



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E BIOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**



**AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE METAIS NA ÁGUA DOS RIOS GUALAXO
DO NORTE E CARMO TRÊS ANOS APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DO
FUNDÃO**

SABRINY MELO DE SOUSA

Ouro Preto, MG 2019

**AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE METAIS NA ÁGUA DOS RIOS
GUALAXO DO NORTE E CARMO TRÊS ANOS APÓS O ROMPIMENTO DA
BARRAGEM DO FUNDÃO**

Monografia apresentada à
Universidade Federal de Ouro Preto como
requisito da disciplina Seminários de
Pesquisa e Monografia II (CBI261) para
obtenção do título de Bacharel em
Ciências Biológicas pela Universidade
Federal de Ouro Preto.

Área de Conhecimento: Ciências
Ambientais

Orientadora: Dra. Katiane de Oliveira Pinto
Coelho Nogueira

Co-orientador: Dr. Leonardo Brandão
Nogueira

Ouro Preto, MG 2019

S85a

Sousa, Sabriny Melo.

Avaliação da concentração de metais na água dos rios Gualaxo do Norte e Carmo três anos após o rompimento da Barragem do Fundão [manuscrito] / Sabriny Melo Sousa. - 2019.

38f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Katiane de Oliveira Pinto Coelho Nogueira .

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Biológicas. Departamento de Ciências Biológicas.

1. Metais pesados . 2. Química da água. 3. Fundão, Barragem do (MG). 4. Carmo, Rio do (MG). 5. Gualaxo do Norte, Rio (MG). I. Nogueira , Katiane de Oliveira Pinto Coelho. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 502.51(28)

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br



FOLHA DE APROVAÇÃO

Sabriny Melo de Sousa

Avaliação da concentração de metais na água dos rios Gualaxo do Norte e Carmo três anos após o rompimento da barragem do Fundão

Monografia apresentada ao Curso de Ciências Biológicas (Bacharelado) da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bióloga

Aprovada em 18 de novembro de 2019

Membros da banca

Dra Katiane de Oliveira Pinto Coelho Nogueira - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr Laser Antônio Machado de Oliveira - Universidade Federal de Ouro Preto
MSc Iára Mariana Lélis Ribeiro - - Universidade Federal de Ouro Preto

Katiane de Oliveira Pinto Coelho Nogueira, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/12/2019



Documento assinado eletronicamente por **Katiane de Oliveira Pinto Coelho Nogueira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/10/2021, às 16:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0234478** e o código CRC **EF132F25**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às mentes curiosas, sonhadoras e ávidas por conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e irmão que me proporcionaram vivenciar essa experiência, através do incentivo e todo apoio necessário ao longo dessa trajetória.

Aos membros do Laboratório de Biomateriais e Parasitologia Experimental (LBPE) e também ao Laboratório de Geoquímica (LGqA) pela colaboração e parceria nesse estudo.

À Katiane de Oliveira Pinto Coelho Nogueira pela orientação acadêmica e confiança, além de todo o suporte necessário para a confecção desse trabalho. Ao Leonardo Brandão Nogueira pela coorientação e colaboração.

Ao Gustavo Araújo e ao Pedro Casari, pela disponibilidade e companhia nas saídas de campo, possibilitando a coleta das amostras.

Aos docentes do Departamento de Ciências Biológicas (DECBI) e Departamento de Biodiversidade, Evolução e Meio-Ambiente (DEBIO) da UFOP, por me proporcionarem a base acadêmica necessária para a pesquisa.

Aos encontros que Ouro Preto me proporcionou, para além dos muros da academia.

Aos amigos de longa data, que mesmo de longe se fazem presentes e aos amigos de perto, agradeço por cada partilha.

“ Quantas toneladas exportamos De
ferro?
Quantas lágrimas disfarçamos
Sem berro? ”

- Carlos Drummond de Andrade

RESUMO

Os resíduos provenientes das atividades antrópicas resultantes da mineração são ricos em elementos traço que apresentam alto potencial de toxicidade. Esses elementos, quando entram na dinâmica de um sistema hídrico, podem acarretar em sérios riscos aos ecossistemas aquáticos. O rompimento da barragem do Fundão, ocorrido no dia 5 de novembro de 2015, teve impacto significativo para os ecossistemas aquáticos, impactando um total de 663,2 km de corpos hídricos, dentre eles os rios do Carmo e Gualaxo do Norte, cuja confluência se dá próxima ao município de Barra Longa, no estado de Minas Gerais, destacando a importância da região para estudos posteriores ao rompimento. Desta forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar a influência da onda de rejeitos na qualidade da água dos rios do Carmo e Gualaxo do Norte, após 3 anos do rompimento da barragem do Fundão. Para tanto, foram coletadas amostras de água, durante a estação chuvosa, em 9 pontos amostrais ao longo do município, com o propósito de analisar os parâmetros físicoquímicos e a concentração de elementos maiores, menores e traço. Os resultados foram comparados com estudos anteriores e com os limites de conformidade estabelecidos pela Resolução Conama nº 357/2005. Apenas as concentrações de Fe e Mn apresentaram valores em não conformidade com a resolução CONAMA N°357/2005, o que pode estar relacionado não somente ao rompimento da barragem, mas reforçado pelo período de coleta, correspondente à estação chuvosa. Acredita-se que a diminuição da concentração de elementos maiores, menores e traço ao longo desse período possa estar relacionada a capacidade autodepurativa dos rios, bem como a associação desses elementos ao sedimento.

Palavras chave: Metais pesados; Hidroquímica; Barragem do Fundão; rio do Carmo; rio Gualaxo do Norte

ABSTRACT

Residues from anthropogenic activities resulting from mining are rich in trace elements that have a high potential for toxicity. Such elements, when entering the dynamics of a water system, can pose serious risks to aquatic ecosystems. The Fundão dam rupture, which occurred on November 5, 2015, had a significant impact on aquatic ecosystems, impacting a total of 663.2 km of water bodies, including the Carmo and Gualaxo do Norte rivers, which meet It is close to the city of Barra Longa, in the state of Minas Gerais, highlighting the importance of the region for post-rupture studies. Thus, the present study aims to evaluate the influence of the tailings wave on the water quality of the Carmo and Gualaxo do Norte rivers, after 3 years of the Fundão dam rupture. Therefore, water samples were collected at 9 sampling points throughout the city, during the rainy season, with the purpose of analyzing the physicochemical parameters and the concentration of major elements and trace. The results obtained were compared with previous studies and with the compliance limits established by Conama Resolution No. 357/2005. Only Fe and Mn concentrations were not in accordance with CONAMA Resolution No. 357/2005, which may be related not only to dam disruption, but also to the rainy season and undetectable polluting sources. It is believed that the decrease in the concentration of major elements and trace over this period may be related to the self-purifying capacity of the rivers, as well as the association of these elements with sediment.

Keywords: Heavy metals; Hydrochemistry; Fundão dam; Do Carmo River; Gualaxo do Norte River

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização do Quadrilátero Ferrífero	4
Figura 2: O Caminho da Lama	7
Figura 3: Domínio de Cursos D'água da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (MG) e da Região Hidrográfica do Rio Barra Seca (ES)	8
Figura 4: Mapa mostrando os pontos de amostragem de água nos rios do Carmo e Gualaxo do Norte	14
Figura 5: Valores da temperatura da água medidos in situ, para cada ponto de amostragem, demonstrando sua variação ao longo de um dia durante a estação chuvosa, em 23 de fevereiro de 2018.	18
Figura 6: Valores da condutividade elétrica relacionados aos valores da resistividade, medidos in situ para cada ponto de amostragem durante a estação chuvosa, em 23 de fevereiro de 2018.	19
Figura 7: (A) - Valores da condutividade elétrica medidos in situ para cada ponto de amostragem durante a estação chuvosa, em 23 de fevereiro de 2018; (B) - Valores da condutividade elétrica obtidos no relatório do IGAM, no período de 2015 a 2016.	19
Figura 8: (A) - Valores dos sólidos dissolvidos totais medidos in situ para cada ponto de amostragem durante a estação chuvosa, em 23 de fevereiro de 2018; (B) - Valores dos sólidos dissolvidos totais obtidos no relatório do IGAM, no período de 2015 a 2016.	20
Figura 9: (A) - Valores de pH medidos in situ para cada ponto de amostragem durante a estação chuvosa, em 23 de fevereiro de 2018; (B) - Valores de pH obtidos no relatório do IGAM durante o período de 2015 a 2016.	22
Figura 10: Valores do potencial redox (Eh) medidos in situ para cada ponto de amostragem durante a estação chuvosa, em 23 de fevereiro de 2018.	22
Figura 11: (A) - Concentração de Fe para cada ponto de amostragem durante a estação chuvosa, em 23 de fevereiro de 2018; (B) - Concentração de Fe obtidos no relatório do IGAM durante o período de 2015 a 2016.	24
Figura 12: (A) - Concentração de Mn para cada ponto de amostragem durante a estação chuvosa, em 23 de fevereiro de 2018; (B) - Concentração de Mn obtidos no relatório do IGAM durante o período de 2015 a 2016.	24

Figura 13: Concentração de As para cada ponto de amostragem durante a estação chuvosa, em 23 de fevereiro de 2018. 26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores máximos de referência para parâmetros de qualidade da água para corpos de água doce enquadrados na Classe 2.	10
Tabela 2: Valores máximos de referência para concentrações de elementos químicos estabelecidos para corpos de água doce enquadrados na Classe 2..	11
Tabela 3: Limites de quantificação (LOQ) e comprimentos de onda dos elementos maiores medidos pelo ICP-OES.	16
Tabela 4: Limites de quantificação (LOQ) de elementos menores e traço medidos pelo ICP-MS.....	17

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	4
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3. MATERIAIS E MÉTODOS	13
3.1. COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	13
3.2. PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	15
3.3. ELEMENTOS MAIORES, MENORES E TRAÇO	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
4.1. PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	17
4.1.1. TEMPERATURA.....	17
4.1.2. CONDUTIVIDADE E RESISTIVIDADE	18
4.1.3. SÓLIDOS DISSOLVIDOS TOTAIS	20
4.1.4. POTENCIAL HIDROGENIÔNICO E POTENCIAL REDOX	21
4.2. ELEMENTOS MAIORES, MENORES E TRAÇO	22
4.2.1. FERRO E MANGANÊS.....	23
4.2.2. ALUMÍNIO, ARSÊNIO E ZINCO	25
5. CONCLUSÕES	27
6. REFERÊNCIAS	28

1. INTRODUÇÃO

A história do Brasil, desde meados do século XVII, encontra-se relacionada com a exploração de seus recursos minerais, que sempre forneceram insumos valiosos para o desenvolvimento econômico, influenciando na demarcação territorial e na história nacional (TRINER, 2011; FARIAS & COELHO, 2002). O estado de Minas Gerais, foi marcado historicamente pela exploração aurífera, ressaltando a região de mineração da Vale do Rio Doce e seus núcleos de maior destaque, como Ouro Preto, Mariana e Barra Longa (ARAÚJO, 2017; RHODES, 2010; SEGURA et. al., 2016)

O Quadrilátero Ferrífero (QF), localizado na porção centro-sul de Minas Gerais, conforme demonstra a Figura 1, é uma importante região para a mineração brasileira, possuindo diversas jazidas minerais economicamente viáveis, como ouro, ferro, manganês e alumínio (DORR II, 1957; DORR II, 1969). Desde o final do século XVII, o histórico de mineração faz-se presente nesta área, com a exploração de minerações auríferas (LOBATO et. al., 2001; BIDONE et. al., 2018). Já no século XX, com o aumento da demanda global por minério de ferro, é iniciada uma nova fase minerária no QF (ARAÚJO, 2018).

