

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE OU INSTITUTO
Bacharelado em Geografia**

PEDRO HENRIQUE REIS DIAS

**INTERPRETAÇÕES INICIAIS A CERCA DA LIXIVIAÇÃO DOS REJEITOS
ORIGINADOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM 1, EM BRUMADINHO - MG**

Juiz de Fora
2020

PEDRO HENRIQUE REIS DIAS

**INTERPRETAÇÕES INICIAIS A CERCA DA LIXIVIAÇÃO DOS REJEITOS
ORIGINADOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM 1, EM BRUMADINHO - MG**

Monografia apresentada ao Departamento de Geociências da Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Geografia.

Orientador: Prof. Dr.: Miguel Fernandes Felipe

Juiz de Fora
2020

PEDRO HENRIQUE REIS DIAS

**INTERPRETAÇÕES INICIAIS A CERCA DA LIXIVIAÇÃO DOS REJEITOS
ORIGINADOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM 1, EM BRUMADINHO - MG**

Monografia apresentada ao Departamento de Geociências da Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Geografia.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Miguel Fernandes Felipe - Orientador
Departamento de Geociências - UFJF

Prof. Dr. Fabio Sanches
Departamento de Geociências - UFJF

Profa. Dra. Gisele Barbosa dos Santos
Departamento de Geociências - UFJF

Conceito obtido: _____

Aprovado em: _____ de _____ de 2020.

Dedico este trabalho aos meus pais, em especial ao meu pai, que apesar de não ter concluído a graduação em Geografia, me ensinou desde cedo como ela pode ser importante para entendermos o mundo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar os meus amigos do NCJR, que sempre estiveram comigo nessa jornada, e que tornaram os momentos difíceis em momentos de alegria, com muita pescaria e risadas sinceras. Agradeço também aos meus amigos de infância, que estão juntos comigo desde a época de colégio, pessoas que sem as quais eu não estaria onde estou e por quem irei carregar profundo carinho e admiração pelo resto da minha vida. Por fim agradeço aos meus professores, todos eles, que foram pessoas essenciais na minha formação e pelas quais guardo grande admiração e respeito, em especial meu orientador, Miguel, pessoa que sou muito grato de ter conhecido e que apesar de todas as nossas diferenças sempre esteve disposto a me ajudar, e sempre tinha algo a ensinar, não importasse qual fosse a ocasião.

Gostaria de guardar um agradecimento especial, aos meus amigos do Movimento Empresa Junior, em especial Marcelo, Wudy, Guilherme e Marina, que estiveram comigo na mais difícil e desafiadora jornada da minha vida. Além deles agradeço a Orbis Consultoria Jr, empresa que ajudei a fundar e que me proporcionou momentos que irei guardar para sempre.

“Quando se conceituam os fenômenos como sistemas, uma das principais atribuições e dificuldades está em identificar os elementos, seus atributos e suas relações, afim de delinear com clareza a extensão abrangida pelo sistema em foco.”

(CRISTOFOLETTI, 1980, p.2).

RESUMO

A questão da mineração no Brasil é algo muito delicada, visto que essa atividade possui um papel muito grande na economia brasileira, porém nos últimos anos vimos episódios gravíssimos relacionados a barragens de contenção de rejeitos oriundos da mineração de ferro. Esses desastres desencadeiam uma série de impactos ambientais, sociais e econômicos, além de alterarem de forma muito profunda os sistemas diretamente afetados por eles, com destaque para o sistema morfológico, através da alteração da paisagem. Além disso, a deposição desses rejeitos as margens de cursos d'água sobrepondo o sedimento natural, e o solo dessas áreas pode gerar diversas alterações nas dinâmicas hídricas da região afetada. Visto esse trabalho busca entender de forma inicial no contexto da região de Brumadinho-MG das questões que envolvem a movimentação geoquímica através da lixiviação dos rejeitos depositados no Ribeirão Ferro-Carvão.

Palavras-chave: Geoquímica; Lixiviação; Rejeitos; Brumadinho.

ABSTRACT

The mining issue in Brazil is very delicate, since this activity has a very large role in the Brazilian economy, however in recent years we have seen very serious episodes related to tailing dams from iron mining. These disasters trigger a series of environmental, social and economic impacts, in addition to altering the systems directly affected by them, with emphasis on the morphological system, through the modification of the landscape. Besides, the deposition of these tailings on the banks of water courses, overlapping the natural sediment and the soil of these areas, can generate several changes in the water dynamics of the affected region. Therefore, this work aims to provide an inicial understanding on the issues that involve the geochemical movement through the leaching of tailings deposited in Ferro-Carvão brook, in the context of the Brumadinho (Minas Gerais) region.

Keywords: geochemistry, leaching, tailings, Brumadinho.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Localidades diretamente afetadas pelo rompimento da Barragem 1.....	14
Figura 2	– Hidrólise na Dissolução da Calcita	20
Figura 3	– Mapa das Áreas de Influência do Meio Físico do Desastre de Brumadinho.....	31
Figura 4	– Mapa das Áreas de Influência do Meio Socioeconômico do Desastre de Brumadinho.....	32
Figura 5	– Bacia Hidrográfica do Paraoapeba.....	34
Figura 6	– Mapa do Ponto de Coleta da Amostra de Sedimento Natural.....	35
Figura 7	– Mapa do Ponto de Coleta da Amostra de Rejeito.....	36
Figura 8	– Sistema Utilizado nos Ensaios de Lixiviação	38
Figura 9	– Gráfico de Condutividade Elétrica das Amostras de Extrato Lixiviado.....	40
Figura 10	– Gráfico de Turbidez das Amostras de Extrato Lixiviado.....	41
Figura 11	– Gráfico de Dados de Condutividade e Turbidez Oriundos de Rompimento da Barragem de Fundão.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Resultados das mensurações de condutividade elétrica, turbidez e temperatura da solução lixiviada.....	40
----------	--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONAMA	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agencia Nacional de Águas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivo	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Água	17
2.2	Intemperismo e Mineração	19
2.3	Geoquímica.....	22
2.4	Mineração e Impactos Ambientais	24
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	28
4	METODOLOGIA.....	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
7	SUGESTÕES DE NOVOS TRABALHOS	47
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

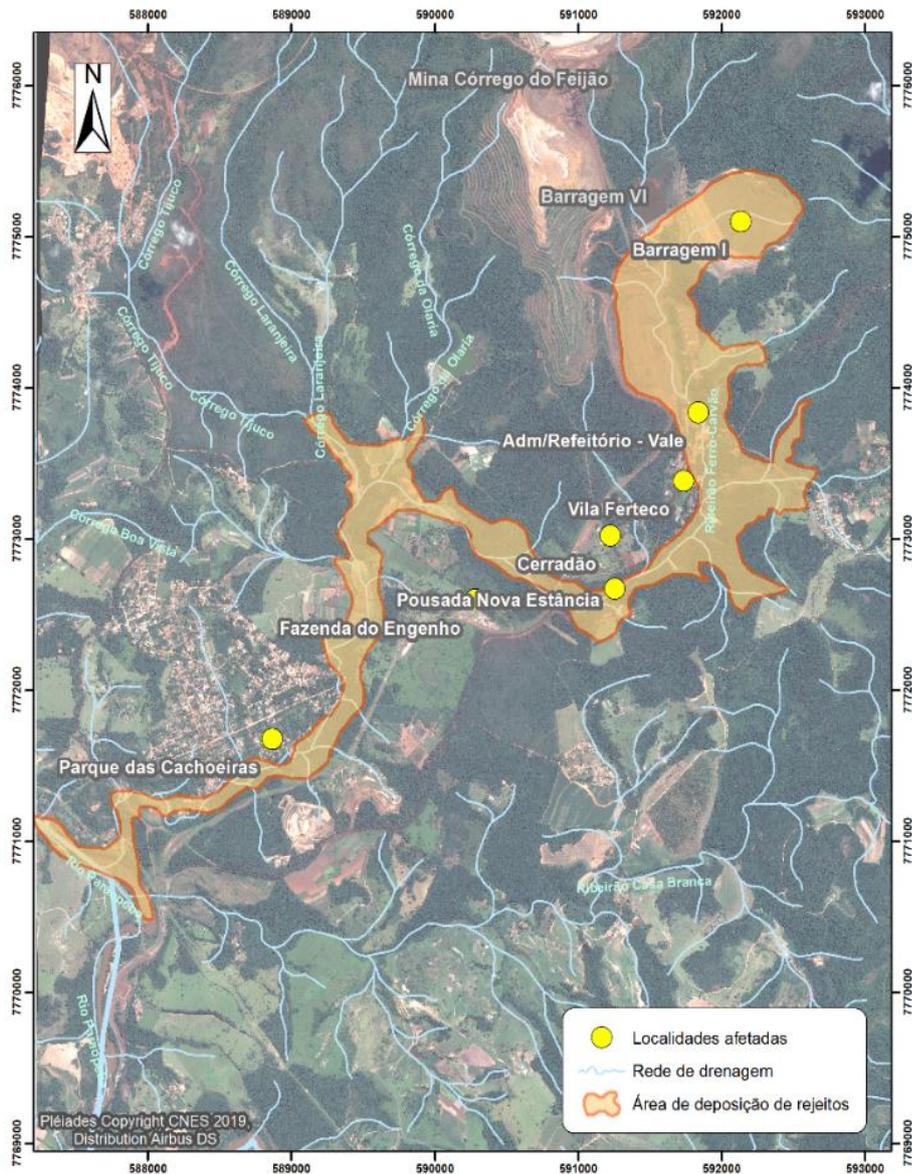
1 INTRODUÇÃO

O rompimento da barragem 1 da mina Córrego do Feijão em Brumadinho - MG, de propriedade da mineradora Vale S.A., em 25 de janeiro de 2019, acarretou em uma grande deposição de rejeitos oriundos da mineração nas margens do Ribeirão Ferro-Carvão. De acordo com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Renováveis, a barragem tinha um volume estimado em 12,7 milhões de m³, que foram, em parte, depositados ao longo do trajeto da lama, principalmente no Ribeirão Ferro-Carvão. Outra parte foi transportada pelo curso d'água até o Rio Paraopeba, alcançando a barragem da Usina Hidrelétrica de Três Marias, ainda em Minas Gerais (BRUMADINHO: estudo de ONG afirma que lama de barragem já chegou ao Rio São Francisco. (G1, Belo Horizonte, 2019).

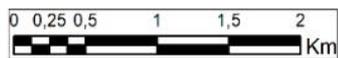
Esse episódio é o segundo em um período de menos de 5 anos, sendo o primeiro no município de Mariana (MG), em 5 de novembro de 2015, no qual um volume ainda maior de rejeitos, cerca de 32,6 milhões de m³, foram lançados nos cursos d'água da Bacia do Rio Doce, chegando até o mar, no litoral do Estado do Espírito Santo, tendo afetado um total de 680 km de cursos d'água, além de 39 municípios nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo.

Apesar de um volume menor de rejeitos envolvidos no rompimento da barragem em Brumadinho, o número de vítimas fatais foi muito maior que no caso de Mariana, contando com, até o momento, 270 mortes confirmadas e 11 pessoas ainda desaparecidas. De certo modo, esse alto número de mortos deve-se à área atingida, que abrange parte da localidade do Parque da Cachoeira (Figura 1). Além disso, o rompimento da barragem também atingiu parte da infraestrutura da mina onde se encontravam muitos funcionários que foram atingidos de surpresa pelo gigantesco fluxo de material.

Figura 1 - Localidades diretamente afetadas pelo rompimento da Barragem 1



Localidades diretamente afetadas pelo rompimento da Barragem I - Brumadinho, MG



Universal Transversa de Mercator
 Sistema de Coordenadas: WGS84
 Fonte: IDE/Sisema - IGAM;
 Defesa Civil de Minas Gerais;
 Airbus-PLIADAS/Engesat.
 Data: Janeiro de 2019



Fonte: Força tarefa Minas de Lama

Existem diversas questões envolvidas no depósito de rejeitos nas margens do Ribeirão Ferro-Carvão; entre elas está a interação existente entre o rejeito e as águas meteóricas, uma vez que, como já colocado anteriormente, o material oriundo do rompimento ocupou a camada superficial do solo, formando uma grande capa de rejeitos, cobrindo a cobertura original e, conseqüentemente, o local onde a água oriunda das chuvas percolam e realizam grande parte das reações químicas, as quais darão origem aos processos de erosão química, que, originalmente, fariam junto à cobertura original do solo.

Visto isso, o intemperismo químico se mostra de grande relevância para o estudo desenvolvido neste trabalho, uma vez que, através desse processo, os íons do rejeito depositado serão liberados. Nesse sentido, diante do rompimento da barragem em Brumadinho, é preciso entender como o rejeito depositado nas margens do Ribeirão Ferro-Carvão vai se comportar em relação a dinâmicas geoquímicas referentes à água, já que, caso exista uma carga química muito grande sendo lançada nas águas (sejam elas superficiais, subsuperficiais e subterrâneas) da bacia hidrográfica afetada, é possível que, com o passar do tempo, a química natural da água seja alterada, principalmente em curto prazo. Além disso, existem efeitos que podem ser sentidos a médio e longo prazo e que podem impactar a vida das pessoas, bem como o meio ambiente de forma muito aguda.

