

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
CAMPUS DE VIÇOSA  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**

**AMANDA CRISTINA FONSECA CARLOTA**

**ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO EM MARIANA-MG: UMA  
ANÁLISE DA RECUPERAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS TECNOSSOLOS**

**Viçosa - MG  
2018**

**AMANDA CRISTINA FONSECA CARLOTA**

**ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO EM MARIANA-MG: UMA  
ANÁLISE DA RECUPERAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS TECNOSSOLOS**

Monografia apresentada ao Departamento de Geografia da  
Universidade Federal de Viçosa como pré-requisito para  
obtenção do título de bacharel em Geografia.

Orientadora: M.Sc. Eliana Elizabet Santos.

Coorientador: Prof. Dr. André Luis Lopes de Faria.

**Viçosa - MG  
2018**

# **AMANDA CRISTINA FONSECA CARLOTA**

## **ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO EM MARIANA-MG: UMA ANÁLISE DA RECUPERAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS TECNOSSOLOS**

Monografia apresentada ao Departamento de Geografia da Universidade Federal de Viçosa como pré-requisito para obtenção do título de bacharel em Geografia.

VIÇOSA, 29 DE NOVEMBRO DE 2018

Banca Examinadora:

---

M.Sc Eliana Elizabet Santos  
(Orientadora)

---

Prof. Dr. André Luis Lopes de Faria  
(Coorientador)

---

Prof. Dr. Liovando Marciano da Costa  
Banca Examinadora

---

M.Sc. Luiz Aníbal da Silva Filho  
Banca Examinadora

DEDICO:  
*Aos meus avós José Antônio e Angelina  
pelo entusiasmo,  
por me apoiar e me incentivar sempre.  
À minha mãe Maria Neusa.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus avós, José Antônio e Angelina, por todo carinho, conforto emocional e por serem meus incentivadores principais desta conquista.

À minha mãe, Neusa, pelas orações e por sempre estar ao meu lado em todos os momentos.

À minha orientadora, Eliana Elizabet, pelo apoio fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço profundamente a confiança e a orientação.

Ao meu coorientador, Prof. André Luis Lopes de Faria, pelo conhecimento passado ao longo do curso, pela atenção e disponibilidade quando necessitei.

Ao Professor Liovando, pelos conselhos, pela disponibilidade, pelas conversas, pela amizade, o apoio e discussão de pontos fundamentais deste trabalho. Sua capacidade, criatividade e otimismo me ajudaram a acrescentar mais conhecimentos, aos já adquiridos, na área de solos. Além de meu professor, é um exemplo a ser seguido.

Secretários: Fábio, Patrícia e Gilmar, por serem sempre atenciosos e disponíveis a ajudar.

À todos os professores da Geografia.

Ao Claudinho do Laboratório de Física do Solo, pela ajuda.

Aos meus amigos do Laboratório de Geomorfologia, Humberto, Saulo, Mara, Vitor e Luiz Felipe pela boa convivência e por deixar os dias mais alegres.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

*“Alguns homens vêem as coisas como são, e dizem ‘Por quê?’ Eu sonho com as coisas que nunca foram e digo ‘Por que não?’”*

*(George Bernard Shaw)*

## **RESUMO**

O presente estudo teve por objetivo analisar as condições físicas e químicas dos Tecossolos formados nas margens dos rios do Carmo, Gualaxo do Norte e Doce pela deposição de rejeitos de mineração de ferro, oriundos do rompimento da Barragem de Fundão, localizada no município de Mariana, Minas Gerais. Foram analisados os atributos físicos, granulometria, densidade do solo e densidade de partículas e químicos, macro e micro nutrientes e metais pesados. A avaliação da atividade biológica e ambiente edáfico também foram observados em campo. As coletas foram realizadas em seis pontos, sendo a primeira no dia 10 de março 2016 (4 meses após o rompimento da barragem) e a segunda no dia 12 de setembro 2018, quase três anos após o desastre, com o intuito da comparação do ganho/perda de nutrientes, matéria orgânica, atividade biológica e atributos físicos dos Tecossolos. Foi constatado que os Tecossolos formados pela deposição de rejeitos nas margens desses rios possuem limitações químicas e físicas para fins agronômicos. Através das análises em laboratório foi constatada a presença de adição de bases, provavelmente devido a fertilização da área. Através do contato visual foi observada a atividade biológica (presença de plantas e raízes) em alguns pontos, pela recolonização ou por processos de recuperação que foram feitos na área em estudo. Foi observado uma alta compactação do material, a alta densidade de partículas bem como presença de metal pesado mesmo em baixas concentrações.