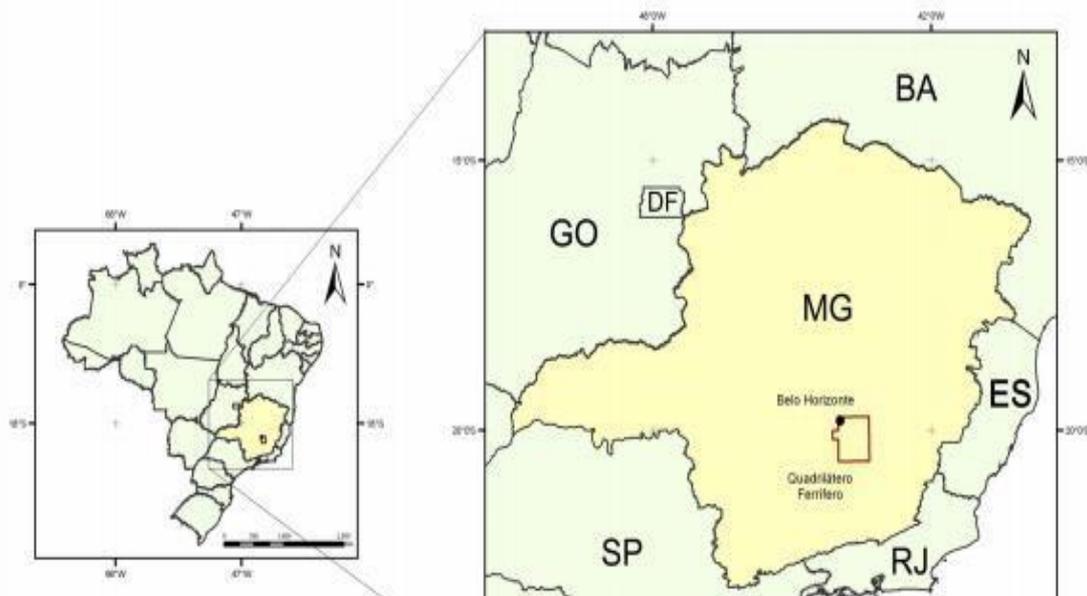


Figura 1: Localização do Quadrilátero Ferrífero (RUCHKYS & MACHADO, 2012).

O aumento da demanda global por minério de ferro, somado a diversidade e abundância de jazidas minerais no QF, fez com que esta região se tornasse de grande importância para a economia brasileira. A inerente relação entre o meio-ambiente e a economia, faz com que a rápida expansão da atividade econômica, dependente do uso excessivo dos recursos naturais, influencie diretamente sobre o meio ambiente. Em função das necessidades de um avanço econômico, há um considerável aumento do crescimento populacional, que desconsidera o planejamento da ocupação territorial, acarretando na degradação ambiental e conseqüentemente na falta de valorização da biodiversidade. O estado de Minas Gerais é marcado por uma ocupação desordenada e despreocupada com a preservação e conservação ambiental, que em conjunto com as atividades antrópicas advindas da mineração, favorecem processos erosivos e a conseqüente degradação ambiental (MARENT, et. al., 2011; DRUMMOND, et. al., 2005; FERNANDES & RIBEIRO, 2017; SALOMONS, 1995).

As atividades antrópicas decorrentes da mineração apresentam elementos traço, cujo alto potencial de toxicidade, pode acarretar em alterações nos parâmetros físico-químicos dos cursos d'água, bem como alterações nas concentrações de metais (ARAÚJO, 2017; RHODES, 2010; BORBA et. al., 2004; RIBEIRO, 1998). O problema ambiental vinculado aos sistemas hídricos superficiais passou a assumir grande influência no que diz respeito à contaminação de rios por mercúrio (Hg), arsênio (As) e antimônio (Sb), quando relacionado a exploração aurífera (RIBEIRO, 1998) e ferro (Fe), manganês (Mn) e alumínio (Al), no caso da exploração de minério de ferro (QUEIROZ, 2018; MATOS, 2017; COSTA, 2001). Embora, de origem geogênica, o aumento da concentração desses elementos pode ser ocasionado por atividades antrópicas de natureza extrativo-mineral (GUILHERME et. al., 2005).

O estudo geoquímico dos sedimentos provenientes exclusivamente de fontes geológicas é fundamental para estimar valores de background, fornecendo uma medida relativa utilizada para a distinção entre a concentração natural do elemento ou composto químico e a concentração oriunda das atividades antropogênicas (MATSCHULLAT, et. al., 2000). Dados de inúmeras pesquisas consideram o QF como um exemplo clássico de contaminação dos recursos hídricos por elementos como arsênio (As), manganês (Mn), bário (Ba), zinco (Zn), cobre (Cu), cádmio (Cd) e chumbo (Pb) de origem antropogênica

(RIBEIRO, 1998; ELEUTÉRIO, 1997; CAVALCANTI, 2003; COSTA, 2007; VICQ, 2015). Diversos autores já realizaram estudos na bacia do rio do Carmo e suas sub-bacias, definindo valores de background geoquímico, auxiliando, portanto, na distinção entre concentração natural e concentração antropogênica para os sedimentos da região. (VICQ, 2015; COSTA et. al., 2006; COSTA et. al., 2010; RODRIGUES, 2012; VAREJÃO et. al., 2009; VAREJÃO et. al., 2011). Os dados obtidos constam que as águas e sedimentos da bacia do rio do Carmo apresentam composições químicas que resultam tanto do intemperismo de suas rochas quanto da contaminação por mineração aurífera antiga e atual (COSTA et. al., 2010).

As associações minerais presentes nos depósitos explorados no QF, principalmente ouro (Au) e ferro (Fe), são ricas em elementos traço com alto poder de dispersão, representando riscos de contaminação para água, sedimentos, biota e conseqüentemente para a população local (COSTA, 2001). Esses elementos não são degradados quando entram na dinâmica de um sistema hídrico, permanecendo solubilizados ou precipitados aos sedimentos de fundo, promovendo alterações nos parâmetros físico-químicos da água e acarretando em riscos de contaminação, mesmo que em baixas concentrações, por toda a cadeia alimentar (COSTA, 2007; IBAMA, 2015; AIRES, 2018; BURRITT, 2018; THORNTON, 1996).

Em decorrência da mineração, os impactos ambientais, oriundos de uma ocupação desordenada e de resíduos industriais, criaram condições favoráveis à formação do processo erosivo, ocasionando no processo de assoreamento dos rios e na contaminação destes por elementos maiores, menores e traço (ARAÚJO, 2017; COUTINHO, 2001; CBH-RIO DOCE, 2018).

A Samarco, fundada em 1977, é uma empresa privada que atua no segmento de mineração, tendo como principal produto o minério de ferro, comercializado para indústrias siderúrgicas de 19 países das Américas, Oriente Médio, Ásia e Europa (SAMARCO, 2018). No dia 05 de Novembro de 2015 ocorreu o rompimento da barragem do Fundão, pertencente ao complexo minerário de Germano, localizado no município de Mariana, estado de Minas Gerais. A barragem continha 50 milhões de m³ de rejeitos ferríferos, que foram lançados na bacia hidrográfica do rio Doce, sendo carregados aos poucos pelos cursos d'água em direção ao Oceano Atlântico, um total de 663,2 km de corpos

hídricos diretamente impactados (IBAMA, 2015; GIAIA, 2018; ICMBIO, 2018; SOS MATA ATLÂNTICA, 2018; SALINAS, 2016; CARMO et. al., 2017). Devido a tamanho impacto, o rompimento da barragem foi considerado o maior acidente ambiental já registrado em território brasileiro, afetando toda a extensão da bacia, atingindo a região costeira do Espírito Santo, impactando, portanto, ecossistemas fluviais, continentais e marinhos, conforme é demonstrado na Figura 2.



Figura 2: O Caminho da Lama (JORNAL UNICAMP, 2018)

Dentre os rios impactados, destacam-se o rio do Carmo, rio Gualaxo do Norte e rio Doce, que compõem a Bacia Hidrográfica do Rio Doce, conforme é demonstrado na Figura 3.