Para entender melhor a relação entre as águas meteóricas e os depósitos tecnogênicos de rejeito, é necessária uma contextualização do ciclo hidrológico da água. Nesse sentido, podemos dizer que o ciclo hidrológico é a forma com a qual a água existente no planeta circula dentre os diversos sistemas terrestres. Ou seja, como a água que existe em um sistema específico irá, por diversos fatores, se deslocar por outros sistemas terrestres, como a atmosfera, sistemas glaciais e outros, até que retorne ao sistema de origem - se é que é possível dizer que realmente exista um sistema de origem, pois, uma vez que estamos falando de um ciclo, o início e fim destes podem ser atribuídos a qualquer ponto dentro do mesmo ciclo, variando de acordo com o propósito de quem o está observando e/ou analisando. (CHRISTOFOLETTI, 1974).

O interessante sobre o ciclo da água é que ele é um dos fatores responsáveis pela vida na terra, visto que, devido à diferença entre a quantidade de água evaporada que retorna aos oceanos, existe um balanço positivo na quantidade de água doce no sistema terra, pois a água evaporada dos oceanos que não retorna a ele retorna à superfície como água doce. (MAY, 2004). Além disso, as águas que retornam da evaporação, não apenas dos oceanos, trazem consigo nutrientes e elementos essenciais à vida.

Nesse sentido, quando falamos em rompimento de uma barragem de rejeitos e, conseqüentemente, na contaminação dos recursos hídricos, estamos falando de algo que afeta a vida das pessoas e as dinâmicas ambientais como um todo, já que todos os sistemas presentes na dinâmica terrestre estão em direta ligação uns com os outros. Em síntese, quando um deles sofre uma alteração aguda, como no caso de um rompimento de barragem, os sistemas adjacentes também sofrerão algum tipo de alteração, e assim sucessivamente, na eterna busca pelo equilíbrio.

Estudos anteriores, como (Oliveira et al. 2019) pesquisaram o caso do rompimento da barragem da Samarco em Mariana e constataram, por meio de ensaios de lixiviação, que o material depositado nas margens pode alterar a química da água. Assim, neste trabalho busca-se a mensuração dos parâmetros de condutividade elétrica e turbidez, para que seja possível determinar se tal comportamento também ocorre em Brumadinho. Além disso, é importante destacar a possibilidade de que o uso da água dos cursos d'água afetados pela dinâmica hídrica citada acima pode ter como conseqüências problemas de saúde, pois não se sabe ainda os efeitos desse consumo a longo prazo. O uso das áreas afetadas para o cultivo também deve ser levado em conta como um potencial dano, uma vez que os materiais presentes no rejeito podem ser absorvidos pelas plantas.

Com esse contexto, é importante que existam trabalhos que buscam conceber como as dinâmicas geoquímicas dentro dos sistemas diretamente afetados vão se comportar, para que se possa tentar entender e planejar como o poder público, o setor privado e a população em geral devem reagir às conseqüências, em médio e longo prazo, dessa catástrofe. E digo tentar, pois prever dinâmicas químicas sistêmicas é algo muito complexo.

Ademais, os impactos ambientais podem ser muito maiores dos que já foram observados, dado que o desequilíbrio sistêmico causado foi gigantesco, principalmente quando visto pela ótica da paisagem, posto que ocorreram grandes alterações nesse sentido, como, por exemplo, o curso do próprio Ribeirão Ferro-Carvão, que terá que encontrar um novo caminho, assim como as pessoas atingidas pelo mar de lama.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é investigar a mobilização geoquímica através da lixiviação dos rejeitos, oriundos do rompimento da Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão em Brumadinho - MG e discutir possíveis impactos socioambientais decorrentes desse desastre.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção iremos abordar alguns conceitos relacionados ao tema foco deste trabalho visando uma melhor compreensão do tema e possibilitando um melhor entendimento do contexto onde o este estudo está inserido, além disso buscamos também com esta seção tentar relacionar esses conceitos com o aspecto Geográfico do desastre de Brumadinho.

2.1 Água

A água é um composto químico peculiar, pois dispõe de características físico-químicas deveras interessantes. A molécula de água possui um raio de $1,38 \text{ \AA}$, é formada por duas moléculas de hidrogênio e uma molécula de oxigênio com geometria angular tendo um ângulo de 105 graus, o que, além de outros fatores, confere a essa molécula dois polos (um em cada hidrogênio). A força de coesão existente nesses polos é extremamente forte, bem maior que a força de coesão de outros líquidos. Além disso, devido aos fatores acima citados, a água possui a característica de ser um solvente universal, possuindo uma constante dielétrica bastante elevada, cerca de $78,25$ a $T = 25^\circ\text{C}$ (MATTHESS, 1982; SZIKSZAY, 1993).

É importante também entendermos como a água circula dentro do planeta, sendo ela parte de um sistema no qual podemos encontrá-la em três estados - líquido, sólido e gasoso -, e participa de interações com outros sistemas tanto na atmosfera quanto nas camadas superficiais da terra. (SILVEIRA, 2001, *apud* ARANHA; SOUZA, 2015).

Dito isso, a água possui um papel central neste estudo, sendo por meio dela que a maior parte dos processos de intemperismo vão ocorrer, principalmente quando falamos em um ambiente tropical, já que ela é responsável por moldar nossa paisagem por meio dos processos de intemperismo das rochas e do solo (ARANHA; SOUZA, 2015). Além disso, ela também molda nossa paisagem por meio de processos socioeconômicos, sendo ela um recurso natural

muito utilizado para diversos fins, como, por exemplo, geração de energia elétrica, agropecuária, consumo humano, saneamento básico, mineração, entre outros.

Quando falamos em como a água influencia na conformação da paisagem, o que nos salta à primeira vista é o relevo. E a água, sendo um dos “atores” na conformação da paisagem, é claro que tem um papel muito importante na evolução do relevo, sendo responsável por processos como a desestruturação das partículas do solo, por meio do *splash*, ou a dissolução química de minerais e outros componentes do solo e das rochas. A água também atua na evolução do relevo por meio de processos de movimentação de partículas em todas as escalas, ou seja, ela movimenta partículas, levando-as de um lugar ao outro, transformando o relevo; criando ou suavizando declives; abrindo passagens com seu fluxo, que mais tarde podem se tornar cursos d'água; depositando material; criando bancos de areia, entre outros. A água, nesse sentido, mostra o quanto o planeta é um sistema mutável com diversos fatores atuando na modificação constante de suas paisagens (CHRISTOFOLETTI, 1974, p. 7-8).

A água constitui um dos elementos físicos mais importantes na composição da paisagem terrestre, interligando fenômenos da atmosfera inferior e da litosfera, e interferindo na vida vegetal, animal e humana, a partir da interação com os demais elementos do seu ambiente de drenagem. Dentre as múltiplas funções da água destacamos seu papel como agente modelador do relevo da superfície terrestre, controlando tanto a formação como o comportamento mecânico dos mantos de solos e rochas [...] (COELHO NETTO, 1998, p. 93 *apud* ARANHA; SOUZA, 2015).

Como agente modificador do relevo, existem processos que vão permitir a alteração do solo e das rochas pela água, sendo o principal deles o intemperismo, principalmente o químico, por meio de diversas interações com os minerais do solo e das rochas.

Em suma a água como agente modificador do relevo se relaciona intimamente com a modificação paisagem, uma vez que através de suas propriedades e reações com outros agentes ela altera diversos elementos da paisagem, por exemplo, quando pensamos na paisagem de grandes biomas mundiais, essa paisagem sempre está relacionada de alguma forma com a água, seja através de regimes hídricos ou através de como a água molda aquela paisagem.

Um outro ponto importante a ser colocado é a relação entre o ser humano, a água e paisagem, visto que em diversas atividades antrópicas nós seres humanos, nos utilizamos de alguma forma da água, e esse uso causa direta, ou indiretamente modificações na natureza, e temos como exemplo neste trabalho o rompimento da Barragem 1 em Brumadinho, onde o uso da água em processos de mineração fez com que a barragem se rompesse e alterasse

completamente a paisagem sendo esses rejeitos escoados através de um vale fluvial alterando também toda a dinâmica hídrica local.

2.2 Intemperismo e Mineração

Antes de falarmos dos processos de intemperismo, é importante que possamos fazer uma breve reflexão sobre os minerais, pois são eles que sofrem ação direta dos processos de intemperismo, principalmente aqueles ligados ao intemperismo químico. Nesse sentido, de acordo com Lepsch (2011), um mineral é um composto químico (em ocasiões raras, podem ser encontrados minerais formados por elementos nativos, ou seja, elementos químicos que podem existir independentemente da interação com outros elementos), formado pelas interações físico-químicas na crosta terrestre, que pode ser encontrado principalmente na forma sólida e que compõe as rochas. Esses minerais podem ser formados por diversas combinações químicas e permanecem estáveis até que as condições ambientais sejam alteradas, de tal forma que os elementos que os formam reajam com outros elementos externos e iniciem um processo de alteração ou até mesmo de degradação completa do mineral.

O intemperismo, por definição, é um conjunto de processos físicos, químicos e biológicos que desgasta as rochas ou o solo, podendo modificar a depender do tipo, suas características físicas, químicas ou ambas. (LEPSCH, 2011). Nesse sentido, podemos subdividir o intemperismo em dois grandes tipos: o Físico e o Químico.

O intemperismo físico é responsável por modificações físicas nas partículas, em geral relacionadas ao tamanho, ou seja, o intemperismo físico apenas desagrega as partículas, preservando suas estruturas internas e composição química. O intemperismo físico também é responsável por aumentar a superfície de contato das rochas, abrindo, assim, caminho para que a água atue de forma mais aguda no processo de intemperismo químico, visto que a superfície de contato está diretamente relacionada com eficiência das reações químicas (LEPSCH, 2011). De acordo com (Toledo 2014 p,138), “às transformações simplesmente mecânicas (fragmentação das rochas e dos grãos minerais) são denominadas intemperismo físico e ocorrem basicamente por adaptações a variações de temperatura e de pressão”.

O intemperismo químico atua na modificação química da partícula, alterando sua composição e estrutura química e liberando os íons que formam os minerais (LEPSCH, 2011). Além disso, o intemperismo químico pode ser subdividido em alguns processos, são eles: Dissolução, Hidratação, Oxidação e Hidrólise. Nesse caso, vamos conferir detalhes ou vamos detalhar três deles, a Hidrólise e a Oxidação e a Dissolução:

Assim, em contato com a água da chuva, considerada neste contexto como uma “solução de alteração” ou “de intemperismo”, carregada de substâncias dissolvidas ao longo de sua trajetória pela atmosfera e pelo contato com a biosfera, os minerais das rochas duras (minerais primários) sofrem reações químicas diversas, que dependem dos reagentes (minerais originais da rocha e soluções de alteração) e das condições em que as reações se processam (Clima, relevo, presença de organismos e tempo). O resultado das reações será o conjunto de minerais secundários (ou supérgenos, pois são gerados na superfície), que constituem as formações superficiais. (TOLEDO, 2014, p.141)

Figura 2 - Hidrólise na Dissolução da Calcita

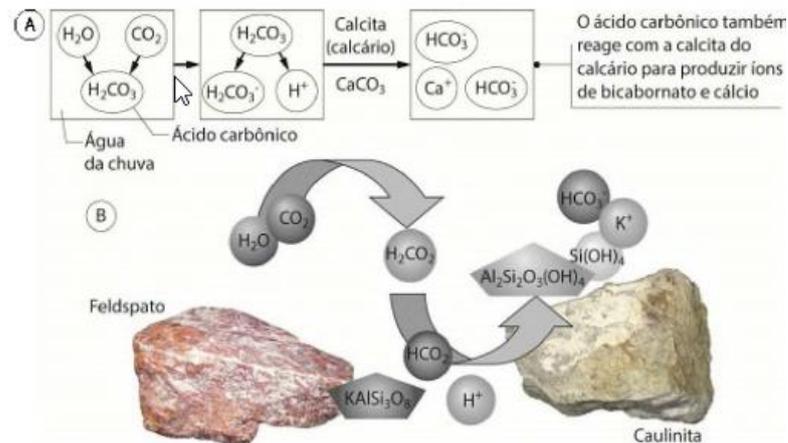


Fig. 3.6 Algumas reações comuns do intemperismo químico sob condições de clima quente e úmido: (A) dissolução da calcita formando íons de bicarbonato e de cálcio; (B) hidrólise do feldspato potássico (ortoclásio) formando a caulinita e liberando íons de potássio e ácido silícico [Si(OH)₄]

Fonte: LEPSCH, 2011

Devemos também destacar a reação de oxidação, que possui grande importância quando falamos nas dinâmicas e reações químicas que ocorrem em depósitos de rejeito, visto que, através dela elementos químicos, neste caso em específico o ferro (Fe), perdem elétrons ao mesmo tempo em que outros elementos adjacentes recebem elétrons, formando, assim, íons de carga positiva e também de carga negativa. É importante dizer que a reação de oxidação sempre estará acompanhada de uma reação de redução, que nada mais é do que o processo em que um elemento recebe elétrons, se ionizando com um sinal negativo. (USBERCO; e SALVADOR 2009)

Como apontado anteriormente, alguns metais são mais facilmente oxidados pela água, como o Ferro (Fe). No caso específico do rompimento de barragens de rejeito de minério de ferro, a reação de oxidação é ainda mais importante, uma vez que, no caso de minerais de ferro, a oxidação irá promover a formação dos íons férricos (Fe^{+3}) que formam o óxido de ferro (Fe_2O_3). (ATKINS *et al*, 2018)

Nos minerais primários, quase sempre o ferro se encontra no estado reduzido, pois os ambientes de formação de rochas duras normalmente não são oxidantes. Em contato com as águas de superfície, no entanto, quase sempre carregadas de oxigênio, esses elementos são oxidados, desestabilizando a estrutura mineral em que estavam. Esta reação é facilmente observada em rochas ornamentais com minerais escuros, que apresentam, com o tempo, uma auréola cor de ferrugem quando expostas às intempéries. Esses minerais escuros, que geralmente contêm ferro, literalmente “enferrujam” nessas condições; qualquer objeto doméstico constituído por compostos de ferro pode apresentar a mesma reação, sendo fácil reproduzir o efeito num pedaço de palha de aço, por exemplo. (TOLEDO, 2014, p142)

Por último, mas não menos relevante, devemos falar sobre o processo de hidratação, que se refere à entrada de moléculas de água na estrutura de um mineral, formando um outro mineral mais fraco, com características distintas. E no contexto deste estudo, se mostra com um processo bastante interessante, uma vez que buscamos entender o papel da água na lixiviação de componentes do solo.