**Palavras-chave:** Rejeito de minério de ferro; áreas degradadas; atributos químicos; atributos físicos; ambiente edáfico.

## **ABSTRACT**

The objective of this study was to analyse the physical and chemical properties of the iron ore tailings deposited on the bottomlands of the Rio do Carmo, Gualaxo do Norte and Doce. The deposition of iron ore tailings, originating from the rupture of the Fundão Dam, located in the municipality of Mariana, Minas Gerais. The physical attributes, for example. Particle density, granulometry macro and micro nutrients, and heavy metals were analyzed. The evaluation of biological and environmental activity was also observed in the field. The collections were sustained in six points, the first being on March 10, 2016 (4 months after the dam disruption) and the second on September 12, 2018, just three years after the disaster, in order to compare the gain / loss of nutrients, biological material, biological activity and the physical resources of the Technosols. It consisted of the technosols formed by the deposition on bottomlands of the cited rivers the chemical and physical of the are not good for particles agronomic purposes. Behind the countercurrent analyzes was found a presence of bases addition, due to a fertilization of the area. Through the visual was an activity of biological recovery in some points, by recolonization or recovery processes that were done in the area under study. It was observed high compaction of the material, due to high density of minerals found in the ore tailings, such as the presence of heavy metals in the low concentrations.

**Keywords:** Rejected iron ore; degraded areas; chemical attributes; physical attributes; edaphic environment.

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Localização geográfica dos pontos amostrais.....	18
<b>Tabela 2.</b> Resultados das análises químicas da primeira coleta (T0) dos Tecnosolos.....	27
<b>Tabela 3.</b> Resultados das análises químicas da segunda coleta (T1) dos Tecnosolos .....	28
<b>Tabela 4.</b> Análise granulométrica da primeira e segunda coleta dos Tecnosolos.....	30
<b>Tabela 5.</b> Densidade de partícula e densidade do solo da primeira e segunda coleta.....	30
<b>Tabela 6.</b> Classificação Química e Agronômica .....	31
<b>Tabela 7.</b> Tabela dos solos de referência.....	32
<b>Tabela 8.</b> Avaliação do coeficiente de variação (CV%) e do desvio padrão (S) das amostras de rejeito.....	34
<b>Tabela 9.</b> Classificação das variáveis químicas da primeira coleta dos Tecnosolos.....	40
<b>Tabela 10.</b> Classificação das variáveis químicas da segunda coleta .....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de localização do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: IBGE, ANA, (2010) .....	5
<b>Figura 2.</b> Mapa de localização das estruturas geológicas do QF. Fonte: IBGE, (2010) .....	7
<b>Figura 3.</b> Complexo “Alegria” antes do rompimento da barragem Fundão.....	11
<b>Figura 4.</b> Efeitos locais do rompimento da barragem. ....	12
<b>Figura 5.</b> Mapa de localização da área de estudo.....	15
<b>Figura 6.</b> Localização dos pontos de coleta das amostras de rejeito. ....	17
<b>Figura 7.</b> Ponto de coleta 35.....	21
<b>Figura 8.</b> Ponto de coleta 45.....	22
<b>Figura 9.</b> Ponto de coleta 22.....	23
<b>Figura 10.</b> Ponto de coleta 16.....	24
<b>Figura 11.</b> Ponto de coleta 13.....	25
<b>Figura 12.</b> Ponto de coleta 05.....	26
<b>Figura 13.</b> Proporção das formas de Al em função do pH. ....	35
<b>Figura 14.</b> Disponibilidade de nutrientes em função do pH do solo. ....	37