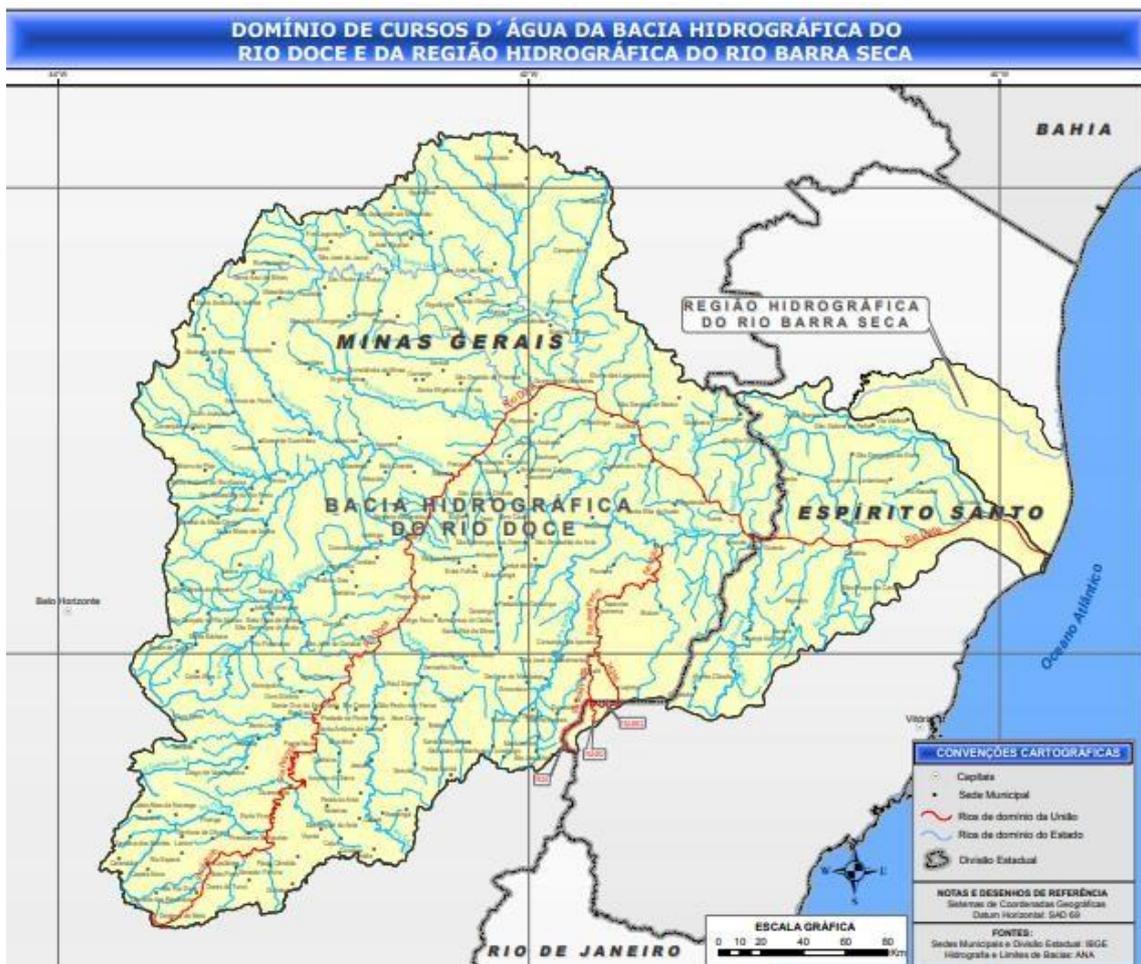


Figura 3: Domínio de Cursos D'água da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (MG) e da Região Hidrográfica do Rio Barra Seca (ES) (ANA, 2018)

A bacia hidrográfica do rio Doce situa-se na Região Hidrográfica do Atlântico Sudeste, no Sudeste do Brasil, correspondendo a uma área de drenagem de 84 km², que abrange os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, compreendendo 225 municípios, sendo 200 mineiros e 25 capixabas. Os recursos hídricos da bacia exercem papel indispensável para a economia de ambos os estados, uma vez que proporciona a água necessária aos usos doméstico, agropecuário, industrial e geração de energia elétrica. Devido a inserção da bacia pertencente à porção do território brasileiro caracterizada por um relevo bastante acidentado, a existência de declives acentuados delimita as atividades econômicas e a ocupação urbana do solo. O relevo restringiu a demarcação do espaço urbano na bacia, que se concentrou junto ao talvegue dos rios em áreas passíveis de inundações (ANA, 2016).

O crescimento econômico voltado para a exploração de matérias-primas consome recursos naturais da bacia do rio Doce, onde estão localizadas reservas minerais importantes. As principais atividades de exploração mineral estão relacionadas à extração de minério de ferro, concentrados nas cabeceiras do rio Piracicaba, um dos principais afluentes do rio Doce, e nas cabeceiras do rio do Carmo. Os cursos d'água da bacia do rio Doce atuam como canais coletores, carreadores e autodepuradores dos rejeitos produzidos pelas atividades industriais e dos esgotos domésticos dos municípios ao entorno, comprometendo a qualidade da água (ANA, 2016).

Devido a desestruturação da cadeia trófica, ocasionada pelo rompimento da barragem, a bacia hidrográfica do rio Doce foi diretamente afetada, promovendo alterações drásticas em toda a biota local, impactando toda a sua ictiofauna, podendo acarretar no aumento do grau de ameaça de extinção de diversas espécies (IBAMA, 2015; ALMEIDA et. al., 2016; GOMES et. al., 2017).

Os limites para os parâmetros físicos, químicos e biológicos da água são definidos de acordo com a classificação dos rios, regulamentados pela Resolução CONAMA n° 357/2005, que determina a qualidade requerida para o uso prioritário dos recursos hídricos (CONAMA, 2005).

As águas da bacia do rio Doce não possuem proposta de enquadramento aprovada. Sendo assim, conforme o artigo 42 da Resolução CONAMA n° 357/2005 e o artigo 37 da Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH-MG n° - 01/2008, as águas do rio Doce e seus afluentes são consideradas de Classe 2, podendo ser destinadas: (1) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; (2) recreação de contato primário; (3) irrigação de hortaliças, frutíferas e de parques, jardins e campos de esporte e lazer; (4) agricultura, aquicultura e pesca (CONAMA, 2005; COPAM, 2008).

Alguns destes parâmetros relacionados a rios de água doce enquadrados na Classe 2 são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Valores máximos de referência para parâmetros de qualidade da água para corpos de água doce enquadrados na Classe 2 (CONAMA, 2005).

PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR MÁXIMO
Ph	-	6,0 – 9,0 ⁽¹⁾
<i>E. coli</i>	NMP ⁽²⁾ / 100MI	1.000
Turbidez	NTU ⁽³⁾	100
Clorofila a	µg.L ⁻¹	30
Cor verdadeira	MgPt ⁽⁴⁾ . L ⁻¹	75
Sólidos Totais (TDS)	mg.L ⁻¹	500
Oxigênio Dissolvido (OD)	mg.L ⁻¹	5 ⁽¹⁾
DBO – 5 dias a 20°C	mg.L ⁻¹	5

⁽¹⁾ Para pH os valores apresentados correspondem aos limites inferior e superior da faixa de referência. Para oxigênio dissolvido (OD), o valor apresentado corresponde ao valor mínimo de referência; ⁽²⁾ Número mais provável; ⁽³⁾ Unidade nefelométrica de turbidez; ⁽⁴⁾ Miligrama de platina.

A legislação não determina limites para valores de temperatura para corpos d'água, uma vez que, este parâmetro apresenta alta oscilação anual e diária no ambiente natural (MAIA, 2017).

Os limites máximos para teores dos elementos alumínio (Al), arsênio (As), cádmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), mercúrio (Hg), manganês (Mn), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco (Zn) dissolvidos em água também são regulamentados pela Resolução CONAMA 357/2005, conforme consta na Tabela 2.

Tabela 2: Valores máximos de referência para concentrações de elementos químicos estabelecidos para corpos de água doce enquadrados na Classe 2 (CONAMA, 2005).

ELEMENTO QUÍMICO	VALOR MÁXIMO (µg.L⁻¹)	ELEMENTO QUÍMICO	VALOR MÁXIMO (µg.L⁻¹)
Alumínio (Al)	100	Ferro (Fe)	300
Arsênio (As)	0,14 ⁽¹⁾	Mercúrio (Hg)	0,2
	10 ⁽²⁾	Manganês (Mn)	100
Cádmio (Cd)	1	Níquel (Ni)	25
Cobalto (Co)	50	Chumbo (Pb)	10
Cromo (Cr)	50	Vanádio (V)	100
Cobre (Cu)	9	Zinco (Zn)	180

⁽¹⁾ Valor máximo de referência para As aplicado a corpos d'água onde haja pesca ou atividade de aquicultura; ⁽²⁾ Valor máximo de referência para As aplicado a corpos d'água onde não haja pesca ou atividade de aquicultura.

O município de Barra Longa está localizado na região sudeste do estado de Minas Gerais, na mesorregião denominada Zona da Mata mineira, a uma distância de aproximadamente 60 km do município de Mariana, onde ocorreu o rompimento da barragem do Fundão. Os fatores determinantes para fixação dos primeiros habitantes e para o desenvolvimento do povoado, foram a fertilidade das terras, próprias para a agricultura e a exploração do ouro, abundante nos rios do Carmo e Gualaxo do Norte. Atualmente, o município apresenta uma população de 6.143 pessoas, segundo o último censo (2010) (IBGE, 2018).

Barra Longa encontra-se situada próxima à confluência entre o rio Gualaxo do Norte e o rio do Carmo, sendo o segundo município afetado pela enxurrada de rejeitos em grande magnitude (IBGE, 2018; ALMEIDA et. al., 2018). Sua população representa uma das maiores exposições ao rejeito, levando em consideração a dose e o tempo de exposição. O município possui a agropecuária como atividade econômica principal, através da criação de gado bovino leiteiro e agricultura de subsistência, fazendo com que parte dos seus moradores esteja em contato constante com o ambiente degradado. Dentre os principais produtos agrícolas cultivados na região destacam-se, a cana de açúcar, milho, café, arroz,

feijão e fumo. Desse modo, observa-se que grande parte da população teve contato direto com o rejeito e a água contaminada (GREENPEACE, 2018).

Nesse contexto, estudos relacionados à concentração de elementos maiores, menores e traço, bem como à qualidade da água destes rios, servem de monitoramento para a saúde da bacia hidrográfica e também como indicador de monitoramento da saúde das populações locais que utilizam da água, seja para consumo próprio ou para atividades relacionadas a agropecuária (MAIA, 2017; MECHE et. al., 2010; BOTTINO, 2017; FERNANDES, 2016). Somente um monitoramento contínuo das condições físico-químicas de águas dos rios afetados permitirá estimar a magnitude dos impactos, para que assim possam ser estimados o tempo e as metodologias necessárias que permitam o reestabelecimento dos ecossistemas aquáticos e ribeirinhos, a fim de que ocorra a recuperação parcial ou até mesmo total, de todo um sistema fluvial afetado. Desse modo, após o acidente, a bacia hidrográfica do rio Doce, passou a ser uma importante área de estudo dos impactos ambientais vinculados às atividades de exploração de minério de ferro (ARAÚJO, 2018).