Esse processo se deve ao caráter polar da molécula de água e ocorre pela atração dos dipolos dessa molécula, em que o átomo de oxigênio é o polo negativo, e os átomos de hidrogênio são os polos positivos pelas cargas elétricas dos minerais. Assim, as moléculas de água interagem com os íons do mineral, alterando sua estrutura, tornando-o mais frágil e suscetível à quebra. (ATKINS *et al*, 2018)

Quando um sólido iônico é adicionado à água, suas moléculas envolvem os íons da superfície do sólido, separando-os dos outros signos e dissolvendo-se, gradativamente. As cargas parciais das moléculas de água envolvendo um desses íons substituem as cargas dos íons vizinhos no sólido, com isso, os íons entram em solução. (ATKINS *et al*, 2018p. 186)

Quando os minerais são alterados pelos processos de intemperismo químico e são modificados ou completamente destruídos, eles são transportados, ou coloquialmente falando, são “lavados” do solo onde eles estão. A esse processo damos o nome de lixiviação (LIMA, Valmiqui Costa *et al* 2007). A lixiviação é um processo intimamente ligado à água ou a qualquer outro solvente e é responsável por capturar os íons presentes na solução do solo, e transportá-los normalmente para um curso d’água ou para o lençol freático.

Em resumo, a lixiviação é um processo no qual as águas meteóricas se infiltram no solo, através da sua cobertura superficial e formam um ambiente favorável à dissolução de certos elementos químicos, como o ferro (SPARK, 2003). Com isso, as águas meteóricas podem, dependendo da permeabilidade da cobertura de rejeitos depositada, percolar pelos poros existentes e fazer com que os íons metálicos disponibilizados no sistema pelo intemperismo sejam lixiviados para o curso d'água (LEPSCH, 2011).

Em solos mais desenvolvidos, é possível notar a atuação desse processo, ao se analisar a composição mineralógica do mesmo, uma vez que existem elementos que são mais ou menos susceptíveis à atuação do processo de hidrólise, devido a sua maior ou menor instabilidade química. Isso faz com que elementos mais reativos, como Sódio (Na) e Potássio (K), que são mais instáveis quimicamente, sejam retirados do solo com maior facilidade que elementos como o Alumínio (Al), pois o processo de hidrólise é capaz de agir neles com maior eficiência.

Quando falamos em depósitos de rejeito de mineração, é importante entendermos os agentes envolvidos no transporte dos íons minerais presentes no solo para o curso d'água. Nesse sentido, primeiramente, devemos entender o papel das águas meteóricas, que nada mais são do que a chuva. A chuva, ao cair e percolar pelos depósitos de rejeito, inicia um processo que chamamos de “transporte vertical”. Durante esse processo, a água da chuva vai passando pelas diversas camadas do depósito, reagindo com os minerais e outros elementos químicos ali presentes; e transporta os íons liberados nessas reações, formando uma solução mineral aquosa que, eventualmente, por gravidade e pela ação do escoamento preferencial, chega a um curso d'água ou a um lençol freático. Ao chegar em um desses dos dois destinos citados anteriormente, essa solução pode afetar quimicamente a água. (LIMA *et al*, 2007)

2.3 Geoquímica

Para que possamos compreender e analisar como os elementos e compostos químicos estão distribuídos no planeta, tanto em relação aos ambientes onde estão localizados, quanto aos processos envolvidos na sua formação e transformação, existe um campo dentro da ciência bastante específico, a Geoquímica.

A Geoquímica também atua na tentativa de compreender como ocorrem as transferências químicas entre os sistemas, e como os sistemas são afetados por essa transferência, ou seja, a geoquímica procura também compreender além de como ocorrem as transferências químicas entre sistemas, como os sistemas respondem a essas transferências. (MULHOLLAND, 2009)

A necessidade de particularizar os processos geológicos e identificar os produtos, no entanto, deve convergir para a observação e o estudo do planeta Terra como um sistema complexo e dinâmico, no qual os materiais são transportados e modificados pela atuação de uma grande quantidade de processos que incluem fusão, cristalização, erosão, dissolução, precipitação, vaporização e decaimento radioativo (ROSE *et al*, 1979)

Como ciência, a Geoquímica é de fundamental importância nos dias de hoje, para que possamos entender como as dinâmicas do planeta funcionam, visto que o planeta está em constante mudança. Essas mudanças são controladas ou por reações físicas, como aquecimento e resfriamento, ou por reações químicas, e é justamente nesse sentido que a geoquímica atua, tentando trazer luz às dinâmicas envolvidas nas reações. (GUEDES, 2012)

Não só entender as dinâmicas, mas também saber como essas dinâmicas influenciam nos sistemas terrestres, coloca a Geoquímica como um ramo científico bastante interessante, pois ela concentra conhecimentos de diversas áreas e dá a elas um novo significado, pois promove a interação entre todas elas (SZIKSZAY, 1993). Sendo assim, a Geoquímica, ao longo dos anos, vem ganhando grande notoriedade em diversos outros ramos da ciência, auxiliando-os com um *background* de conhecimentos que permite que esses outros ramos possam ter um panorama muito mais claro das dúvidas e hipóteses que fazem girar a roda da ciência. (GUEDES, 2012)

Nesse sentido, podemos colocar a geoquímica como campo do conhecimento estratégico quando falamos de exploração de recursos minerais. Nesse campo ela vai ter um papel crucial para determinação e localização de depósitos minerais (em uma análise fria, podemos considerar petróleo e outros recursos orgânicos como recursos minerais, mas, em geral, compostos orgânicos não entram em tal classificação). (LEPSCH, 2011)

A geoquímica também vai se destacar ao falarmos em exploração do solo no geral, visto que o bom entendimento das dinâmicas químicas do solo é de vital importância para o seu bom uso, principalmente em atividades agrícolas, que dependem de análises e entendimentos

qualitativos e quantitativos de como os minerais se comportam no solo e interagem com as mais variadas espécies vegetais. (PEREZ *et al*, 1997)

Ainda no que tange a Geoquímica, podemos dizer que o papel antrópico sobre ela tem sido cada dia mais relevante, uma que as atividades antrópicas, a partir de suas aglomerações, mas também dos seus meios de produção como indústrias e agronegócios, promovem, de forma cada vez mais acelerada, alterações em ambientes/sistemas geoquímicos. (BONALD C. Figueiredo, 2009)

A espécie humana é essencialmente gregária e suas concentrações, por mais primitivas que sejam sob o ponto de vista tecnológico, sempre promoveram e promoverão impactos ambientais. Quanto mais avançado for o estágio de sofisticação tecnológica de um grupamento humano, mais diversificadas serão suas atividades, maiores serão as suas necessidades por suprimentos e mais complexa a composição química dos seus produtos e em decorrência, de seus dejetos de origem orgânica/biológica ou resíduos artificiais decorrentes de processos industriais. Por isso, o conceito de tecnosfera tem sido utilizado para identificar a porção da geosfera onde se fazem sentir os efeitos da presença do homem e de suas atividades. A tecnosfera não tem limites nítidos, permeando os diversos subsistemas da geosfera na forma de alterações climáticas globais, na destruição da camada de ozônio, na poluição de corpos d'água, de solos e das camadas inferiores da atmosfera, e mesmo nas alterações das características genéticas de animais e vegetais. (BONALD FIGUEIREDO, 2009)

2.4 Mineração e Impactos Ambientais

O Conselho nacional de Meio Ambiente (CONAMA), em sua Resolução número 001, de 23 de janeiro de 1986, artigo primeiro, define impacto ambiental como:

Para efeito desta Resolução, considera-se impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: I - A saúde, a segurança e o bem-estar da população; II - As atividades sociais e econômicas; III - a biota; IV - As condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; V - A qualidade dos recursos ambientais.

No contexto da mineração, temos uma atividade econômica que certamente está entre as que mais causam impactos ambientais, uma vez que, para que possa ser exercida, são necessárias diversas alterações ambientais que, por sua vez, causam inúmeros impactos. (MECHI; SANCHES 2010). Podemos perceber esses impactos citando a questão da grande supressão vegetal, que é realizada para abertura da cava de mineração e das instalações físicas referentes a atividade mineradora. Além disso, a instalação da atividade também necessita da remoção de grandes volumes de solo, ação essa que por sua vez modifica completamente a paisagem, e que está dentre os impactos mais difíceis de serem reparados após o encerramento

da atividade mineradora, uma vez que não existe viabilidade em reconstituir todo o solo retirado do local. Esse processo ainda causa impactos nos cursos d'água, visto que por deixar o solo exposto, causa o assoreamento dos cursos d'água que estão localizados ao redor da cava de mineração (MECHI; SANCHES 2010).

Praticamente, toda atividade de mineração implica supressão de vegetação ou impedimento de sua regeneração. Em muitas situações, o solo superficial de maior fertilidade é também removido, e os solos remanescentes ficam expostos aos processos erosivos que podem acarretar em assoreamento dos corpos d'água do entorno. (MECHI; SANCHES 2010)

O regime hídrico das bacias hidrográficas na região onde a atividade mineradora está alocada também sofre grandes impactos. Uma vez que, devido ao uso de grandes quantidades de água na planta de lavagem da mineração, isso faz com que as mineradoras utilizem grandes volumes de água provenientes de preferência de fontes de água presentes na região para minimizar os custos, tais fontes de água podem ser de origem tanto superficiais quanto subterrâneas e subsuperficiais. (MECHI; SANCHES 2010)

O regime hidrológico dos cursos d'água e dos aquíferos pode ser alterado quando se faz uso desses recursos na lavra (desmonte hidráulico) e no beneficiamento, além de causar o rebaixamento do lençol freático. (MECHI; SANCHES 2010 p.209)

Ainda no que se refere a impactos nos recursos hídricos, podemos citar a contaminação desses recursos, devido, entre outros fatos, ao vazamento de líquidos do maquinário utilizado na atividade mineradora, bem como por meio de substâncias que podem ser lixiviadas para os corpos d'água. Nesse sentido, podemos ter, em decorrência da instalação de empreendimentos desse tipo, grandes alterações referentes à qualidade da água da região, mais especificamente dos depósitos hídricos que estão localizados na mesma bacia hidrográfica do empreendimento, porém a jusante do mesmo. (MECHI; SANCHES, 2010)

Ainda no espectro de possíveis impactos, podemos citar a questão da poluição atmosférica gerada não só pelos particulados oriundos da atividade mineradora em si, mas também oriunda do grande número de maquinário e veículos que são utilizados em suas operações, visto que são necessários tratores, caminhões, carros dentre outros equipamentos para que uma planta de mineração funcione plenamente. Além disso, o tráfego desses veículos também levanta grandes quantidades de particulados, que acabam, por vezes, sendo movidos por meio da ação do vento para residências e até mesmas cidades próximas, causando, assim, o agravamento de doenças respiratórias provocando grandes transtornos para a população que ali reside (MECHI; SANCHES, 2010).