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>2</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1 Gerais</b> .....	<b>3</b>
<b>2.2 Específicos</b> .....	<b>3</b>
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
<b>3.1 Mineração em Minas Gerais e a representatividade do Quadrilátero Ferrífero</b> .....	<b>4</b>
<b>3.2 Geologia do Quadrilátero Ferrífero</b> .....	<b>5</b>
<b>3.3 Solos do Quadrilátero Ferrífero</b> .....	<b>7</b>
<b>3.4 A socioeconomia do Quadrilátero Ferrífero</b> .....	<b>8</b>
<b>3.5 Rejeitos de mineração</b> .....	<b>8</b>
<i>3.5.1 Rejeitos da mineração de ferro</i> .....	<b>9</b>
<i>3.5.2 Impactos da mineração: o desastre na barragem de Fundão, Mariana-MG</i> ....	<b>10</b>
<b>3.6 Impactos diretos no solo</b> .....	<b>14</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>15</b>
<b>4.1 Área de Estudo</b> .....	<b>15</b>
<b>4.2 Amostragem</b> .....	<b>17</b>
<b>4.3 Análises físicas</b> .....	<b>18</b>
<i>4.3.1 Granulometria</i> .....	<b>18</b>
<i>4.3.2 Densidade do Solo</i> .....	<b>19</b>
<i>4.3.3 Densidade de Partículas</i> .....	<b>19</b>
<b>4.4 Análises químicas</b> .....	<b>20</b>
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>21</b>
<b>5.1 Descrição dos pontos de coleta</b> .....	<b>21</b>
<b>5.2. Atributos químicos</b> .....	<b>26</b>
<b>5.3 Atributos Físicos</b> .....	<b>30</b>
<b>6. DISCUSSÃO</b> .....	<b>31</b>

<b>6.1. Atributos Químicos.....</b>	<b>31</b>
<i>6.1.2 Classificação das variáveis químicas em classes de disponibilidade. ....</i>	<i>39</i>
<b>6.2 Atributos Físicos .....</b>	<b>41</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>41</b>
<b>7. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>43</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma das principais atividades econômicas do Brasil, tendo em vista que 4% de todo minério comercializado no planeta é extraído do subsolo brasileiro, dando ao país uma posição de destaque na produção e exportação de bens minerais. Em 2014, a produção de minério de ferro atingiu 411,8 Mt (milhões de toneladas), apresentando um teor médio de 63,5% de ferro, valor considerado de alto interesse econômico (DNPM, 2015). Entretanto, apesar dos benefícios que a alta produção no setor de mineração proporciona, as riquezas minerais são um recurso não renovável, e é parte das demandas socioeconômicas a busca pelo aproveitamento lógico e sustentável, reduzindo os riscos da atividade mineradora ocasionar impactos ambientais irreversíveis.

Neste cenário, no Brasil se destaca o estado de Minas Gerais, maior produtor de minério de ferro com as maiores reservas nacionais de tal recurso. O Estado movimenta grande parte da economia da mineração, e o Quadrilátero Ferrífero é identificado como uma paisagem de alto conflito de interesses, a mais antiga área de mineração de ferro do país.

No dia 5 de novembro de 2015, Minas Gerais foi cenário de desastre envolvendo a ruptura da barragem de contenção de rejeitos de Fundão, localizada no município de Mariana. O carreamento e a deposição do rejeito de minério de ferro sobre as áreas atingidas suprimiu a vegetação das margens dos rios (SILVA, 2017). Como consequência, os cursos d'água apresentaram uma drástica redução da biodiversidade presente, gerando uma nova camada sobre a superfície do solo dos terraços, que foram soterrados por sedimentos tecnogênicos de origem da mineração. Esse novo substrato classificado como Tecnossolo foi responsável pela substituição dos solos superficiais que sustentavam a paisagem anteriormente ao desastre.

Os Tecnossolos são solos profundamente modificados pela ação humana. Eles contêm uma quantidade significativa de artefatos, criados pela ação antrópica, tendo propriedades diferentes do material de origem. São encontrados em todo o mundo onde a atividade humana levou à construção de solo artificial, vedação de solo natural ou extração de material. Assim, cidades, estradas, minas e depósitos de lixo estão incluídos na classe dos Tecnossolos (FAO, 2006).

De acordo dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural de Minas Gerais (EMATER), uma área aproximadas de 1.430 hectares atingida pelo rejeito é considerada inativa para o desenvolvimento de atividades agropecuárias, em função de que a camada de lama depositada

dificulta reações químicas necessárias para a constiuição da fertilidade do solo. Diante disso necessitará de investimentos para que possa alcançar níveis desejáveis de sustentabilidade.