Os rios Gualaxo do Norte e rio do Carmo, pertencentes a Bacia do rio Doce, já foram alvos de diversos estudos geoquímicos a fim de se compreender as influências geogênicas e antropogênicas em suas águas e sedimentos (COSTA, 2001; COSTA, 2007; RODRIGUES, 2012). No entanto, o rompimento da Barragem do Fundão, ocorrido em novembro de 2015, afetou drasticamente as condições geoquímicas destes cursos d'água, caracterizando-se como o maior acidente ambiental da história do Brasil, sem precedentes históricos, atingindo toda a Bacia do rio Doce, e parte da região costeira do Estado do Espírito Santo.

Anos após o acidente, o local ainda serve de uma importante área de estudo, a fim de avaliar os impactos ambientais vinculados às atividades de exploração do minério de ferro. Assim, o presente estudo visa estudar as alterações nos parâmetros físico-químicos bem como a distribuição dos elementos maiores, menores e traço na água, três anos após o rompimento da Barragem do Fundão, buscando verificar se tais alterações extrapolam os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O estudo pretende avaliar as concentrações de elementos maiores, menores e traço na água, bem como as mudanças nos parâmetros físico-químicos, a fim de verificar a influência do rejeito na concentração desses elementos e na consequente contaminação dos rios estudados.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

□ Avaliar a abundância e a distribuição de elementos químicos na água correlacionando com o pós rompimento da barragem do Fundão. □ Realizar um estudo comparativo, tendo como base estudos anteriores, das concentrações de elementos maiores, menores e traço, bem como dos parâmetros físico-químicos nos rios estudados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Amostras de água foram coletadas em 9 pontos amostrais das bacias estudadas, ao longo do município mineiro de Barra Longa, durante a estação chuvosa, correspondente ao dia 23 de fevereiro de 2018. Os pontos de coleta foram escolhidos de acordo com a morfologia e o acesso facilitado aos rios, a fim de que se obtenham amostras representativas dos cursos d'água de interesse, sem que haja interferência antrópica direta, como fontes de esgoto ou saída de tributários.

Em cada ponto de amostragem foram coletadas amostras de água

superficial, sendo três pontos localizados ao longo do rio do Carmo, três pontos localizados ao longo do rio Gualaxo do Norte e três pontos localizados após a confluência desses dois rios, conforme demonstra a Figura 4.

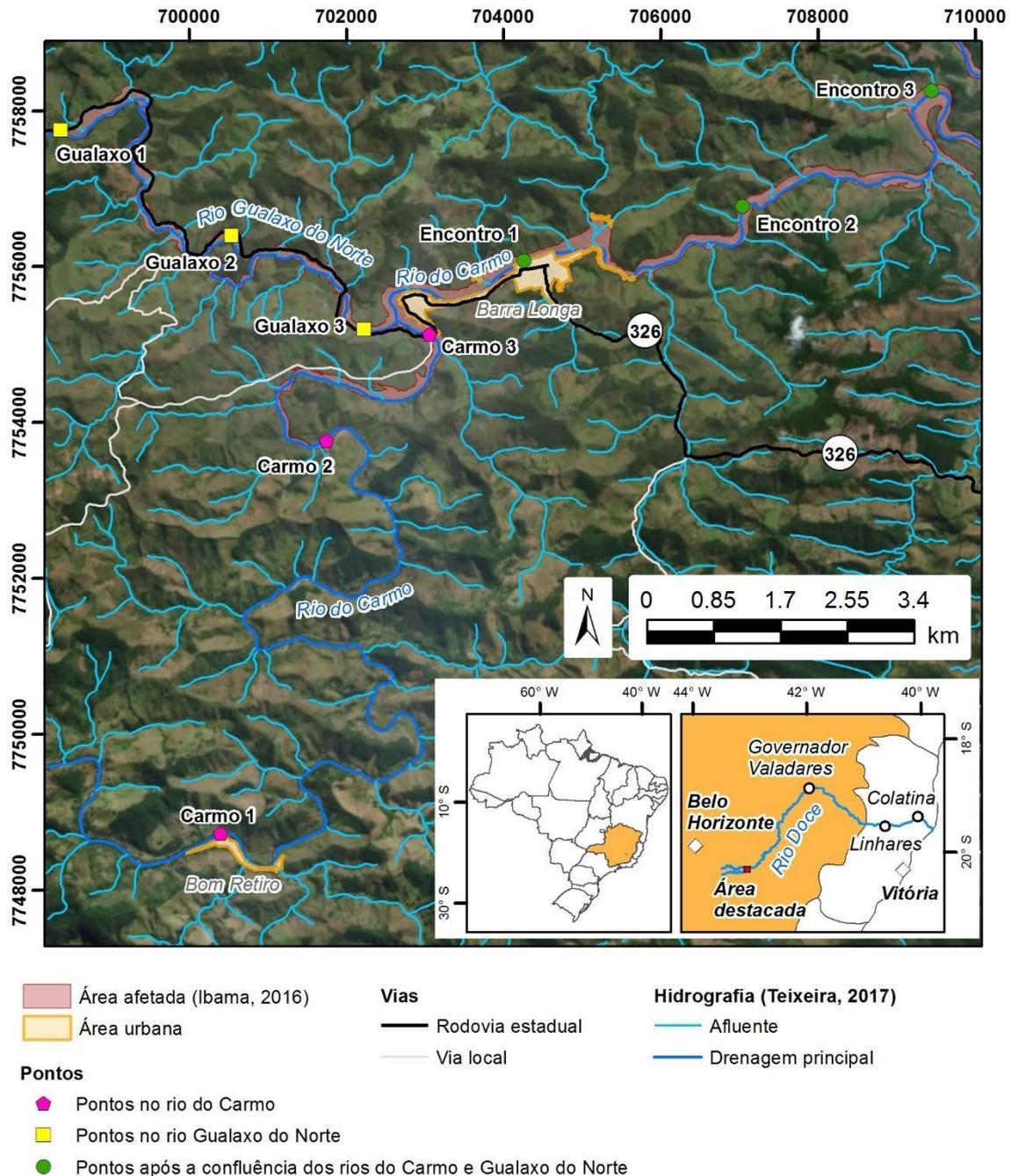


Figura 4: Mapa mostrando os pontos de amostragem de água nos rios do Carmo e Gualaxo do Norte

As amostras foram coletadas com auxílio de um béquer de 1 L, lavado com a água dos locais de amostragem três vezes antes de cada coleta.

Posteriormente, 200 mL de água superficial foram utilizados para caracterizar as propriedades físico-químicas de cada amostra, medidas in situ, ou seja, no local. Para análise laboratorial, 60 mL de água superficial foram coletadas com auxílio de uma seringa de 20 mL e filtro de membrana de 0,45 µm e transferidas para um frasco de polietileno de alta densidade (HDPE) para análise laboratorial. Em seguida, as amostras foram acidificadas com três gotas de ácido nítrico ultrapuro (HNO₃) a fim de que se mantivesse os metais em solução. Por fim, as amostras foram refrigeradas e mantidas na ausência de luz até o momento da análise laboratorial. É importante ressaltar que os frascos também foram lavados três vezes antes de cada coleta.

As amostras foram preparadas, solubilizadas e analisadas em colaboração com o Laboratório de Geoquímica (LGqA) do Departamento de Geologia e o Laboratório de Biomateriais e Patologia Experimental (LBPE) do Departamento de Ciências Biológicas, ambos da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

3.2 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

A análise dos parâmetros físico-químicos foi realizada utilizando o Multiparâmetro Ultrameter II 6 Psi, número de série 6201163 para leituras in situ da condutividade elétrica (µS), resistividade (kΩ), potencial redox (mV), sólidos dissolvidos totais (mg.L⁻¹), pH e temperatura (°C), realizadas em cada ponto de amostragem.

3.3 ELEMENTOS MAIORES, MENORES E TRAÇO

Os elementos maiores foram analisados usando o Espectrômetro de Emissão Ótica de Plasma Acoplado Indutivamente Agilent 725 (ICP-OES) e os elementos menores e traço usando o Espectrômetro de Massa de Plasma Indutivamente Acoplado Agilent 770 (ICP-MS). As análises foram realizadas no Laboratório de Geoquímica da Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil.

O limite de quantificação (LOQ) foi calculado usando a seguinte equação: $LOQ = X + 10s$, sendo determinado pela menor concentração do elemento que possibilita a leitura no equipamento.

As concentrações dos elementos maiores - Al, Ba, Ca, K, Mg, Mn e P - foram determinadas através de leituras realizadas por meio do ICP-OES. No entanto, as concentrações dos elementos menores e traço – As, Cr, Cu, Co, Ni, Pb, Sc, Sr, V e Zn – foram determinadas utilizando o ICP-MS, sendo que este apresenta maior sensibilidade para quantificar os elementos em baixas concentrações.

As tabelas 3 e 4 mostram os limites de quantificação (LOQ) e os comprimentos de onda utilizados para a quantificação dos elementos analisados.

Tabela 3: Limites de quantificação (LOQ) e comprimentos de onda dos elementos maiores medidos pelo ICP-OES.

Elemento	LOQ	Comprimento de onda (nm)
Al	8.82 $\mu\text{g.L}^{-1}$	396.15
Ba	0.48 $\mu\text{g.L}^{-1}$	455.40
Ca	0.02 mg.L^{-1}	422.67
Fe	7.04 $\mu\text{g.L}^{-1}$	259.94
K	0.02 mg.L^{-1}	766.49
Mg	0.02 mg.L^{-1}	279.55
Mn	2.28 $\mu\text{g.L}^{-1}$	257.61
P	0.06 mg.L^{-1}	213.62

Tabela 4: Limites de quantificação (LOQ) de elementos menores e traço medidos pelo ICP-MS.

Elemento	LOQ	Massa
As	0.015 $\mu\text{g.L}^{-1}$	75
Cr	0.014 $\mu\text{g.L}^{-1}$	52
Cu	0.021 $\mu\text{g.L}^{-1}$	63
Co	0.004 $\mu\text{g.L}^{-1}$	59
Ni	0.021 $\mu\text{g.L}^{-1}$	60
Pb	0.032 $\mu\text{g.L}^{-1}$	208
Sc	0.010 $\mu\text{g.L}^{-1}$	45
Sr	0.010 $\mu\text{g.L}^{-1}$	88
V	0.010 $\mu\text{g.L}^{-1}$	51
Zn	0.257 $\mu\text{g.L}^{-1}$	66

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

4.1.1. TEMPERATURA

De acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005 (CONAMA, 2005), não são determinados limites para valores de temperatura, uma vez que, este parâmetro apresenta alta oscilação anual e diária no ambiente natural (MAIA, 2017).