Uma reflexão importante no que tange o assunto dos impactos ambientais é como o conjunto de aspectos citados acima, bem como a junção dos mesmos com outros fatores de menor dimensão, podem causar impactos em ecossistemas inteiros. Isso se dá ao partirmos da premissa de que um sistema inserido no sistema terra não é fechado e, por esse motivo, troca energia com seus sistemas adjacentes. Devido a esse fato, a perturbação de apenas um sistema vai gerar reverberações em outros sistemas que, por conseqüências, irão gerar reverberações em outros e assim por diante. (CHRISTOFOLETTI, 1974)

Os impactos também não só podem como causam reverberações no meio antrópico uma vez que áreas afetadas a jusante das áreas de mineração, bem como no seu arredor, são frequentemente utilizadas para agricultura, pecuária ou até mesmo em alguns casos, como a cidade de Congonhas–MG, são áreas com habitação relativamente densa.

Todos os impactos anteriormente referidos podem ter efeitos danosos no equilíbrio dos ecossistemas, tais como a redução ou destruição de hábitat, afugentamento da fauna, morte de espécimes da fauna e da flora terrestres e aquáticas, incluindo eventuais espécies em extinção, interrupção de corredores de fluxos gênicos e de movimentação da biota, entre outros. Em relação ao meio antrópico, a mineração pode causar não apenas o desconforto ambiental, mas também impactos à saúde causados pela poluição sonora, do ar, da água e do solo. (MECHI; SANCHES 2010 p.209 e 210)

Castro (1998) define desastre como “Resultados de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema (vulnerável), causando danos humanos, materiais e/ou ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais.” Partindo dessa definição, é importante que façamos uma breve reflexão acerca da forma como classificamos eventos como os do rompimento da Barragem de Fundão ou da Barragem 1 em Brumadinho, visto que, se levarmos ao pé da letra a definição de desastre, não é possível compreender a magnitude e os efeitos que tais eventos desencadearam nos mais diversos níveis e sistemas.

Um desastre normalmente é classificado como um evento repentino, catastrófico, seja ele devido a causas naturais, como, por exemplo, a erupção de um vulcão ou um terremoto, ou devido a causas antrópicas, como um grande vazamento de petróleo no mar ou incêndio provocado, que causa danos severos a um sistema, seja ele social, econômico, político, ambiental etc. Normalmente, os danos decorrentes desses eventos súbitos ocasionam mortes e prejuízos materiais e/ou financeiros em uma escala em que a intervenção externa para reparar esses danos seja necessária, através do estado em seus mais diversos níveis e também da iniciativa privada. (KOBAYAMA *et al*,2006)

Nesse ponto, podemos começar a discutir a real dimensão do rompimento da Barragem 1, pois em vários aspectos foi um desastre que atingiu diversos sistemas ao mesmo tempo, de forma muito rápida e aguda, podemos aqui citar os sistemas ambientais e socioeconômicos. Nesse sentido, é pouco prudente definir o rompimento da barragem apenas como um desastre ambiental, pois, dessa forma, acabamos por excluir, mesmo que involuntariamente, os danos sociais e econômicos causados pelo colapso da barragem. Danos esses que, em muitos aspectos, podem ser maiores que os danos ambientais, pois a perda de um parente próximo, um amigo ou um bem material como a casa onde a família vivia há gerações, são danos que não podem ser mensurados de uma forma assertiva. Tendo isso em vista, e me baseando em tudo o que foi exposto anteriormente, o mais correto ao meu ver seria classificar o rompimento da Barragem 1 como um “Desastre socioambiental”, já que se trata de uma nomenclatura que abarca um espectro maior da tragédia.

À luz desses fatos, um segundo ponto bastante importante de ser discutido é quanto um desastre pode ser prevenido ou, no pior dos casos, ter seus danos mitigados (KOBAYAMA *et al.*, 2006).

Em eventos naturais extremos como, por exemplo, terremotos, é possível mitigar seus danos através de ações de prevenção visando que os danos causados sejam diminuídos. Pensando nisso, podemos colocar o seguinte questionamento acerca do desastre de Brumadinho: o quanto as ações prévias realizadas, tanto pelos órgãos públicos, quanto pela empresa proprietária do empreendimento, contribuíram para mitigar o desastre? Ou, nesse caso, o quanto esses agentes foram diretamente responsáveis pelo desastre ocorrer? (PEREIRA *et al.* 2019). As ações dos agentes se mostram cruciais para que o fato, o momento do desastre, fosse possível, fazendo com que elas façam parte do desastre não mais como agentes de prevenção e mitigação, mas como atores diretamente envolvidos nesse desastre socioambiental

Quando pensamos à luz desse questionamento, podemos fazer a diferenciação entre impacto e desastre. O rompimento da barragem de Brumadinho se mostra como um desastre, como já dito anteriormente, pois foi um evento abrupto, de grande abrangência e que resultou em inúmeros danos, ou seja, os resultados de um desastre são danos que se desdobram em impactos, ambientais, sociais etc.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Para podermos entender de uma forma mais clara os dados e os resultados deste trabalho, é preciso definir, de forma clara, a área de estudo. Além disso, a caracterização da área se mostra necessária para que se possa entender os reais impactos que o rompimento da barragem pode causar nos sistemas e nas localidades afetados.

Para começarmos a entender a área de estudo, é importante delimitá-la. Dessa forma, podemos definir a área de estudo do trabalho de forma mais geral, como a borda oeste do quadrilátero ferrífero, e de forma mais específica, a bacia do Ribeirão Ferro-Carvão, localizada no município de Brumadinho-MG. Com isso, podemos começar a caracterização da área, explicitando as características do meio físico dessa região.

Em relação a vegetação e ao clima da área de estudo, de acordo com o IBGE (2019) e com o INMET, o município de Brumadinho está localizado em uma zona de transição entre os biomas da Mata Atlântica e do Cerrado, com um clima tropical com duas estações bastante destacadas: uma mais seca e fria e outro quente e úmida.

Com relação à fitofisionomia, a área possui regiões de savana e floresta estacional semidecidual. É importante também destacar que existem grandes áreas de supressão vegetal na região devido à atividade mineradora, o que em uma região de transição de biomas é algo bastante preocupante, pensando em uma descontinuidade dos sistemas que interagem com esses biomas.

Além disso, o regime climático da região se apresenta como um ponto importante a ser destacado, uma vez que ele vai influenciar nos aspectos hídricos da região, ou seja, o clima se mostra de grande relevância, já que tratamos da interação entre águas meteóricas e os depósitos de rejeito oriundos do rompimento da barragem.

Outro aspecto relevante é a hidrologia da área. Esse ponto, em específico, deve ser observado com muito cuidado, uma vez que, com o rompimento, uma parte do sistema hídrico da área pode ter sido alterada, porém é impossível neste trabalho determinar se essas mudanças realmente existem e qual a profundidade das mudanças.

O sistema hídrico local é parte da bacia do rio Paraopeba e possui diversas sub-bacias,, que possui como um dos seus afluentes o Ribeirão Ferro- Carvão. A montante desse afluente está localizada o ponto de rompimento da barragem 1 da Mina Córrego do Feijão (CPRM-

Serviço Geológico do Brasil, 2019). Além disso, um outro ponto importante a ser destacado é que o Rio Paraopeba faz parte da bacia do Rio São Francisco, mais um motivo para acentuar a gravidade desse desastre, visto que o Rio São Francisco é hoje um dos principais rios do Brasil.

A questão hídrica ainda possui relevância no que tange aos parâmetros analisados, uma vez que a borda oeste do quadrilátero ferrífero possui um sistema hídrico muito adensado, com diversos cursos d'água. Então, uma alteração química pode afetar todo o hidrossistema da região, causando impactos no meio biótico, tanto aquático quanto terrestre. Se a fauna e a flora local utilizam dessa água, os impactos também podem ocorrer no meio físico, visto que a água é o principal vetor de conformação da paisagem. Assim, essa alteração química pode ocasionar mudanças na interação da água com o solo e com as rochas. Além disso, uma turbidez elevada pode indicar também maior quantidade de sedimentos na água, o que a médio e longo prazo pode alterar a calha do curso d'água assoreando ou criando bancos de sedimentos, principalmente no baixo curso. Ademais, a combinação dos dois fatores acima citados pode ocasionar impactos socioeconômicos na região, visto que existem diversas propriedades rurais e concentrações urbanas que utilizam as águas desse sistema para suas atividades e que estarão expostas às alterações químicas e físicas do hidrossistema local, o que pode ocasionar impactos que devem ser objeto de estudos futuros.

Outro aspecto físico relevante diz respeito ao solo da região de estudo, visto que esse solo normalmente interage com água e os demais atores do intemperismo, possui um equilíbrio dinâmico, finamente ajustado ao longo da formação tanto das superfícies dos solos, quanto do sistema hídrico local. Com o rompimento da barragem e a sobreposição do solo pelo rejeito, as interações se modificaram e, por isso, o entendimento do estado anterior do solo se mostra tão relevante.

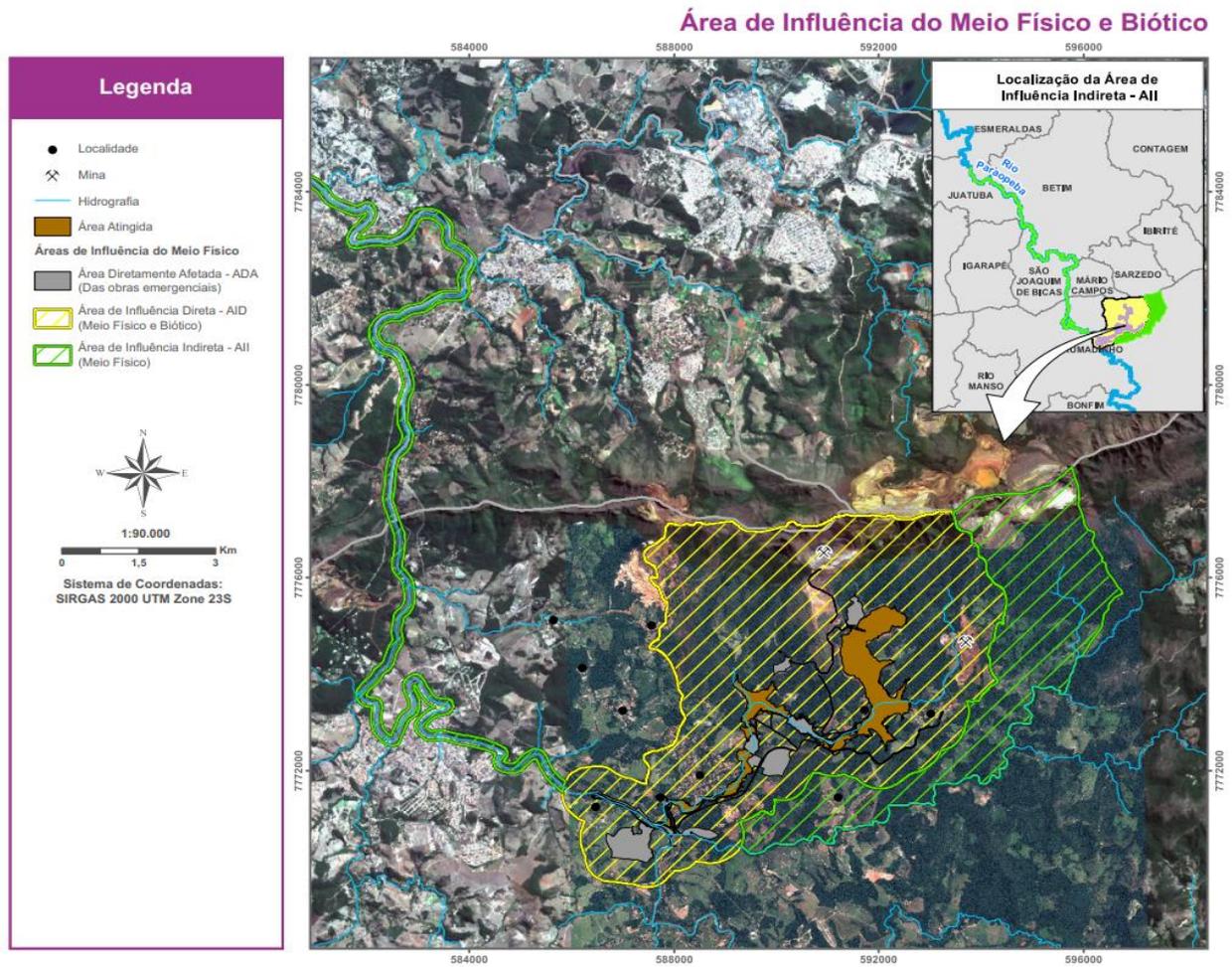
Nesse sentido no município de Brumadinho, temos 4 diferentes tipos de solo, em diferentes sítios morfológicos. Nas áreas das escarpas das serras, encontram-se os Neossolos Litólicos que devido à altitude e declividade do relevo, não facilita a deposição de sedimentos. Temos também grandes quantidades de Cambissolo Háptico nas regiões de menores declividades do município, e em função da morfologia do relevo, têm uma maior infiltração de água e, conseqüentemente, um processo de pedogênese acelerado. Esses são solos mais profundos do que os neossolos, porém mais rasos do que os latossolos. Por fim, também podemos observar ocorrências de Latossolos Vermelhos e Latossolos Vermelho-Amarelo nas regiões mais planas do município, locais onde ocorre deposição de sedimento (FEAM, 2010).