Devido ao alto grau de impacto no ecossistema, sua recuperação torna-se praticamente impossível sem interferência antrópica. Neste sentido, a ciência do solo em consonância com a ciência geográfica podem auxiliar no estudo, espacialização e diagnóstico da área afetada a fim de criar estratégias de redução dos danos a curto e longo prazo. Para tal, esta pesquisa se justifica face a necessidade de uma mensuração espaço-temporal das condições ambientais pós ruptura da barragem de Fundão, com ênfase nas condições dos solos remanescentes das atividades antrópicas, os tecnossolos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 GERAIS**

O objetivo deste trabalho consistiu em avaliar os Tecnossolos de rejeitos de mineração de ferro, formados às margens dos Rios Carmo, Gualaxo do Norte e Doce, comparando o ganho/perda de nutrientes, MO e condições físicas após três anos do desastre.

### **2.2 ESPECÍFICOS**

- Comparar modificações químicas e físicas do rejeito de amostras coletadas quatro meses após o rompimento da barragem e amostras coletadas no dia 12 de setembro de 2018;
- Avaliação do aporte de MO e nutrientes atual para fins de fertilidade comparando com literatura pertinente;
- Avaliação visual da atividade biológica nos perfis de coleta de tecnossolos ao longo dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, observando também o ambiente edáfico do entorno.

### **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

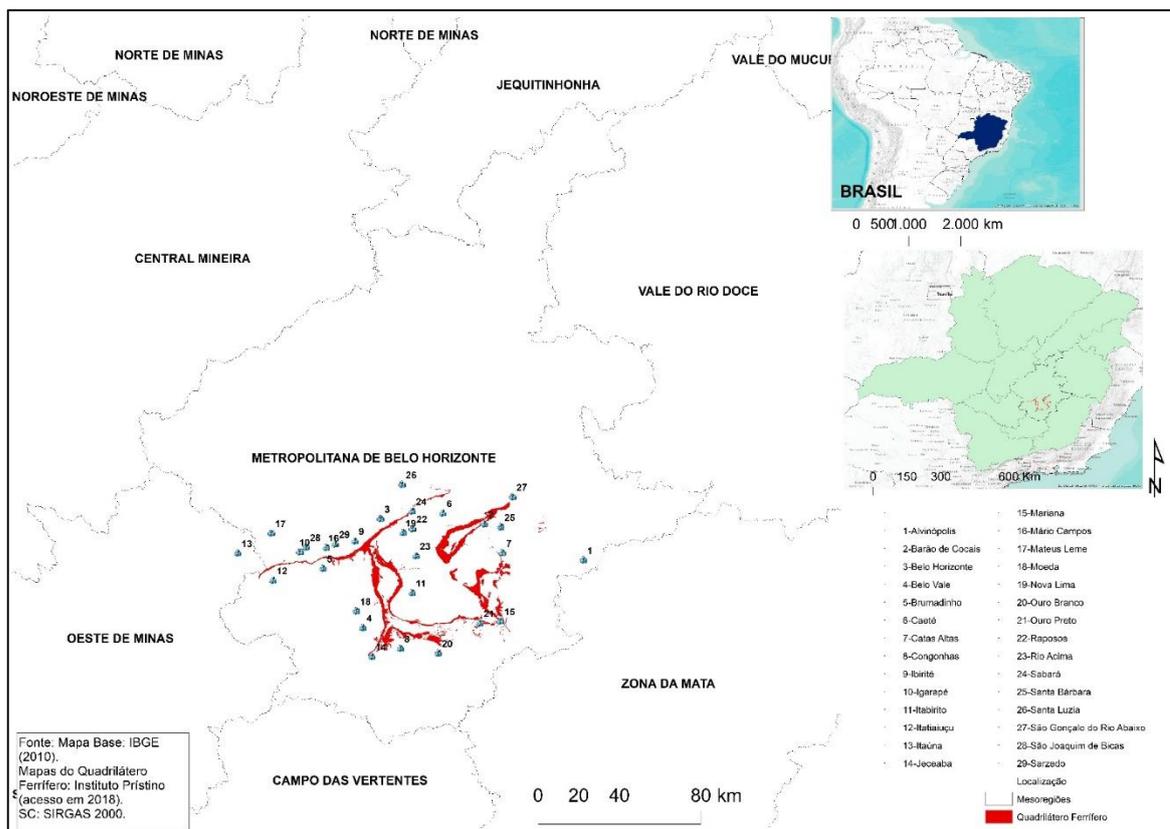
#### **3.1 Mineração em Minas Gerais e a representatividade do Quadrilátero Ferrífero**