Os valores da temperatura da água medidos in situ para cada ponto amostral variaram entre 24 e 28 °C, demonstrando estar adequada ao período da coleta e suas variações ao longo do dia, conforme é demonstrado na Figura 5.

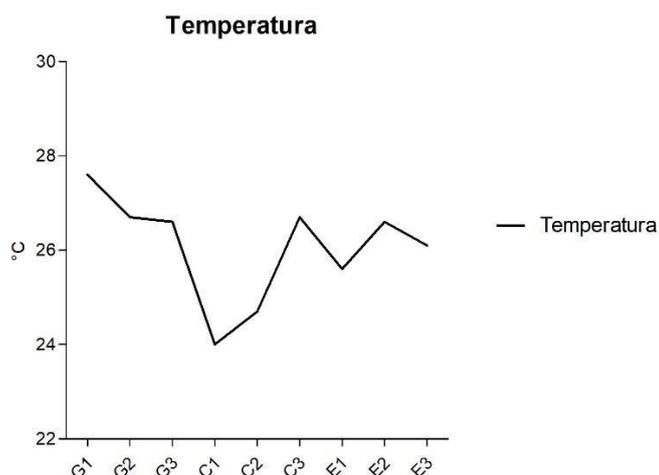


Figura 5: Valores da temperatura da água medidos in situ, para cada ponto de amostragem, demonstrando sua variação ao longo de um dia durante a estação chuvosa, em 23 de fevereiro de 2018.

4.1.2. CONDUTIVIDADE E RESISTIVIDADE

As resoluções COPAM (COPAM, 2008) e CONAMA n° 357/2005 (CONAMA, 2005) não estabelecem limites para a condutividade elétrica. No entanto, valores acima de 100 μS podem indicar ambientes impactados (VON SPERLING, 2007).

O parâmetro resistividade também não apresenta limites estabelecidos. No entanto, é notório que esse parâmetro se encontra inversamente correlacionado com os valores de condutividade, uma vez que apresenta a capacidade de resistência elétrica do elemento, enquanto que o parâmetro condutividade está relacionado com a capacidade do elemento de conduzir uma corrente elétrica.

A figura 6 demonstra os valores de condutividade elétrica e resistividade medidos in situ para cada ponto de amostragem. A figura 7, por sua vez, relaciona os valores de condutividade medidos in situ com os valores obtidos de um relatório do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM, 2016), buscando traçar uma análise comparativa para este parâmetro.

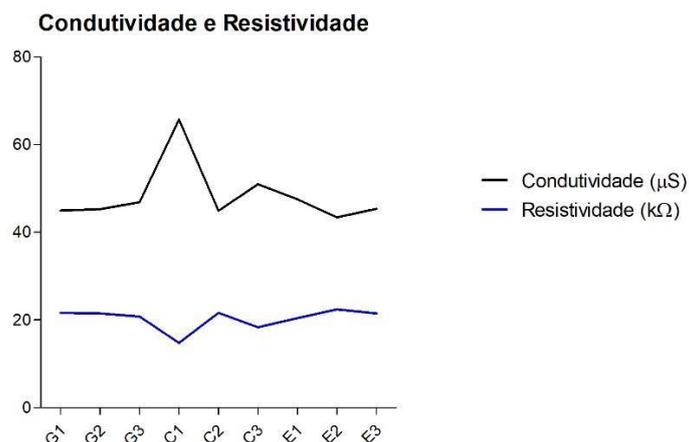


Figura 6: Valores da condutividade elétrica relacionados aos valores da resistividade, medidos in situ para cada ponto de amostragem durante a estação chuvosa, em 23 de fevereiro de 2018.

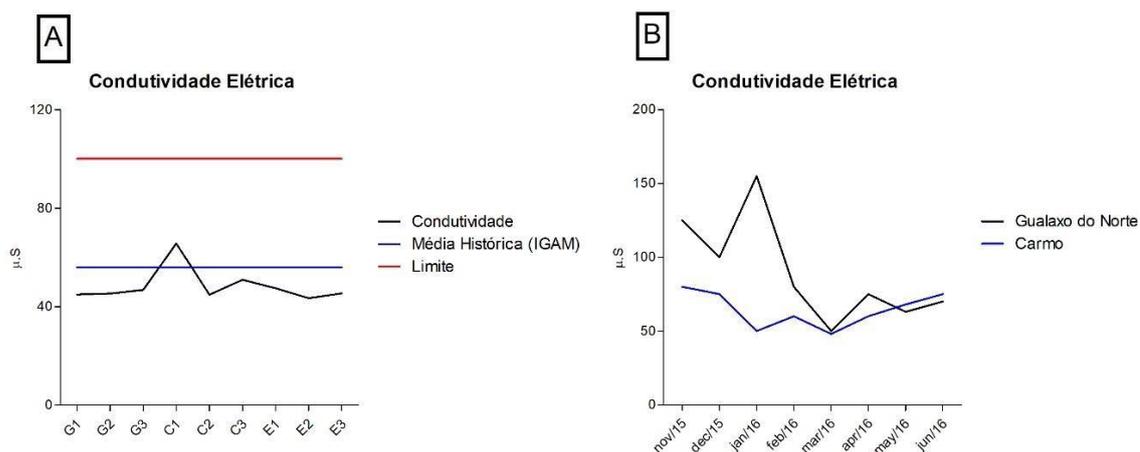


Figura 7: (A) - Valores da condutividade elétrica medidos in situ para cada ponto de amostragem durante a estação chuvosa, em 23 de fevereiro de 2018; (B) - Valores da condutividade elétrica obtidos no relatório do IGAM, no período de 2015 a 2016.

Os valores de condutividade e resistividade encontrados não indicam um ambiente impactado. Ademais, nota-se que os valores de condutividade diminuiram nos últimos três anos, após o rompimento da barragem do Fundão, principalmente no rio Gualaxo do Norte que chegou a ultrapassar o limite indicativo para ambientes impactados. No entanto, para o rio do Carmo, é

possível observar um pico de condutividade, observado no ponto C1, ultrapassando a média histórica evidenciada pelo IGAM (IGAM 2016).

A condutividade pode sofrer influência da temperatura, diminuindo com o aumento da mesma devido à agitação térmica das moléculas, dificultando a passagem da corrente elétrica (MANDAL, 2014). Desse modo, é possível que o pico de condutividade, demonstrado no ponto C1 (Figura 7A), esteja relacionado à baixa temperatura (Figura 5).

4.1.3. SÓLIDOS DISSOLVIDOS TOTAIS

De acordo com a Resolução CONAMA n° 357/2005 (CONAMA, 2005), o valor máximo estabelecido para os sólidos dissolvidos totais (TDS) é de 500 mg.L⁻¹. A figura 8 traz uma análise comparativa entre os resultados obtidos no presente estudo com estudos anteriores, obtidos em relatório do IGAM (IGAM, 2016).

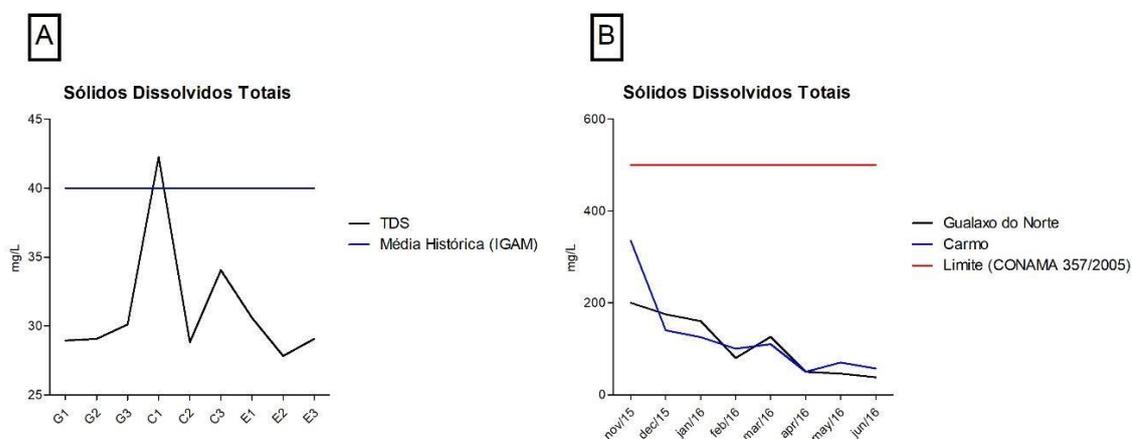


Figura 8: (A) - Valores dos sólidos dissolvidos totais medidos in situ para cada ponto de amostragem durante a estação chuvosa, em 23 de fevereiro de 2018; (B) - Valores dos sólidos dissolvidos totais obtidos no relatório do IGAM, no período de 2015 a 2016.

A análise comparativa da Figura 8 (A) e (B) demonstra que os valores obtidos no presente estudo encontram-se em conformidade com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 357/2005 (CONAMA, 2005) e que

houve significativa diminuição desses valores ao longo do tempo, desde o rompimento da barragem, demonstrando uma redução no número de sólidos dissolvidos na água. Nota-se que um ano após o rompimento da barragem, esses valores já se encontravam abaixo do limite.

No ponto C1, conforme é demonstrado na Figura 8(A), houve uma elevada carga de sólidos dissolvidos na água, ultrapassando a média histórica da estação chuvosa. O aumento observado pode ser devido à contribuição dos tributários próximos ao ponto de amostragem, ou a fontes poluidoras não detectáveis no momento da coleta.

4.1.4. POTENCIAL HIDROGENIÔNICO E POTENCIAL REDOX

A Resolução CONAMA n° 357/2005 (CONAMA, 2005) estabelece limites mínimo e máximo para o potencial hidrogeniônico (pH), variando de 6 a 9. No entanto, não são estabelecidos limites para o potencial redox (Eh).

O parâmetro pH é definido pela capacidade de um ambiente em fornecer prótons (H^+) para uma base ou tomar prótons de um ácido, enquanto que o parâmetro Eh quantifica a capacidade do ambiente em fornecer elétrons para um agente oxidante ou tomar elétrons de um agente redutor.