Como comentado anteriormente, o entendimento apenas das características físicas da área de estudo não se mostra suficiente neste estudo em particular, pois, muito além de um crime ambiental com impactos ambientais, o rompimento também afetou toda uma comunidade, onde existem dinâmicas sociais e econômicas envolvidas e, por isso, uma breve caracterização do meio socioeconômico também se provou como algo relevante a ser exibido.

O município de Brumadinho, de acordo com dados do IBGE do Censo demográfico de 2010, possui uma população de pouco menos de 34 mil habitantes, com uma estimativa de 40 mil habitantes em 2019. (IBGE Cidades, 2020). Em termos econômicos, o PIB do município em 2017 foi de 1,988 bilhões de reais, sendo grande parte desse PIB (1,069 bilhões) oriundo de atividades industriais (IBGE Cidades, 2020).

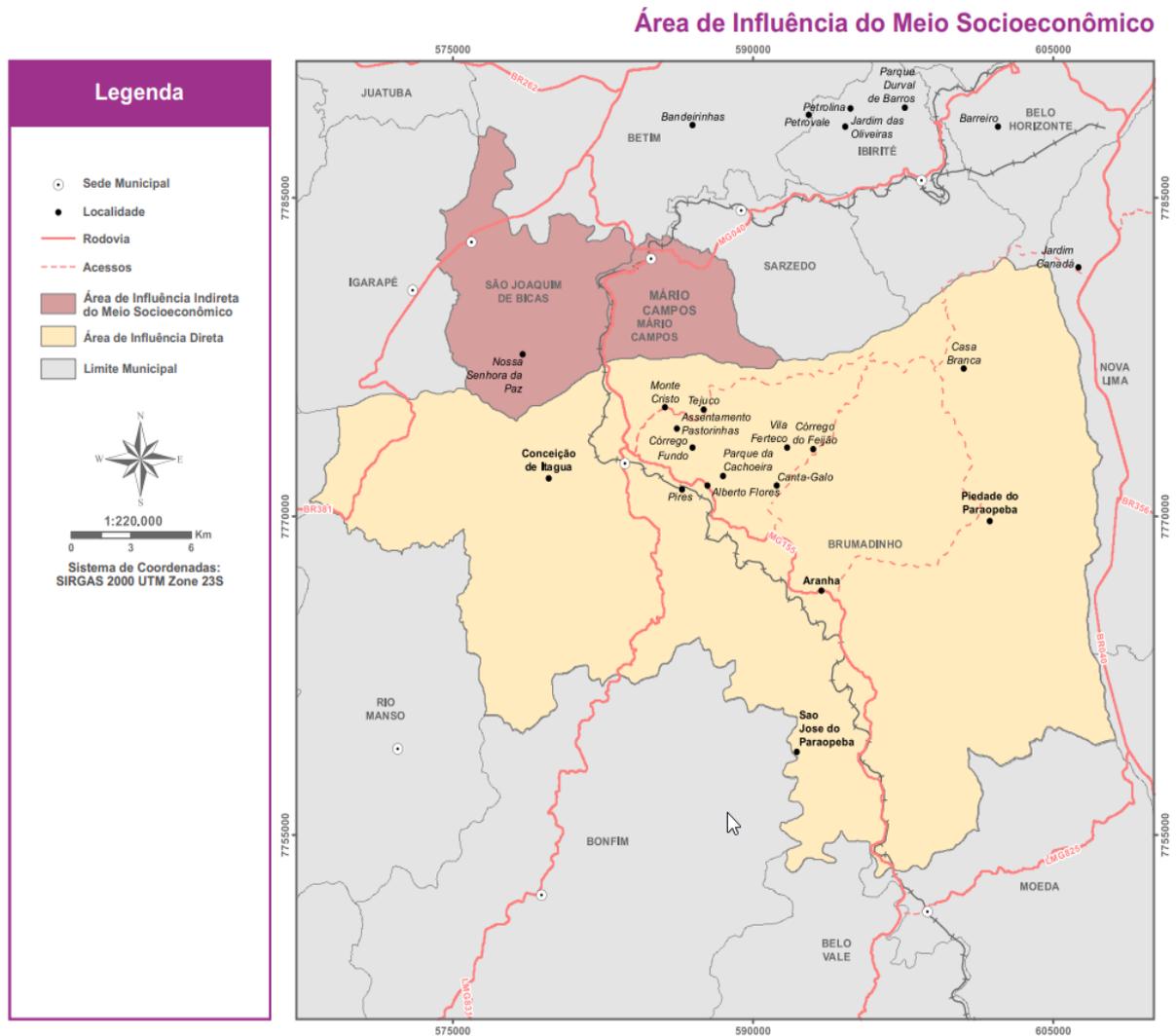
Como podemos observar pelos dados apresentados, e em observância das figuras 3 e 4, que mostram as áreas afetadas tanto no meio físico quanto no meio socioeconômico, o rompimento da barragem 1 da Mina Córrego do Feijão é um desastre que afetou, afeta e ainda irá afetar pessoas, animais e plantas em uma escala muito além das vidas perdidas.

Figura 3 - Mapa das Áreas de Influência do Meio Físico do Desastre de Brumadinho



Fonte: Rima do Licenciamento Ambiental Corretivo - Obras Emergenciais

Figura 4 - Mapa das Áreas de Influência do Meio Socioeconômico do Desastre de Brumadinho



Fonte: Rima do Licenciamento Ambiental Corretivo - Obras Emergenciais

Além da área de estudo colocada acima, existe também uma segunda área nesse estudo referente a bacia do Rio Paraopeba até a região da barragem de Três Marias (Figura 5), como podemos ver na figura 6. Essa segunda área de estudo deve ser colocada apenas como uma área de fundo para que se possa ter uma referência, um ponto de partida inicial que possibilite a comparação dos estudos no local foco, no caso o município de Brumadinho- MG.

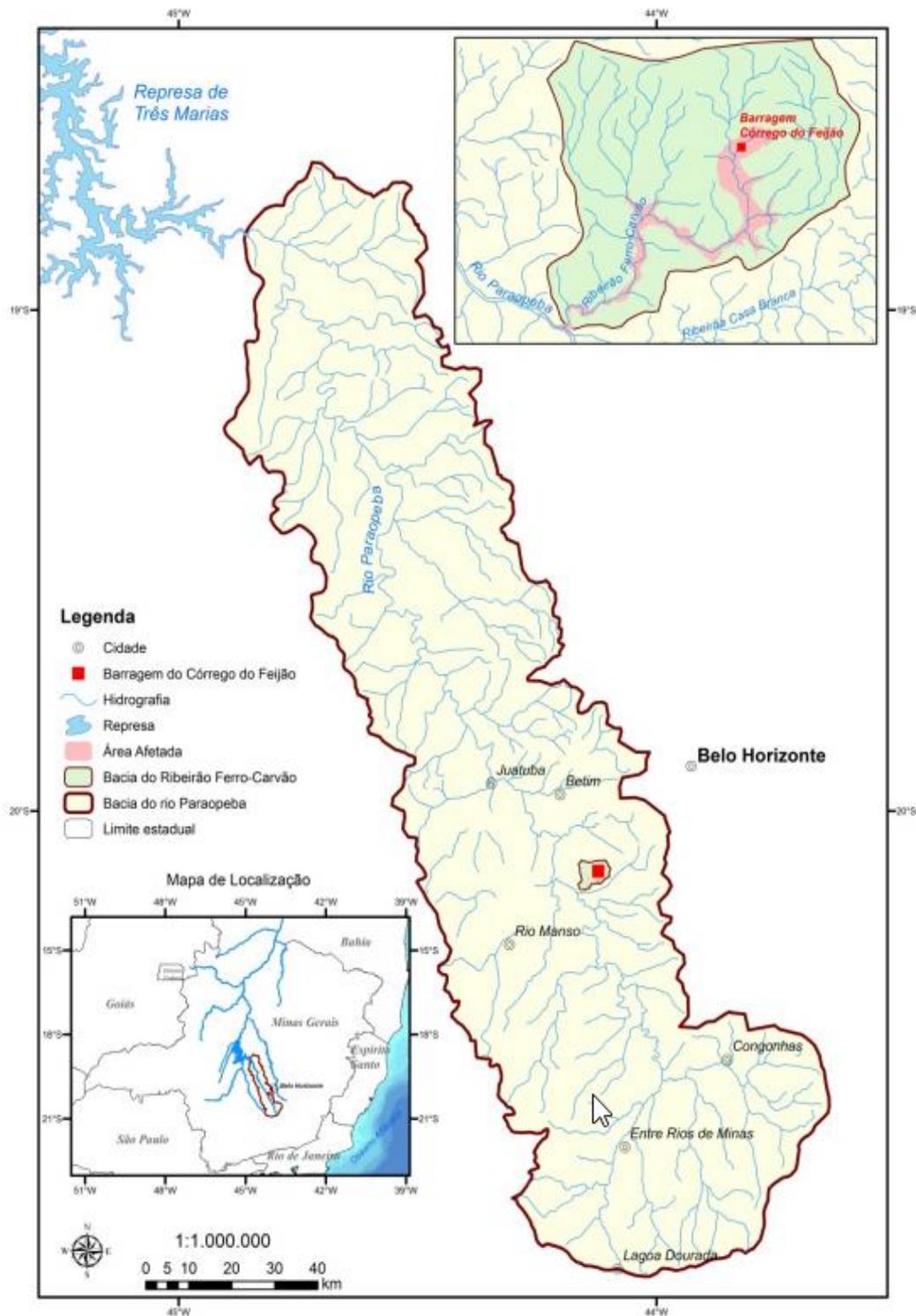
Com essa ideia em mente a área da bacia do Paraopeba possui de acordo com o IGAM (Instituto Mineiro de Gestão de Águas) uma área total de 12.054,25 km², sendo que a montante do Ribeirão Ferro Carvão possui uma área de drenagem de 4000 km² cortando um total de 48 municípios e com uma população que de acordo com o censo de 2010 do IBGE de 1.318.885 milhões de habitantes. Não obstante a isso a bacia do Paraopeba faz parte também da bacia do

Rio São Francisco, sendo este último um dos rios com maior importância dentro do território Brasileiro. (IBGE, 2010)

Em termos de biomas inseridos dentro do contexto da bacia do Paraopeba temos a transição entre o cerrado e mata atlântica (CIBAPAR, 2008), e para, além disso, possui diversas áreas de conservação inseridas também dentro do contexto dessa bacia.

E em termos de importância social e econômica, de acordo com o Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraopeba, destaca-se a grande utilização da bacia no abastecimento de água, sendo essa responsável pelo abastecimento de 53% da população da região metropolitana de Belo Horizonte. Além disso, também possui diversas atividades econômicas relacionadas diretamente com a utilização de água, destacando-se as atividades mineradoras, siderúrgicas e petroquímicas.

Figura 5: Bacia Hidrográfica do Paraopeba



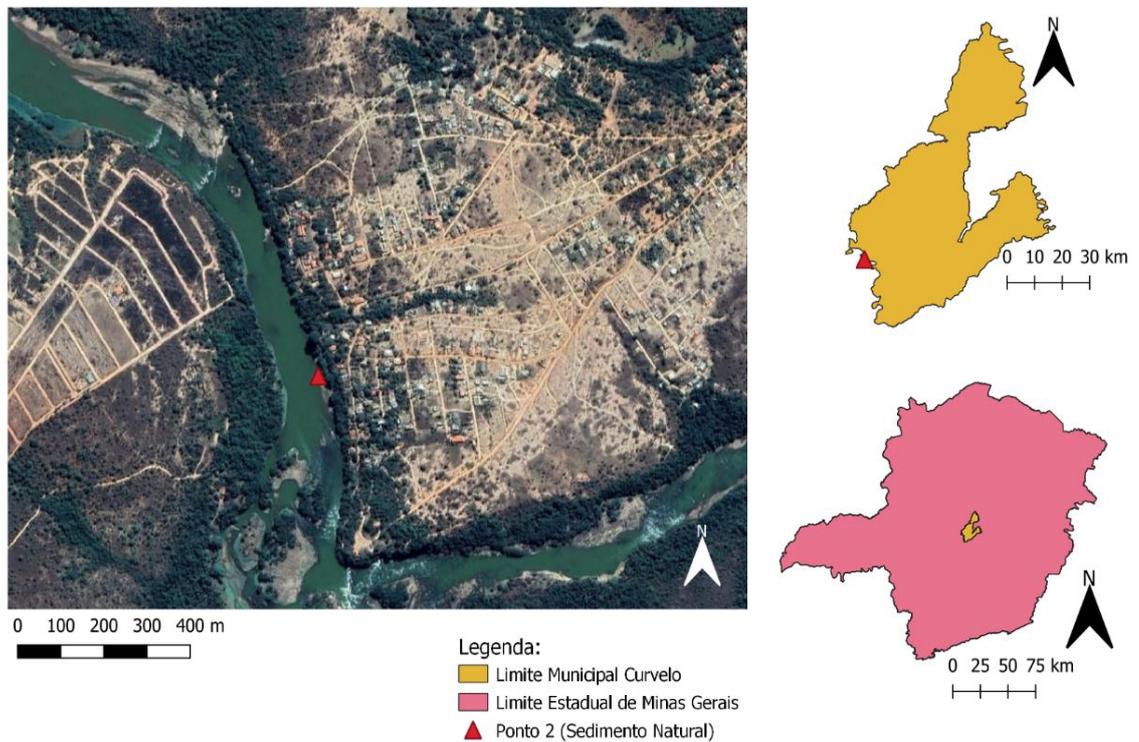
Fonte: CPRM, serviço geológico Brasileiro

4 METODOLOGIA

Para realização deste estudo, foram selecionados pontos de coleta amostral, que permitissem uma imagem bastante abrangente do cenário relacionado à deposição dos rejeitos e do corredor hídrico afetado. As amostras de sedimento natural foram retiradas no município de Curvelo-MG, em um trecho do Rio Paraopeba, como podemos ver na Figura 6.

