	13554,00	224,70	18670,00	37260,00	9550,00
K	567,00	0,00	0,00	0,00	1137,00	0,00	0,00	962,00	569,00
Lu	28,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mn	165,80	0,00	820,00	2317,00	653,00	383,00	3180,00	277,00	193,00
Ni	0,00	0,00	18,80	15,60	0,00	24,90	0,00	15,70	69,90
Nb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18500,00	0,00	0,00
Rb	0,00	0,00	1,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Not det.
Ru	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sc	0,00	219,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sr	1267,00	0,00	Not det.	0,00	576,90	0,00	356,00	Not det.	Not det.
Th	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ti	0,00	0,00	227,00	1301,40	326,00	0,00	1496,00	1756,00	341,00
U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	462400,00
V	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	175,00	171,00
Zn	34,50	98,20	119,10	219,70	159,40	64,10	965,00	95,20	266,00

FRAÇÃO 4

Fração 4 (X < 0,044)	Concentração (mg.kg $^{-1}$)								
Elemento	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Ag	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
As	58,10	54,90	0,00	0,00	42,70	10,66	49,20	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Br	0,00	7,07	0,00	36,30	59,60	15,16	0,00	23,10	18,20
Ca	18450,00	4676,00	51700,00	2196,00	42540,00	2108,00	1172,00	2218,00	781,00
Ce	0,00	104,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr	111,00	35,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	97,80
Cu	696,00	140,40	2785,00	242,00	5393,00	429,20	114,10	264,30	0,00
Fe	8490,00	17000,00	25150,00	9120,00	29350,00	1080,00	185,00	257,00	4814,00
In	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K	627,00	1460,00	12280,00	824,00	11840,00	192,00	0,00	549,00	0,00
Mn	271,00	332,00	5240,00	226,00	7606,00	1115,00	323,00	1045,00	295,00
Ni	0,00	35,60	0,00	20,90	66,90	19,10	0,00	0,00	0,00
Pb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rb	12,90	0,00	23,40	Not det.	Not det.	0,00	0,00	0,00	0,00
Se	0,00	9,80	0,00	53,20	29,60	0,00	0,00	0,00	0,00
Sr	3376,00	Not det.	4980,00	5193,00	Not det.	3,97	0,00	0,00	0,00
Th	0,00	0,00	0,00	0,00	78,40	0,00	0,00	0,00	0,00
Ti	398,00	372,00	0,00	326,00	443,00	50,50	0,00	142,00	0,00
V	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zn	458,00	199,10	2522,00	148,90	4251,00	361,20	0,00	171,70	65,40

Fração 4 (X < 0,044)	Concentração (mg.kg $^{-1}$)								
Elemento	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18
Ag	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	97,00	74,00
As	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	76,00	0,00	0,00	0,00
Br	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,57	0,00	0,00	0,00
Ca	2359,00	4110,00	6480,00	6280,00	2178,00	1001,00	6700,00		27310,00
Ce	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	37,80
Cu	191,20	143,20	423,20	580,00	164,70	66,70	157,40	292,00	0,00
Fe	1175,00	742,00	2520,00	433,00	11090,00	443,40	5826,00	24730,00	15174,00
In	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2240,00	0,00	0,00
K	1583,00	0,00	428,00	1264,00	871,00	75,40	0,00	1920,00	1784,00
Mn	394,00	210,00	1241,00	2373,00	449,00	138,00	238,00	492,00	382,60
Ni	0,00	0,00	13,30	0,00	0,00	0,00	19,80	0,00	8,10
Pb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,10
Rb	10,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Se	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	181,00	0,00
Sr	2619,00	2470,00	1409,00	25,70	479,00	0,00	2,07	8970,00	104,70
Th	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ti	105,80	106,00	410,00	0,00	394,00	0,00	221,00	0,00	944,00
V	0,00	0,00	9,80	0,00	0,00	0,00	99,10	0,00	35,90
Zn	151,10	94,20	251,70	530,00	138,40	48,60	160,50	372,00	0,00

ANEXO 4

Fotos e descrições dos pontos amostrados na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte/MG.

	Ponto: D1 S 20° 16.847'W 43°28.185' Distrito: António Pereira - Ouro Preto Zona: Rural
	Ponto: D2 S 20° 16.257'W 43°17.802' Município: Mariana - Zona: Rural
	Ponto: D3 S 20° 16.191'W 43° 17.850' Município: Mariana - Zona: Rural
	Ponto: D4 S 20° 17.582'W 43°15.132' Município: Mariana - Zona: Rural
	Ponto: D5 S 20° 17.579'W 43°15.137' Município: Mariana - Zona: Rural

	Ponto: D6 S 20° 17.578'W 43°15.160 Município: Mariana - Zona: Rural
	Ponto: D7 S 20° 18.185'W 43° 14. 924' Município: Mariana - Zona: Rural
	Ponto: D8 S 20° 18.179'W 43° 14. 929' Município: Mariana - Zona: Rural
	Ponto: D9 S 20° 18.142'W 43° 14. 987' Distrito: Paracatu de Baixo – Mariana Zona: Rural
	Ponto: D10 S 20° 18.142' W 43° 14. 987' Distrito: Paracatu de Baixo – Mariana Zona: Rural
	Ponto: D11 S 20° 18.327'W 43° 13.815' Distrito: Paracatu de Baixo – Mariana Zona: Rural

	Ponto: D12 S 20° 16. 326'W 43° 11.352' Município: Mariana - Zona: Rural
	Ponto: D13 S 20° 16. 079'W 43° 10. 235' Município: Mariana - Zona: Rural
	Ponto: D14 S 20° 16. 338'W 43° 08. 966' Município: Mariana - Zona: Rural
	Ponto: D15 S 20° 15. 632'W 43° 07. 560' Distrito de Gesteira - Barra Longa Zona: Rural
	Ponto: D16 S 20° 16. 911'W 43° 02. 565' Município: Barra Longa - Zona: Urbana
	Ponto: D17 S 20° 16. 949' W 43° 02. 558' Município: Barra Longa - Zona: Urbana

	Ponto: D18 S 20° 16. 949'W 43° 02. 558' Município: Barra Longa - Zona: Urbana