A figura 9, correlaciona os valores obtidos neste estudo com os valores adquiridos em relatório realizado pelo IGAM (IGAM, 2016), para o parâmetro pH. Enquanto que a figura 10, demonstra os valores obtidos no presente estudo para o parâmetro Eh.

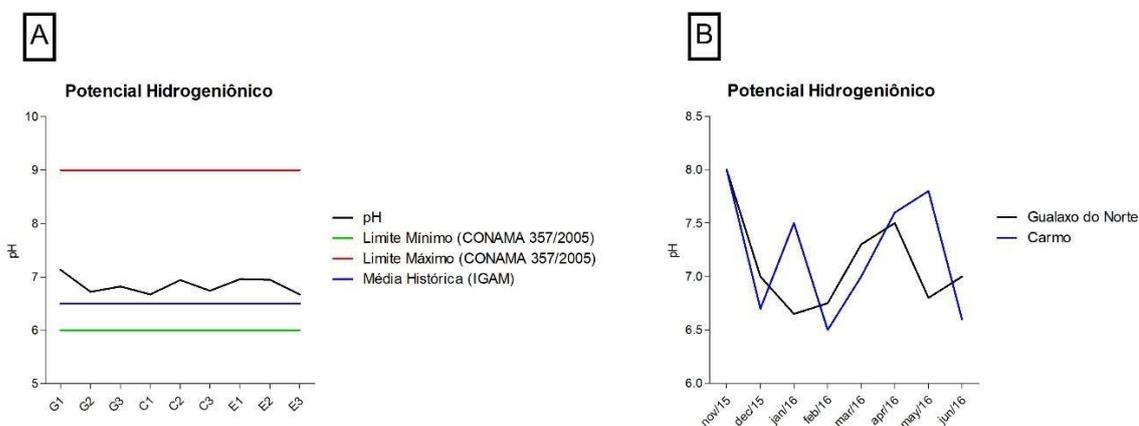


Figura 9: (A) - Valores de pH medidos in situ para cada ponto de amostragem durante a estação chuvosa, em 23 de fevereiro de 2018; (B) - Valores de pH obtidos no relatório do IGAM durante o período de 2015 a 2016.

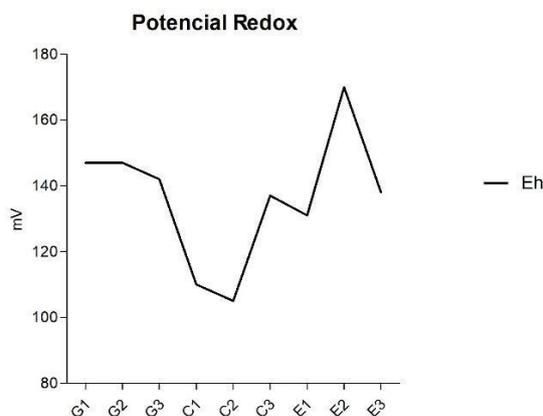


Figura 10: Valores do potencial redox (Eh) medidos in situ para cada ponto de amostragem durante a estação chuvosa, em 23 de fevereiro de 2018.

Os valores de pH variam ligeiramente entre ácido e básico (6,5 a 7,1), estando em conformidade com a Resolução CONAMA n° 357/2005 (CONAMA, 2005), apresentando uma faixa de pH ideal para a manutenção da vida aquática, ainda que acima da média histórica. Já os valores de Eh variaram entre 105 a 170 mV, demonstrando uma oxigenação normal do rio. Tais resultados estão abaixo dos valores encontrados por Hatje et al (2017), indicando uma variação ao longo dos anos.

A diminuição dos valores de Eh pode ser devido ao período de coleta, correspondente a estação chuvosa, acarretando no aumento da concentração da matéria orgânica presente nos rios, tornando o ambiente mais redutor.

A análise dos valores obtidos para os parâmetros pH e Eh são primordiais para a definição das características físico-químicas de um rio, possibilitando prever os estados iônicos dos elementos maiores, menores e traço dissolvidos.

4.2 ELEMENTOS MAIORES, MENORES E TRAÇO

Os valores da concentração dos elementos maiores, menores e traço analisados demonstraram conformidade para as águas de classe 2, conforme é estabelecido pela Resolução CONAMA n° 357/2005 (CONAMA, 2005), com exceção do ferro (Fe) e manganês (Mn), que apresentaram valores acima do limite estabelecido.

4.2.1. FERRO E MANGANÊS

A Figura 11 relaciona os valores da concentração de Fe, obtidos no presente estudo, com os valores apresentados pelo IGAM (IGAM, 2016). Notase que no ponto E3 a concentração de Fe ultrapassou o limite estabelecido pela Resolução Conama n° 357/2005 (CONAMA, 2005).

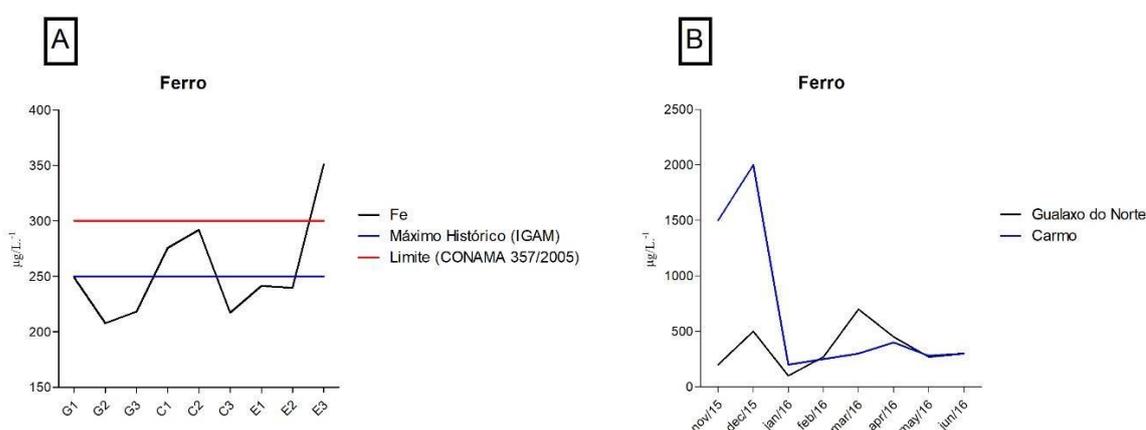


Figura 11: (A) - Concentração de Fe para cada ponto de amostragem durante a estação chuvosa, em 23 de fevereiro de 2018; (B) - Concentração de Fe obtidos no relatório do IGAM durante o período de 2015 a 2016.

A Figura 12 relaciona os valores da concentração de Mn, obtidos no presente estudo, com os valores apresentados pelo IGAM (IGAM, 2016). Notase que nos pontos C1 e C2 a concentração de Mn excedeu os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 357/2005 (CONAMA, 2005).

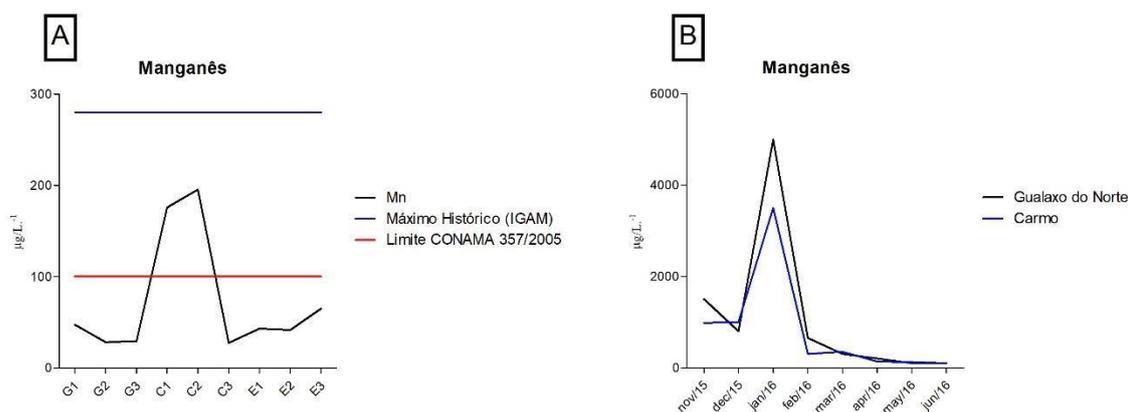


Figura 12: (A) - Concentração de Mn para cada ponto de amostragem durante a estação chuvosa, em 23 de fevereiro de 2018; (B) - Concentração de Mn obtidos no relatório do IGAM durante o período de 2015 a 2016.

Um ano após o rompimento da barragem do Fundão, o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM, 2016) e SEGURA et. al. (2016) realizaram estudos que relatam a avaliação de alguns parâmetros ambientais em amostras de água coletadas antes da confluência dos rios Gualaxo do Norte e Carmo, estudados neste trabalho. No presente estudo, todas as amostras de água analisadas apresentaram concentrações de elementos maiores, menores e traço inferiores aos valores encontrados pelo IGAM (IGAM, 2016) e por SEGURA et. al. (2016), demonstrando a diminuição significativa da concentração desses elementos para as águas residuais após três anos do rompimento da barragem. No entanto, para alguns pontos de amostragem desse estudo, nota-se que alguns valores ainda apresentam-se em não conformidade com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 357/2005 (CONAMA, 2005), como é o caso dos elementos Fe e Mn. (Figuras 11 e 12). Ainda que em não conformidade, os valores da concentração de Mn apresentam-se abaixo do máximo histórico na região, o que pode ser justificado pelo histórico de contaminação, de origem antropogênica, dos recursos hídricos na região do QF.

A variação nas concentrações de Fe e Mn podem estar relacionadas não somente a ruptura da barragem do Fundão, mas também devido ao período da coleta, correspondente a estação chuvosa, ou ainda as variações de algumas variáveis físico-químicas como pH e Eh (SEGURA et. al., 2016), acarretando na

liberação desses elementos, que se encontravam aprisionados ao sedimento, por dissolução ou ainda pela formação de complexos solúveis.

Embora as concentrações de elementos maiores, menores e traço tenham diminuído após o rompimento da barragem, é possível que parte do rejeito se encontre aprisionado no sedimento junto as margens dos rios (HATJE et. al., 2017) ou ainda associados aos óxidos de Fe e Mn (BAKER, 1968). Esses óxidos podem se comportar como excelentes eliminadores vestigiais, mas apresentam comportamento instável em condições de restrição ou ausência de oxigênio (TESSIER et. al., 1979). As elevadas concentrações de Fe e Mn para alguns pontos específicos de amostragem, também podem indicar a mobilização desses elementos, tornando-os biodisponíveis enquanto são carregados ao longo do rio, ou ainda que essas anomalias encontradas estejam relacionadas a litologia, naturalmente enriquecida em metais, e aos impactos decorrentes da mineração (HATJE et. al., 2017).