Figura 6 - Mapa do Ponto de Coleta da Amostra de Sedimento Natural

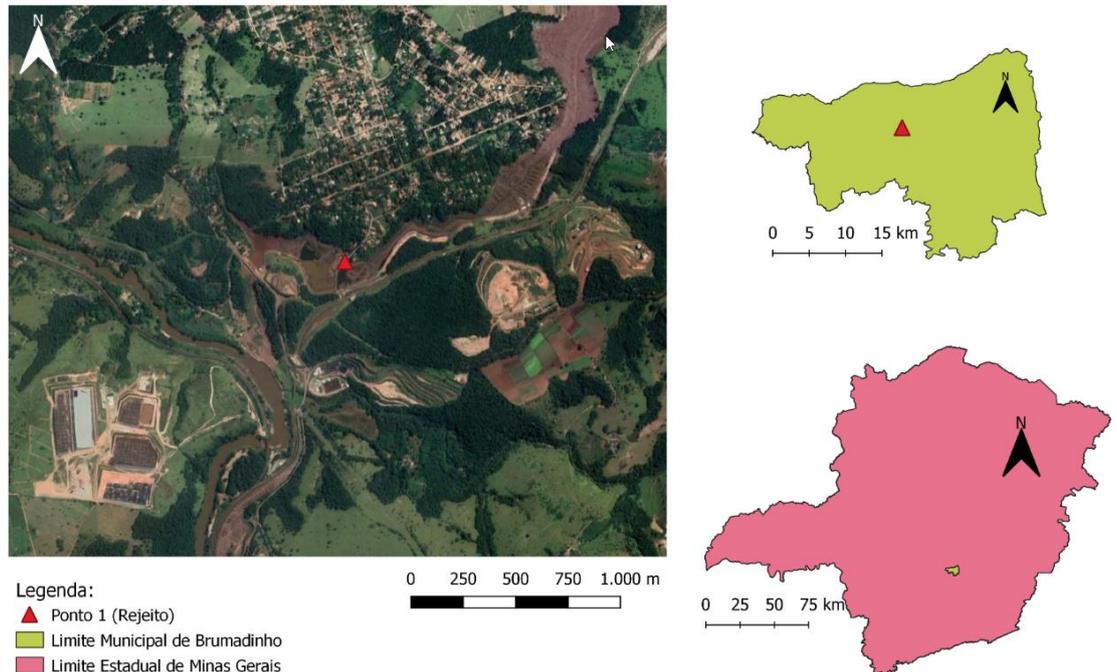
Mapa de localização do local de coleta de amostras de Sedimento natural



Fonte: Rima do Licenciamento Ambiental Corretivo - Obras Emergenciais

Já as amostras de rejeito foram coletadas do local diretamente afetado pelo rompimento da barragem, na localidade do Parque da Cachoeira, no Município de Brumadinho - MG (Figura 7). Esse ponto de coleta se deve ao fato de estar localizado na zona diretamente afetada pelo rompimento e que, por isso, é um local onde as novas interações entre rejeito e água vão ocorrer.

Figura 7- Mapa do Ponto de Coleta da Amostra de Rejeito

Mapa de localização do local de coleta de amostras de rejeito

Ativar

Fonte: Rima do Licenciamento Ambiental Corretivo - Obras Emergenciais

Para coleta das amostras, foi utilizado material recolhido por meio de gradagem das margens do Ribeirão Ferro- Carvão, pela força tarefa “Minas de Lama”, que esteve no local poucos dias após o rompimento da barragem, entre os dias 04 e 06 de fevereiro de 2019. A escolha dos tipos de amostras foi feita a fim de se obter comparações entre elas.

Em relação às amostras de sedimento natural, são amostras do sedimento que naturalmente é depositado nas margens do curso d’água, que foram recolhidas superficialmente em uma profundidade de 0 a 10 cm. No que tange as amostras de rejeito, estas também foram coletadas superficialmente na mesma profundidade que as amostras de sedimento natural. Ambas as amostras foram armazenadas em sacos plásticos após a coleta e não sofreram nenhum tipo de preparo especial.

Para realização dos ensaios laboratoriais, as amostras foram secas à temperatura ambiente, destorroadas e passadas por uma peneira de 2mm de espessura para realização de Terra Fina Seca ao Ar, de acordo com metodologia semelhante utilizada no trabalho de (Oliveira *et al.* 2019).

Para obtenção da solução a ser utilizada na medição dos parâmetros analisados, optou-se por realizar um ensaio de lixiviação das amostras. Esse procedimento, de acordo com a

norma 10005 de 2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), é utilizado para que certas substâncias químicas sejam extraídas do meio sólido e passem para um meio extrator através do processo de dissolução. Neste caso, o meio extrator é a água destilada (H₂O).

Para realização dos ensaios de lixiviação, foi utilizada uma coluna de lixiviação, adaptada do procedimento metodológico descrito por Santos (2012) e também utilizadas em ensaios semelhantes ao caso dos rejeitos depositados devido ao rompimento da barragem de Fundão em Mariana-MG (OLIVEIRA *et al.* 2019). No caso específico deste trabalho, foi utilizada uma coluna de plástico com dimensões de 14,5cm de comprimento por 4,5 cm de diâmetro (Figura 8). Foram adicionados, então, 200g de amostra no tubo e 50 ml de água destilada para cada 100g de amostra, ou seja, foram utilizados 100 ml de água para cada um dos ensaios, totalizando 300 ml para cada uma das amostras.

A seguir foi realizado o gotejamento sobre a amostra no tubo através de um equipo de água destilada. O líquido lixiviado foi acondicionado em recipientes de vidro devidamente ambientados, identificados e acondicionados em local refrigerado para posterior análise. O ensaio foi repetido a cada 24 horas, durante 6 dias consecutivos, entre os dias 19 e 24 de junho de 2019.

É importante destacar que, segundo a bibliografia seguida, o ensaio deveria ter sido realizado em um tubo de PVC com cerca de 30 cm de comprimento e 100mm de diâmetro, porém, como a carga amostral era reduzida, optou-se por reduzir o tamanho do tubo, para que o tamanho da coluna de amostra criada no tubo fosse maior e permitisse, assim, que a água tivesse um tempo adequado de contato com o material. Essa adequação não traz nenhum prejuízo metodológico, visto que houve uma redução do volume de amostra utilizado, em comparação à metodologia original, e, além disso, a espessura da coluna formada pelas amostras não ficou desproporcional.

Foram então realizados ensaios relativos à turbidez do extrato lixiviado por meio de um turbidímetro digital (modelo TU 430), da empresa AKSO, que foi calibrado com soluções padrão de 0, 20, 100 e 800 NTU.

Figura 8 - Sistema Utilizado nos Ensaio de Lixiviação



Fonte: Produção Própria

Para mensuração dos parâmetros de condutividade elétrica, foi utilizado um condutivímetro microprocessado portátil (modelo mCA 150P), da empresa MS Tecnopon, calibrado com solução padrão de 146,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esse parâmetro é de grande relevância, uma vez que a condutividade elétrica está diretamente relacionada à carga iônica que foi incorporada pela solução (FEITOSA *et al.*, 2008). Ou seja, a condutividade elétrica está diretamente ligada à carga iônica incorporada à solução, uma vez que a corrente elétrica precisa desses íons para poder percorrer seu caminho de forma mais rápida e efetiva. Nesse sentido, quanto maior é a condutividade elétrica de uma substância, mais facilmente uma carga elétrica a percorre. Além disso, carga iônica é liberada por meio de processos de dissolução química e hidrólise dos minerais existentes nas amostras. Esses íons liberados possuem relevância técnica para este trabalho, pois, apesar de não mensurarmos qualitativamente quais são esses íons, através dos valores de condutibilidade, podemos ter um vislumbre quantitativo dos mesmos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para um melhor entendimento dos resultados, é necessário entendermos sobre as diferenças entre sedimento natural e rejeito. Para tal, é importante esclarecermos que o ser humano é quem produz o rejeito, por meio de processos industriais ligados à mineração. Portanto, podemos dizer que o rejeito é um produto antropogênico, que possui características que não iriam ocorrer naturalmente. Fisicamente, o rejeito apresenta uma coloração bastante escura e um cheiro bastante característico; quimicamente, de acordo com o Relatório de Impacto Ambiental apresentado pela Vale S.A após o rompimento da barragem, apresenta predominância de Ferro (Fe), Alumínio (Al) e Silício (Si) em sua composição química, podendo também ser encontrados outros elementos químicos como Fósforo (P) Manganês (Mn) Titânio (Ti) Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) , porém em quantidades muito pequenas. (Gomes, 2009), porém em quantidades muito pequenas.

Já o sedimento natural é formado naturalmente, por meio da deposição contínua, nas margens de um curso d'água, de partículas soltas que são oriundas dos processos de erosão das margens do curso hídrico. Esse material possui características químicas e físicas bastante diferentes, dependendo do seu local de origem e das dinâmicas hídricas envolvidas, podendo ser mais fino ou mais grosso, com mais ou menos matéria orgânica e com coloração e cheiro também diferentes. São materiais que, em geral, são encontrados em maior quantidade no médio e baixo curso dos rios, devido à menor velocidade da água nesses trechos (CHRISTOFOLETTI, 1974).

A mensuração da condutividade elétrica se deu entre os dias 19 e 21 de junho de 2019 e, para as amostras de sedimento natural, no dia 23 de outubro de 2019, enquanto as mensurações de turbidez foram realizadas em sua totalidade no dia 23 de outubro de 2019. Para melhor expor os dados obtidos, estes dados foram tabulados e podem ser observados na Tabela 1, sendo também expressados de forma gráfica, como podemos ver nas Figuras 9 e 10. Foram também medidas as temperaturas das soluções lixiviadas, para que não houvesse discrepância nas temperaturas médias das amostras.

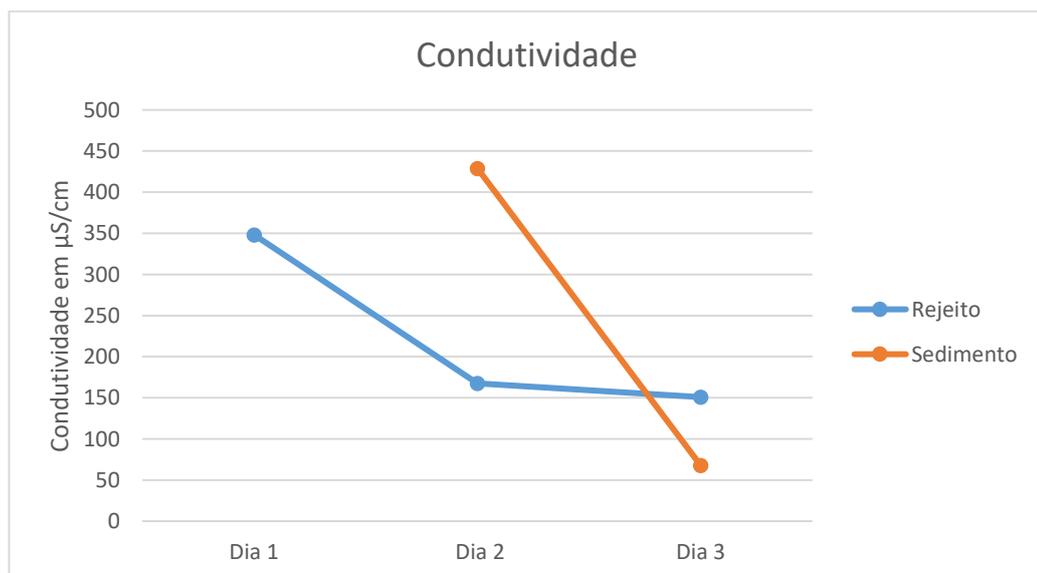
Tabela 1 - Resultados das mensurações de condutividade elétrica, turbidez e temperatura da solução lixiviada