Os elementos Fe e Mn apresentam alta toxicidade e uma capacidade notável de bioacumulação no organismo, podendo ocorrer através da ingestão de água ou ainda por meio da inalação do ar contaminado, acarretando em doenças graves (ALAHABADI & MALVANDI, 2018). A intoxicação por manganês, conhecida como manganismo, afeta o trato respiratório, causando embolia pulmonar e bronquite, e também o sistema nervoso central (SNC), levando a problemas musculares, doença de Parkinson e alucinações (DOBSON et. al., 2004). A intoxicação por ferro, por sua vez, afeta principalmente órgãos, como coração, pâncreas e fígado, ocasionando doenças hepáticas graves (JAGOBBS et. al., 1965; GUIMARÃES, 1967; MOOSAVI et. al., 2015). Desse modo, o aumento das concentrações de Fe e Mn observados em alguns pontos de amostragem contribuem para um grave problema no abastecimento público de água, bem como para a saúde da população (ZAW & CHISWELL, 1999).

4.2.2. ALUMÍNIO, ARSÊNIO E ZINCO

Elementos como alumínio (Al), arsênio (As) e zinco (Zn), ainda que em conformidade com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA n°

357/2005 (CONAMA, 2005), apresentaram valores discrepantes em alguns pontos de amostragem. A figura 13 apresenta os valores da concentração de As obtidos no presente estudo.

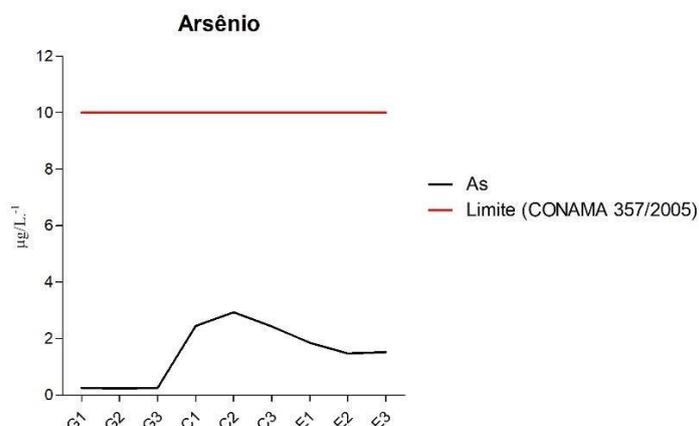


Figura 13: Concentração de As para cada ponto de amostragem durante a estação chuvosa, em 23 de fevereiro de 2018.

O arsênio, encontrado nas rochas do QF, ocorre principalmente em minerais como a arsenopirita (FeAsS) e pirita (FeS_2), associados ao minério de ouro. Durante a exploração aurífera, que ocorreu de forma intensa na região em meados do século XVII, o ouro era aproveitado e o rejeito, onde se encontram as elevadas concentrações de As, foi desprezado nos rios, sofrendo transformações químicas que resultam em sua liberação parcial para os solos e sistemas hídricos. Dessa forma, as altas concentrações de As observadas para os pontos C1, C2 e C3 são oriundas das atividades antrópicas advindas da exploração do ouro, demonstrando tamanha repercussão dos impactos ambientais gerados pelo extrativismo mineral (BIDONE et. al., 2018)

Ademais, os elementos Al e Zn também demonstraram altas concentrações para o rio do Carmo. A elevada concentração do elemento Al encontra-se relacionada as atividades antrópicas advindas da exploração de minério de ferro. Assim, o aumento da concentração do elemento, ainda que não tenha ultrapassado os limites estabelecidos pela legislação, pode estar relacionado ao rompimento da barragem do fundão. Contudo, valores encontrados para o elemento Zn, podem ser devidos a fontes de poluição não detectáveis no momento da coleta, como efluentes não tratados, ou ainda a uma maior carga no rio, decorrentes de fontes naturais.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo demonstra que os parâmetros físico-químicos, bem como as concentrações da maioria dos elementos presentes nos corpos d'água analisados encontram-se dentro dos parâmetros estabelecidos pela legislação, apresentando diminuição significativa, três anos após o rompimento da barragem do fundão. Contudo, a queda da concentração desses elementos nos ecossistemas aquáticos pode estar relacionada a associação ao sedimento, bem como a capacidade autodepurativa dos rios e ao carreamento desses elementos junto ao fluxo do rio para o Oceano Atlântico.

Diante da magnitude do impacto causado pelo rompimento da barragem do fundão, faz-se imprescindível que estudos relacionados ao monitoramento contínuo da bacia hidrográfica sejam elaborados, permitindo estimar o tempo e metodologias necessárias para o reestabelecimento dos ecossistemas aquáticos, proporcionando a recuperação de todo um sistema fluvial afetado.

6. REFERÊNCIAS

AIRES, U. R. V. et al. **Changes in land use and land cover as a result of the failure of a mining tailings dam in Mariana, MG, Brazil.** Land Use Policy, v. 70, p.63-70, 2018.

ALAHABADI, A., MALVANDI, H. **Contamination and ecological risk assessment of heavy metals and metalloids in surface sediments of the Tajan River, Iran.** Marine Pollution Bulletin, 2018, 133,741-749.

ALMEIDA, et. al. **Fundão Damcollapse: Oceanic dispersion of River Doce after the greatest Brazilian environmental accident.** Marine Pollution Bulletin, v. 112, p. 359-364, 2016.

ALMEIDA, C. A. et. al. **Characterization and evaluation of sorption potential of the iron mine waste after Samarco dam disaster in Doce River basin e Brazil.** Chemosphere, v.209, p. 411-420, 2018.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce: Rompimento da Barragem em Mariana/MG.** Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, Informe 2015. Brasília, 2016.

ARAÚJO, G. S. **Geoquímica de sedimentos e hidroquímica na bacia do rio do Carmo e sub-bacia do rio Gualaxo do Norte, pós rompimento de barragem de rejeitos de minério de ferro, leste do quadrilátero ferrífero, MG.** Relatório final (PIBIC/CNPq) – DEGEO. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2017.

ARAÚJO, G. S. **Análise Geoquímica de Sedimentos e Águas na Bacia do Rio do Carmo e Sub-bacia do Rio Gualaxo do Norte, Pós-Rompimento da Barragem de Rejeitos do Fundão, Leste do Quadrilátero Ferrífero, MG.**

Monografia (Graduação em Engenharia Geológica) – DEGEO, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2018.

BAKER, R. A. **Trace Inorganics in Water**. American Chemical Society, 1968.

Barra Longa – Histórico. Disponível em:
<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/barra-longa/historico?fbclid=IwAR1YB62rAhhjZxci25sqpSsAzjqUvtodUGdar2I5AIP8kZmeuTTR7Kx1wKs>>. Acesso em: 30 nov. 2018.

Barra Longa – Panorama. Disponível em:
<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/barra-longa/panorama?fbclid=IwAR3bjreFBOClgPHntuqxnxaso8r9vMgfx7v8OKjVtlyLRgd2IqVg5REStfk>>. Acesso em: 30 nov. 2018.

BIDONE, E. et. al. **Mass balance of arsenic fluxes in rivers impacted by gold mining activities in Paracatu (Minas Gerais State, Brazil)**. Environmental Science and Pollution Research, v. 25, p. 9085-9100, 2018.

BORBA, R. P.; FIGUEIREDO, B. R.; CAVALCANTI, J. A. **Arsênio na água subterrânea em Ouro preto e Mariana, Quadrilátero Ferrífero (MG)**. Revista Escola de Minas: Geociências, v.57, n. 1, p. 45-51, 2004.

BOTTINO, F. et. al. **Influence of the residue from an iron mining dam in the growth of two macrophyte species**. Chemosphere, v. 186, p. 488-494, 2017.

BURRITT, R. L; CHRIST, K. L. **Water risk in mining: Analysis of the Samarco dam failure**. Journal of Cleaner Production, v. 178, p.196-205, 2018.

CARMO, F. F. et. al. **Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context**. Perspectives in ecology and conservation, v. 15, p. 145-151, 2017.

CASTILLO, M. L. A. et al. **Fractionation of heavy metals in sediment by using microwave assisted sequential extraction procedure and determination by inductively coupled plasma mass spectrometry.** Microchemical Journal, 2011, 98, 234-239.

CAVALCANTI, J. A. D., 2003. **Origem dos turmalinitos auríferos na região sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG: Evidências de campo, petrografia, química mineral e dados isótopos de Nd e Sr.** Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. Tese de Doutorado, 176p.

CBH-Rio Doce – **Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce.**

Disponível em: <<http://www.riodoce.cbh.gov.br> >. Acesso em: 07 nov.

2018

CONAMA. **Resolução n° 357, de 17 de Março de 2005.** DOU n° 053, p.58-63.

COPAM. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG n° 1.** 5 de Maio de 2008.

COSTA A. T. 2001. **Geoquímica das águas e dos sedimentos da Bacia do Rio Gualaxo do Norte, leste –Sudeste do Quadrilátero Ferrífero (MG): Estudo de uma área afetada por atividade de extração mineral.**

Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 146p.

COSTA, A. T. 2007. **Registro histórico de contaminação por metais pesados, associadas à exploração aurífera no alto e médio curso da bacia do Ribeirão do Carmo, QF: um estudo de sedimentos de planícies de inundação e terraços aluviais.** Tese de Doutorado. Ouro Preto: UFOP.

COSTA, A. T., Nalini Jr. H.A., Lena J. C., Castro P. T., Friese K., Morgenstern P. 2006. **Sediment contamination as na historical register of auriferous exploitation in floodplains and alluvial terraces in Carmo River basin,**

Southeast Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Revista Acta hydroquímica and hydrobiologica, 34: 245-256.

COSTA, A.T., Nalini-Jr H.A., Castro P.T.A., Tatum S.H. 2010. **Análise estratigráfica e distribuição do arsênio em depósitos sedimentares quaternários da porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, bacia do Ribeirão do Carmo, MG.** REM: Revista Escola de Minas, 63(4):703-714.

COUTINHO, P. et al. **A utilização de SIG para simulação espacial de descargas sólidas em suspensão nos principais rios brasileiros a partir da base de dados da Aneel.** X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Foz do Iguaçu, PR, 2001.

Da Água para a Lama – Jornal da UNICAMP. Disponível em:

<<https://www.unicamp.br/unicamp/ju/noticias/2018/03/07/da-agua-para-lama>>.

Acesso em: 28 nov. 2018.

DEVESA-REY, R.; DÍAZ-FIERROS, F.; BARRAL, M. T.; J. **Trace metals in river bed sediments: An assessment of their partitioning and bioavailability by using multivariate exploratory analysis.** Environmental Management, 2010, 91, 2471-2477.

Domínio de Cursos D'água da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e da Região Hidrográfica do Rio Barra Seca. Disponível em:

<<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sag/CobrancaUso/BaciaDoce/MapaRioDoce.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2018.

DOBSON, A. W.; ERIKSON, K. M.; ASCHNER, M. **Manganese Neurotoxicity.** New York Academy of Sciences. DOI: 10.1196/annals.1306.009. Nova Iorque, 2004.

DORR II, J. V. N.; GAIR, J. E.; POMERENE, J. B.; RYNEARSON, G. A., 1957. **Revisão da estratigrafia Pré-Cambriana do Quadrilátero Ferrífero.** Brasil.

DFPM, DNPM 81. 31p.

DORR II, J. V. N. 1969. **Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero**, Minas gerais, Brazil. USGS/DNPM. Professional Paper, 641-A. 110p.

DRUMMOND, G. M.; MARTINS, C. S.; MACHADO, A. B. M.; SEBAIO, F. A. e ANTONINI, Y. (org.). **Biodiversidade em Minas Gerais: Um Atlas para sua Conservação**. Belo Horizonte: Fundação Biodiversitas, 222p., 2005.

ELEUTÉRIO, L. 1997. **Diagnóstico da Situação Ambiental da Cabeceira da Bacia do Rio Doce, MG, no Âmbito das Contaminações por Metais Pesados, em Sedimentos de Fundo**. Ouro Preto. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Dissertação de Mestrado. 154 p.

FARIAS, E. G.; COELHO, J. M. **Mineração e Meio Ambiente no Brasil**. Relatório Preparado para o CGEE – PNUD – Contrato 2002/001604. Outubro, 2002.

FERNANDES, G. W.; RIBEIRO, S.P. **Deadly conflicts: Mining, people, and conservation**. Perspectives in Ecology and Conservation, v 15, p.141-144, 2017.

FERNANDES, G. W. et. al. **Deep into the mud: ecological and socioeconomic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil**. Brazilian Journal of Nature Conservation, v. 14, p.35-45, 2016.

GIAIA- Grupo Independente para Análise do Impacto Ambiental. **Relatório parcial: Expedição Rio Doce**. Disponível em <<http://giaia.eco.br/wp-content/uploads/2015/12/Resultados-11_12-Agua-GIAIA.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2018.

GOMES, L. E. O. et. al. **The impacts of the Samarco mine tailing spill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil**. Marine Pollution Bulletin, v. 120, p. 28-36, 2017.

GREENPEACE; INSTITUTO SAÚDE E SUSTENTABILIDADE. **Avaliação dos Rios em Saúde da População de Barra Longa/MG Afetada pelo Desastre.** Disponível em: <<https://www.saudeesustentabilidade.org.br/wpcontent/uploads/2017/04/Resumo.18.04.2017.pdf?fbclid=IwAR1h2siZnRVmuo7gK0DV9huCckPZdqJL4DsteuXw6KBLKkgkEKab8AoorCtY>>. Acesso em: 30 nov. 2018.

GUIMARÃES, F. P. **Veiculação Hídrica das Doenças.** Curso de Epidemiologia e Profilaxia das Doenças de Veiculação Hídrica. IES – SURSAN, Rio de Janeiro, 1967.

GUILHERME, L. R. G. et al. 2005. **Elementos-traço em solos e sistemas aquáticos.** Tópicos Ci. Solo, 4:345-390.

HATJE V., et al. **The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide.** Scientific Reports, 2017, 7, 10706.

IBAMA. Laudo Técnico Preliminar: **Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. 2015.**

ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Resultados preliminares da avaliação do impacto do acidente da Samarco no ambiente marinho.** Ofício nº 225/2016 - GABI/PRESI/ICMBio. Brasília, 22 de março de 2017. Disponível em <http://www.mpf.mp.br/es/sala-deimprensa/docs/doc-3_20160036149-1-ibama.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2018.

IGAM. **Monitoramento da qualidade das águas superficiais do rio Doce no estado de Minas Gerais.** Relatório Técnico: Acompanhamento da Qualidade das Águas do Rio Doce Após o Rompimento da Barragem da Samarco no distrito de Bento Rodrigues – Mariana/MG, 2016. Retrieved from:

http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/IGAM/CERH/GTs/02_Monitoramento/01_reuniao/Item_4._Qualidade_das_aguas_GT_Monitoramento_2018.pdf.

(2018, September 18).

JAGOBS, M. D.; GREENE, H.; GENDEL, B. R. **Acute Iron Intoxication**. New England Journal of Medicine, 1965, 273, 1124-1127

LOBATO, L. M.; RIBEIRO-RODRIGUES, L. C.; VIEIRA, L. W. R. 2001. **Brazil's premier gold province. Part II: geology, and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero**. Mineralium Deposita, 36:249-277.

MAIA, F. F. **Elementos Traços em Sedimentos e Qualidade da Água de Rios Afetados pelo Rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, MG**. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Departamento de Solos. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2017.

MANDAL, H. K. **Effect of temperature on electrical conductivity in industrial effluents**. Recent Research in Science and Technology, 2014, 6(1), 171-175.

MARENT, B. R; LAMOUNIER, W. L; GONTIJO, B. M. **Conflitos Ambientais na Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero – MG: Mineração x Preservação**. Geografias, Artigos Científicos, v.7, n.1, p. 99-113, 2011.

MATOS, L. A. et. al. **The influence of heavy metals on toxicogenetic damage in a Brazilian tropical river**. Chemosphere, v. 185, p.852-859, 2017.

MATSCHULLAT J., OTTENSTEIN R., REIMANN C. 2000. **Geochemical background – can we calculate it?** Environmental Geology, 39(9):990-1000.

MECHE, A.; MARTINS, M.C.; LOFRANO, B.E.S.N.; HARDAWAY, C.J.; MERCHANT, M.; VERDADE, L. **Determination of heavy metals by inductively**

coupled plasma-optical emission spectrometry in fish from the Piracicaba River in Southern Brazil. Microchemical Journal, v. 94, p. 171-174, 2010.

MOOSAVI, P. M. et al. **Efficacy of orally administered montmorillonite for acute iron poisoning detoxification in rat.** Applied Clay Science, 2015, 103, 62-66.

QUEIROZ, H. M. et. al. **The Samarco mine tailing disaster: A possible timebomb for heavy metals contamination?** Science of the Total Environment, v. 637, p. 498-506, 2018.

RHODES, V. P. **Distribuição de mercúrio e arsênio nos sedimentos de área afetada por garimpo de ouro – rio Gualaxo do Norte, Mariana – MG.** Dissertação (Mestrado em Evolução crustal e recursos naturais) – DEGEO, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010

RIBEIRO, R. K. **Mineralogia, Geoquímica e Gênese das ocorrências auríferas no flanco norte do anticlinal de Mariana, Quadrilátero Ferrífero: Uma nova tipologia de minério denominada Bugre.** Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências. Universidade Federal de Brasília. Brasília, DF, 1998.

RODRIGUES, A. S. L. 2012. **Caracterização da Bacia do Rio Gualaxo do Norte, Mg, Brasil: Avaliação Geoquímica Ambiental e Proposição de Valores de Background.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 190p.

RUCHKYS, U.; MACHADO, M. M. M. **Oficinas de Sensibilização para Conservação de Sítios Geológicos do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil.** Terræ Didatica, v. 8, n. 1, p. 24-33, 2012.

SALINAS, N. S. C. **Samarco case: legal, economic and social implications of the greatest environmental disaster in Brazil.** Teaching Case Study. FGV Direito Rio, 2016.

SALOMONS, W. **Environmental impact of metals derived from mining activities: Processes, predictions, prevention.** Journal of Geochemical Exploration, v.52, n. 1, p.5-23, 1995.

SEGURA, F. R. et. al. **Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil).** Environmental Pollution, V. 218, P.813825, 2016.

Sobre a Samarco. **Disponível em: <<http://www.samarco.com/a-samarco>>.**
Acesso em: 07 nov. 2018.

SOS MATA ATLÂNTICA, Fundação. **Laudo técnico parcial - Expedição Bacia do Rio Doce.** 2016. Disponível em:
<https://drive.google.com/folderview?id=0BWoskHwwEXCbEtrdlh6MFIKSFk&usp=drive_web>. Acesso em: 24 nov. 2018.

TESSIER, A.; CAMPBELL, P. G. C.; BISSON, M. **Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals.** Analytical Chemistry, 1979, 51(7), 844-851.

THORNTON, I. **Impacts of mining on the environment; some local, regional and global issues.** Applied Geochemistry, v. 11, n. 1, p.355-361, 1996.

TRINER, G.D. **Mining and the State in Brazilian Development.** Pickering & Chatto. Rutgers University, 2011.

VAREJÃO, E. V. V.; BELLATO, C. R.; MELLO, J. W. V.; FONTES, M. P. F. 2009. **Otimização das condições de pré-redução do As(V) em extratos do método BCR para quantificação de As por Hg-AAS.** Revista Brasileira de Ciências do Solo, 33: 875-883.

VAREJÃO, E. V. V.; BELLATO, C. R.; FONTES, M. P. F.; MELLO J. W. V. 2011. **Arsenic and trace metals in river water and sediments from the southeast portion of the Iron Quadrangle, Brazil.** Environmental Monitoring and Assessment, 172: 631-642.

VICQ, R. F. C. 2015. **Mapeamento geoquímico e estabelecimento de valores de referência (background) de sedimentos fluviais do Quadrilátero Ferrífero.** Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. 190p.

VON SPERLING, M. **Estudos de modelagem da qualidade da água de rios.** Belo Horizonte:UFMG, 2007.

ZAW, M.; CHISWELL, B. **Iron and manganese dynamics in lake water.** Water Research, 1999, 33(8), 1900-1910