Data	Condutividade	Turbidez	Temperatura da Solução
Rejeito:			
19/jun	348,2 $\mu\text{S/cm}$	22,4 NTU	23,2° C
20/jun	167,7 $\mu\text{S/cm}$	0 NTU	23,1° C
21/jun	150,8 $\mu\text{S/cm}$	0 NTU	23,2° C
Sedimento Natural:			
22/jun	-	-	-
23/jun	428.9 $\mu\text{S/cm}$	0 NTU	23,1° C
24/jun	67.6 $\mu\text{S/cm}$	0 NTU	23,3° C

Fonte: Produção Própria

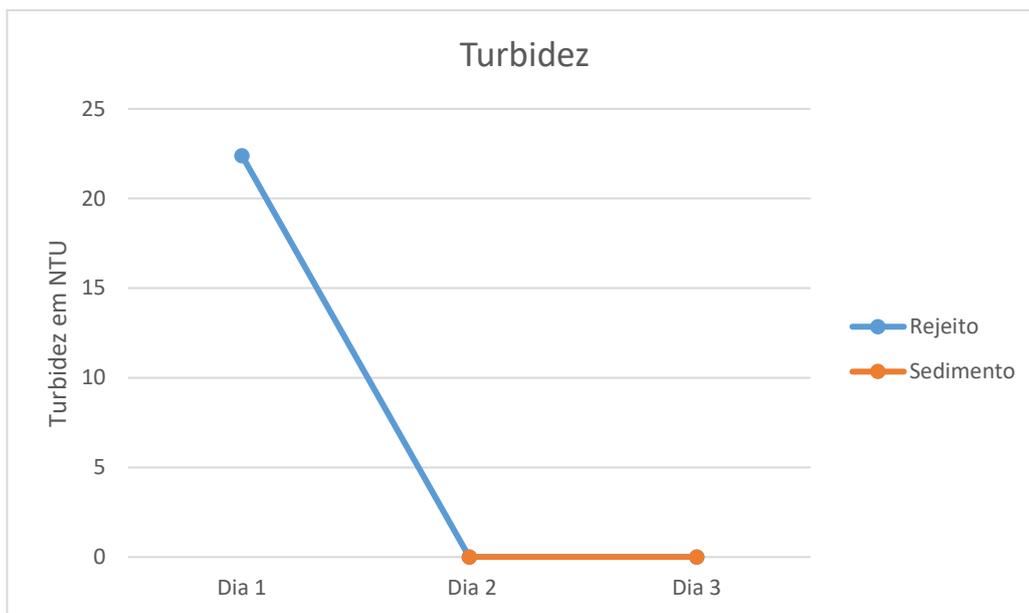
Obs: As células que possuem o símbolo "-" representam a não ocorrência de extrato lixiviado.

Figura 9 - Gráfica de Condutividade Elétrica das Amostras de Extrato Lixiviado



Fonte: Produção Própria

Figura 10 - Gráfico de Turbidez das Amostras de Extrato Lixiviado



Fonte: Produção Própria

Os resultados de condutividade encontrados estão de acordo com o esperado, uma vez que são comparados com ensaios semelhantes realizados anteriormente ao caso do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana (OLIVEIRA *et al.*2019).

Em relação aos resultados obtidos e detalhados na Tabela 1 e nas Figuras 9 e 10, podemos observar que as amostras de solução lixiviada, advindas do ensaio realizado com o rejeito, mostraram, com relação a turbidez, que houve um pico relativo à carga suspensa na primeira amostra, porém, após a mesma, os particulados presentes na coluna de lixiviação, muito provavelmente, ou foram transportados em suspensão juntamente com o a solução lixiviada, no caso dos particulados mais finos, ou ficaram retidos no filtro, no caso dos particulados de maior tamanho, o que pode ser demonstrado ao vermos a queda para 0 nos valores apresentados nas amostras dos dias 2 e 3. Entretanto, é importante ressaltar que esse parâmetro em ambientes reais, provavelmente, não apresentaria esse mesmo comportamento, pois para o experimento foi utilizado um filtro que reteve uma parte dos particulados; já em um ambiente natural, esses particulados continuariam a ser levados para o curso d'água de forma constante e, talvez, até mais intensa devido à ação de outros fatores que não estão presentes em um ambiente controlado.

Já as amostras de origem do ensaio realizado com o sedimento natural, com relação à turbidez, não apresentaram essa característica, como podemos ver no Gráfico 2, muito

provavelmente em decorrência do material ser extremamente arenoso e extremamente poroso e que, além disso, provavelmente apresenta particulados de tamanho superior àqueles que seriam capazes transpassar o filtro.

Com relação à condutividade, as amostras de rejeito apresentaram um resultado bastante relevante ao pensarmos em descarga química e seus efeitos com o passar do tempo, uma vez que esse parâmetro apresentou uma possível tendência à estabilização em valores mais elevados, como pode ser observado no Gráfico 1, em que o resultado obtido inicialmente decai pela metade no dia 2 e, em seguida, apresenta uma mudança tímida.

Os resultados de condutividade das amostras oriundas do sedimento natural mostraram uma queda muito acentuada em relação aos valores obtidos entre os dias 2 e 3. Isso se deve, muito provavelmente, à natureza das amostras, que, como já dito anteriormente, é muito porosa e com isso não permite que a água reaja por muito tempo com o material.

Nesse sentido, vemos que os maiores valores encontrados para condutividade ocorreram ao analisarmos o extrato lixiviado referente à primeira coleta (19 de junho e 23 de junho, respectivamente), e apresentaram o valor de 348,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para as amostras de rejeito e 428,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para as amostras de sedimento. É importante ressaltar nesse ponto que o ensaio realizado no dia 22 de junho, referente a amostras de sedimento natural, não resultou em extrato lixiviado. Podemos atribuir a isso algumas hipóteses, como a amostra apresentar uma capacidade de absorção e retenção de água bem maior que a do rejeito, ou seja, possui uma maior capacidade de permeabilidade, muito provavelmente devido à natureza desse material. Além disso, o fato de estar seca, assim como no caso das amostras de rejeito que tiveram uma quantidade mínima de extrato derivado do primeiro ensaio, corroborou para que a coluna não expulsasse nenhum extrato, ficando assim toda a água que foi embutida através do gotejamento retida no sistema, que ficou reagindo neste por 48h, o que fez com que o valor da condutividade encontrada no extrato do dia 2 fosse tão elevado.

Corroborar essa teoria a hipótese levantada no trabalho de (OLIVEIRA *et al.* 2019), em que o grau de saturação do meio também influencia na velocidade de percolação da água, pois o sistema, nesse primeiro momento, não possuía os poros preenchidos por completo.

Outro fato interessante que pôde ser observado durante os ensaios não foi em relação aos resultados em si, mas em como a água se comportou no sistema, uma vez que ela apresentou um comportamento semelhante tanto no rejeito quanto no sedimento natural, pois em ambos a água ficou na coluna por mais tempo durante o 1º dia, demorando mais para passar por todo o

tubo e chegar ao fim. Esse fato apresenta relevância, pois ao pensarmos na relação tempo x reação, que provavelmente é uma relação proporcional, ou seja, quanto mais tempo a água fica em contato com o material, maior será a sua capacidade de retirar íons do mesmo, fazendo com que a solução lixiviada, que ficou mais tempo reagindo, apresente um maior valor de condutividade

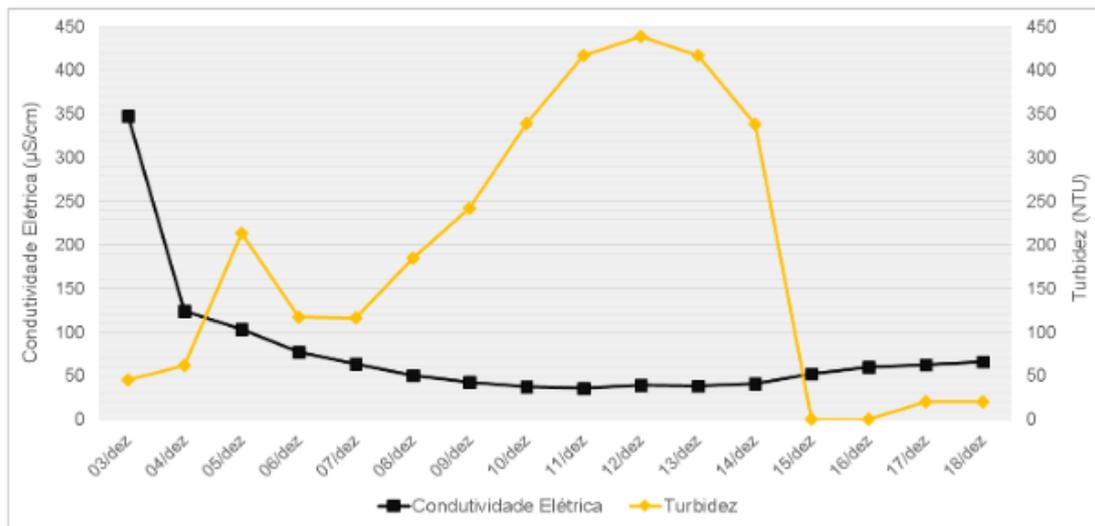
Ainda no contexto da condutividade, observamos um maior resultado inicial nas amostras de sedimento natural, devido ao fato principal de que, por ter retido toda a água que foi adicionada no sistema no primeiro dia de ensaio e não ter liberado extrato, ela teve um tempo mais elevado para reagir com a amostra, liberando, assim, uma quantidade maior de íons no sistema. Com a passagem da segunda quantidade de água, advinda do segundo dia de ensaio, os íons foram carregados para fora do sistema, esse fato pode ser corroborado ainda pela diferença extremamente grande entre a segunda e a terceira análise, uma vez que, por ter tido um tempo maior de reação entre água e amostra, os íons liberados na terceira análise foram bastante diminutos.

O fato de os valores de rejeitos terem caído de forma menos vertiginosa que os valores do sedimento natural apontam para uma situação intrigante e ao mesmo tempo preocupante, pois significa que, ao longo do tempo, o rejeito depositado nas margens dos cursos d'água tem o potencial de liberar para o sistema hídrico uma quantidade muito grande de íons, o que em termos práticos se traduz em uma alteração da geoquímica da água em longo e médio prazo. Porém é importante ressaltarmos que as alterações em curto prazo não devem ser desprezadas, muito pelo contrário, uma vez que em termos práticos, os íons de elementos mais facilmente lixiviados serão descarregados nos recursos hídricos de maneira relativamente mais rápida que os de elementos com menor potencial de lixiviação, o que pode levar a um grande pico de alteração química em curto prazo, mas que em um período de médio e longo prazo deve se estabilizar, embora ainda acima dos níveis anteriores ao rompimento, o que pode gerar um desequilíbrio em sistemas subsequentes.

Ao compararmos com ensaios realizados no contexto do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana - MG, que foram estudados por (OLIVEIRA *et al.* 2019), podemos observar uma semelhança nos valores relacionados ao parâmetro da condutividade do rejeito oriundo do rompimento da barragem 1, explicitado no gráfico 3. Essa semelhança corrobora a teoria de que o rejeito de mineração acumulado na margem está causando alterações químicas na água e que é preciso investigar mais afundo tais alterações, para que se possam mensurar melhor os impactos.

Com relação aos dados de turbidez do rejeito, observamos uma grande discrepância em relação aos dados obtidos no estudo de (OLIVEIRA *et al.*2019), como podemos também observar na Figura 11. Essa divergência talvez possa ser explicada pelo fato de as amostras que foram utilizadas no estudo, relacionado ao rompimento da barragem de Fundão, terem sido retiradas do local aproximadamente 3 anos após a deposição do material, enquanto o material utilizado neste trabalho foi retirado poucos dias após a sua deposição. Essa diferença temporal pode explicar a diferença nos resultados, uma vez que as amostras foram submetidas a maiores ou menores índices de alterações oriundas de processos químicos e físicos, fazendo com que acumulassem maiores ou menores taxas de sedimentos finos que, durante o ensaio, poderiam atravessar o filtro.

Figura 11 - Grafico de Dados de Condutividade e Turbidez Oriundos de Rompimento da Barragem de Fundão



Fonte: OLIVEIRA *et al.* 2019

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Colocando termos práticos, ao final deste estudo, foi possível concluir que há uma possível alteração sistêmica no corredor hídrico afetado pelo rompimento da Barragem 1, da Mina Córrego de Feijão, com maior intensidade nos locais adjacentes aos locais de deposição do material oriundo da barragem. Essa alteração provavelmente se dá dentro do sistema hídrico, por meio da alteração morfológica de cursos d'água e da alteração geoquímica da água em si. Além disso, apesar de não ser objeto direto de estudo deste trabalho, mas por estar relacionado ao mesmo, também podem estar ocorrendo alterações no sistema biótico, devido à modificação do ambiente e das dinâmicas tróficas. E, por último, devemos ressaltar a alteração no sistema socioeconômico, uma vez que houve um impacto emocional muito forte nas comunidades diretamente afetadas, o que pode gerar danos que não podemos mensurar. Os danos econômicos também podem ser significativos, tendo em vista que o rompimento causou um grande impacto nas atividades econômicas locais, além de ter gerado um corte nas receitas advindas das atividades mineradoras locais.

É importante salientar que a alteração da paisagem que está diretamente ligada ao sistema morfológico foi de grande magnitude e requererá grandes intervenções para ser restaurada.

Em relação ao objeto foco deste estudo, que são as alterações geoquímicas da água e suas possíveis consequências, podemos concluir com os dados que está ocorrendo uma descarga química considerável na água, que através de cálculos podemos definir que seja algo em torno de 25% a mais de descarga química, a qual pode acarretar em danos futuros, tanto para o meio ambiente quanto para as pessoas que se utilizam dos recursos hídricos afetados. Tais danos necessitam de um estudo próprio, porém, ao comparamos com o desastre de Mariana, no qual já existem estudos técnicos do Ministério da Saúde indicando um aumento no número de certas doenças após o rompimento, é possível que possamos esperar o mesmo resultado com relação a Brumadinho, com o agravante do rompimento ter afetado diretamente uma parte de uma grande região metropolitana (Região Metropolitana de Belo Horizonte).

Um outro ponto a ser destacado é a questão de como serão feitas as ações para reparar o dano já causado. É importante que a dinâmica química e física da água, junto ao rejeito, seja bem esclarecida para que possam ser planejadas ações de reparação e recuperação da paisagem de forma eficiente e que traga resultados de longo prazo.

Por fim, foi possível concluir que existe a necessidade de mais estudos relacionados à deposição desses rejeitos, de forma que seja possível entender melhor quais são os íons que estão sendo lançados no sistema hídrico e como eles realmente podem afetar os sistemas envolvidos.

Este trabalho teve como objetivo mostrar dados e análises superficiais no que tange à relação dos rejeitos oriundos da barragem 1 da Mina Córrego do Feijão com o hidrosistema, além de procurar vislumbrar um pouco dos possíveis impactos que essa relação pode causar aos mais diversos sistemas atingidos.

No que toca o rompimento da barragem em si, nunca é demais lembrar que o acontecimento em Brumadinho não foi por acaso, e não foi um acidente e sim um crime ambiental, social e cultural no qual as vidas de mais de 250 pessoas foram ceifadas.

Não nos cabe julgar quais foram as causas desse crime, ou quem são os reais responsáveis. Cabe a nós, como acadêmicos e pesquisadores, buscar entender os fatos que antecederam tal evento, bem como suas consequências tanto para o meio ambiente quanto para a sociedade e a economia.

Cabe também a nós como povo, pessoas e cidadãos cobrar os órgãos competentes para que as causas sejam apuradas de forma mais correta possível, e que os responsáveis sejam julgados e punidos na forma da lei, e que medidas sejam adotadas para que no futuro não estejamos mais uma vez parados em frente à uma TV atordoados com o rompimento de mais uma barragem de rejeitos de mineração.

7 SUGESTÕES DE NOVOS TRABALHOS

Para que se possa aprimorar o entendimento das causas e das consequências do desastre do rompimento da Barragem 1 em Brumadinho, é preciso que se desenvolvam novos trabalhos sobre o tema, nesse sentido e pensando no aprendizado decorrente deste trabalho sugiro que se realizem novos trabalhos, que abordem quais são os reais impactos na saúde das pessoas decorrentes do uso direto ou indireto da água proveniente de corpos hídricos afetados, além também dos impactos psicológicos e culturais nas comunidades afetadas.

No que tange o meio ambiente, sugiro que sejam realizados estudos para o melhor entendimento dos impactos do rompimento na cadeia trófica, bem como uma investigação mais aprofundada nas águas do Rio Paraopeba e São Francisco, buscando a existência ou não de alterações geoquímicas da água desses dois rios decorrentes do rompimento da Barragem 1

Por fim é importante também que as teorias levantadas neste trabalho sejam aprofundadas buscando entender quais as reais dimensões das alterações geoquímicas apresentadas podem chegar

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATKINS, P. W. *et al.* **Princípios de química**: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 7. ed. rev. Porto Alegre: Bookman Companhia, 1999.

BALTAZAR, O.F. *et al.*, **Mapa Geológico** na Escala 1: 50.000 com Nota Explicativa. In: Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa. Belo Horizonte: CODEMIG, 2005.

BIOMAS e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250 000. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)**, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/biomias/>. Acesso em: 09 jul. de 2020.

BRANDÃO, M. et al. Contribuição para o conhecimento da Cadeia do Espinhaço em Minas Gerais (Serra de Itabirito). III. **Daphne**, v.1. n.3, p.39-41, 1991.

BRASIL, Resolução CONAMA nº1, de 23 de janeiro de 1986. Diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. Publicado no D.O.U, de 17 de fevereiro de 1986.

BRUMADINHO: estudo de ONG afirma que lama de barragem já chegou ao Rio São Francisco. **G1**, Belo Horizonte, 22 de mar. de 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minasgerais/noticia/2019/03/22/brumadinho-estudo-do-ong-afirma-que-lama-de-barragem-ja-chegou-ao-rio-sao-francisco.ghtml>. Acesso em: 21/11/2019.

CARVALHO, I. G. Fundamentos da geoquímica dos processos exógenos. Salvador: Bureau Gráfica e Editora Ltda, 1995.

CONJUNTURA dos Recursos Hídricos. **Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)**, Brasília, 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3oPLoUB>. Acesso em: 04 jul. de 2020.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Ed. Universidade, 1974.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Monitoramento Especial da Bacia do Rio Paraopeba. **Relatório01**: Monitoramento Hidrológico e Sedimentométrico. Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3ejDVbk>. Acesso em: 09 jul. 2020

DINIZ, Juliana Maria Ferreira de Souza; et al . Detecção da expansão da área minerada no quadrilátero ferrífero, minas gerais, no período de 1985 a 2011, através de técnicas de sensoriamento remoto. **Bol. Ciênc. Geod.**, Curitiba , v. 20, n. 3, p. 683-700, Set. 2014.

FEAM. Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 49p. Disponível em: Acesso em: 09 de julho de 2020.

FEITOSA, F. A. C. *et al* (Coord). **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. 2ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000.

FERNANDES FELIPPE, M. *et al.* A Tragédia Do Rio Doce: A Lama, O Povo e a Água. Relatório de Campo e Interpretações Preliminares Sobre as Consequências do Rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão (Samarco/Vale/Bhp). **Revista Geografias**, [S. l.], p. 63-94, 2016. Disponível em: <https://bit.ly/36cw7Vx>. Acesso em: 12/5/2020

FREITAS, Carlos Machado de; et al . Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e Saúde Coletiva. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 35, n. 5, e00052519, 2019.

FERREIRA, Luísa Lima Borges et al. Considerações sobre perdas geoquímicas em nascentes e sistemas fluviais de cabeceiras de drenagem na borda oeste do Espinhaço Meridional (Minas Gerais). **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 5991-6002, 2017.

GARCIA, L. C. **Fenologia de espécies da canga em Barão de Cocais, Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre), 123f. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

GUEDES, Josiel de Alencar. Geoquímica e meio ambiente. **Journal Geotemas**, [s. l.], v. 2, ed. 1, 2012.

HIJAZIN, C. A. H. *et al.* Hidrólise ácida, alcalina e enzimática. **Revista Atitude** – Faculdade Dom Bosco de Porto Alegre, ano IV, n.7, p.89-93, 2010.

Instituto Nacional de Meteorologia. Inmet. Clima. Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/prec>. Acesso em: 09 de julho de 2020; IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Panorama do Município de Brumadinho. IBGE Cidades. Disponível em: . Acesso em: 09 de julho 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). BDIA - Banco de Dados de Informações Ambientais. **Imagens de Satélite do município de Brumadinho de dezembro de 2018 a janeiro de 2019**. [S. l.: s. n.], 2018. Mapa Interativo de Pedologia do Município de Brumadinho. Disponível em: <https://bit.ly/2JweVT5>. Acesso em: 9 jul. 2020.

JACOBI, C. M. *et al.* Diversidade dos campos rupestres ferruginosos no Quadrilátero Ferrífero, MG. **Megadiversidade**, v. 4, p. 9, 2008.

JACOBI, C. M. *et al.* Plant communities on ironstone outcrops-a diverse and endangered Brazilian ecosystem. **Biodiversity and Conservation**, v.16, p. 2185-2200, 2007.

KOBIYAMA, M *et al.* Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos. Curitiba: **Ed. Organic Trading**, 2006. 109p.: il., tabs. Inclui bibliografia ISBN – 85-87755-03-X. Disponível em: <https://bit.ly/2TSXyO1>. Acesso em: 27 ago. 2020.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LICHT, O. A. Boni . **A geoquímica multielementar na gestão ambiental**: identificação e caracterização de províncias geoquímicas naturais, alterações antrópicas da paisagem, áreas favoráveis à prospecção mineral e regiões de risco para a saúde no estado do Paraná, Brasil. Tese (doutorado) - UFP. Curitiba, 2001.

LIMA, Valmiqui Costa *et al.*, (ed.). **O solo no meio ambiente**: abordagem para professores de ensino fundamental e médio e alunos do ensino médio. 1. ed. Curitiba: [s. n.], 2007. 141 p. Disponível em: <https://bit.ly/3jULHd0>. Acesso em: 1 nov. 2020.

MAPA de solo. **Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM)**, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: Acesso em: <https://bit.ly/2TOtYJO>. 09 jul. de 2020.

MATTHESS, G. **The properties of groundwater**. New York: John Wiley & Sons, 1982.

MECHI, Andréa; SANCHES, Djalma Luiz. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. **Estud. av.** São Paulo, v. 24, n. 68, p. 209-220, 2010.

MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO E ORÇAMENTO SECRETARIA ESPECIAL DE POLÍTICAS REGIONAIS DEPARTAMENTO DE DEFESA CIVIL. **Glossário de defesa civil estudos de risco e medicina de desastres** por Antônio Luiz Coimbra de Castro. 2ª ed. Brasília: Revista e Ampliada Brasília, 1998.

MULHOLLAND, D. S. **Geoquímica Aplicada à avaliação da qualidade de sistemas aquáticos da Bacia do Rio Paracatu (MG)**. 95f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal de Brasília: Departamento de Geociências, Brasília, 2009.

OLIVEIRA, B. T. A. *et al.* **A dinâmica das interações entre águas meteóricas e os rejeitos da Barragem de Fundão, Mariana – MG**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 18. 2019, Fortaleza.

PEREIRA, Dulce Maria *et al.* **Brumadinho: muito mais do que um desastre tecnológico**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://bit.ly/34POD6x>. Acesso em: 1 nov. 2020.

PÉREZ, Daniel Vidal *et al.* Geoquímica de alguns solos brasileiros. [S. l.], 1997. Disponível em: <https://bit.ly/326scrO>. Acesso em: 31 out. 2020.

PRESS, F. *et al.* **Para Entender a Terra**. Tradução: MENEGAT, R. 4ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2006.

REBOITA, Michelle Simões *et al.* Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 25, n.2, 185 - 204, 2010.

SARDINHA, D. De S. *et al.* Geoquímica fluvial e balanço de denudação em Tinguaitos de Poços de Caldas, Minas Gerais. **Geologia USP: Série Científica**, 18(1).

Sistema Nacional de Informação Sobre Recursos Hídricos. Mapa Interativo: Corpos Hídricos Superficiais e Domínialidade, recorte Brumadinho, ANA. Disponível em: . Acesso em: 09 de julho de 2020;

SPARK, D. L. **Environmental soil chemistry**. 2 ed. São Diego/Londres: Academic Press, 2003.

SZIKSZAY, Maria. Geoquímica das águas. **Boletim IG - USP**, [s. l.], v. 5, 1993. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/bigsd/issue/view/386>. Acesso em: 1 nov. 2020.

TOLEDO, Maria Cristina Motta de. Intemperismo e pedogênese. **Geologia**, São Paulo, 2014.
VALE. **RIMA - Relatório de Impacto Ambiental Obras Emergenciais Decorrentes da Ruptura da Barragem da Mina Córrego do Feijão e Recuperação Ambiental de Sua Área de Influência**. Jan. de 2010.

VARAJAO, César Augusto Chicarino *et al.* Estudo da evolução da paisagem do quadrilátero ferrífero (Minas Gerais, Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão (10be) e da pedogênese. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1409-1425, Oct. 2009. Disponível em: <https://bit.ly/3kVN0ty>. Acesso em: 16/12/2019

VAREJÃO, C. A. C. *et al.* Estudo da evolução da paisagem do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão (10be) e da pedogênese. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1409-1425, 2009.

VINCENT, R. C. *et al.* Influence of soil properties on the abundance of plant species in ferruginous rocky soils vegetation, southeastern Brazil. **Revista Brasileira Botânica**, v.31, n.3, p. 377-388, jul-set. 2008.

VINCENT, R. C.; *et al.* Diversidade na adversidade. **Ciências Hoje**, v. 31, n. 185, p. 64-67. 2002.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1996.