De acordo com Rezende (2016), a história da mineração no Brasil está intimamente ligada à formação do estado de Minas Gerais. No período colonial, a partir de 1690, já havia centenas de lavras de ouro aluvionar na região central do estado. De 1700 a 1780, Minas Gerais produzia cerca de dois terços do ouro e boa parte das gemas e diamantes que eram extraídos no Brasil. Essa produção mineral fomentou a abertura de estradas, a implantação de núcleos urbanos, a unificação do território, a criação de uma estrutura administrativa própria e a construção da Estrada Real. Cidades como Ouro Preto, Congonhas, Sabará, São João del Rei, Tiradentes, Diamantina, Serro e várias outras prosperaram em torno das minas.

Durante o ciclo do ouro, aproximadamente entre 1700 e 1820, o Brasil foi o maior produtor mundial de ouro. Estima-se que neste período tenham sido extraídas 1.000 toneladas de ouro, entre produção declarada e contrabandeada, provenientes principalmente de aluviões e de outros depósitos superficiais da região do atual Quadrilátero Ferrífero. De 1900 a 1930 o Brasil produziu 121 toneladas das quais 114 toneladas, ou seja 94,2%, saíram da Mina Morro Velho, localizada no distrito aurífero de Nova Lima. Entre 1930 e 1977 a Mineração Morro Velho foi responsável por 85,3% da produção nacional (VIEIRA & OLIVEIRA, 1988).

Nos dias atuais, o estado ainda é o maior produtor de minério. De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2014), Minas Gerais se situa como o maior estado produtor de minério do Brasil, com 47,01% da produção nacional, sendo que no ano de 2014 o estado acumulou o equivalente a R\$ 800.684.546,79 em valor da produção.

Tais dados se aplicam especialmente para a região do Quadrilátero Ferrífero, a região é assim denominada em função de sua configuração geométrica peculiar, definida como um polígono de aproximadamente 7.000 km<sup>2</sup> de área, delimitado pelas linhas que ligam as cidades de Itabira, Rio Piracicaba, Mariana, Congonhas, Casa Branca, Piedade de Paraopeba, Serra Azul e Belo Horizonte (Figura 1), e cortado pelos rios das Velhas e Paraopeba. Constituindo uma das maiores províncias minerais do mundo, a região comporta enormes reservas de minérios de ferro, exploradas por grandes conglomerados industriais e inúmeras minerações de pequeno e médio porte, gerando enormes quantidades de resíduos que exigem, assim, projetos específicos para a sua disposição final (REZENDE, 2016).



**Figura 1.** Mapa de localização do Quadrilátero Ferrífero.

**Fonte:** IBGE, ANA, (2010)

Até o ano de 2010 encontravam-se cerca de trinta minas em exploração. A maior parte do minério é transportada via férrea ao porto de Vitória no Espírito Santo. Uma maneira quase única de transporte na América do Sul é realizada pela companhia Samarco Mineração S.A., fundada em 1977 e hoje pertencente ao grupo VALE que bombeia a polpa de minério por um mineroduto de sua mina perto de Ouro Preto até a costa atlântica ao referido porto (ROESER e ROESER, 2010).

### 3.2 Geologia do Quadrilátero Ferrífero

A geologia heterogênea do Quadrilátero Ferrífero fornece uma série de minerais, destacando-se entre eles, principalmente, o minério de ferro, manganês, ouro, esteatito, topázio imperial, esmeraldas entre outros (NUNES et al., 2012). Além de abrigar grandes minerações de ferro e ouro, também abriga vários empreendimentos de mineração que exploram jazidas de outros tipos de rochas e minerais como, por exemplo, topázio e bauxita (MARENT et al., 2011).

Segundo Roeser e Roeser (2010) hoje, mais de cento e cinquenta minerais puderam ser identificados nas vizinhanças diretas de Ouro Preto. Entre eles os mais comuns são plagioclásio, feldspato alcalino, quartzo, micas, anfibólios e piroxênios. Há minerais mais raros como cinábrio, estraulolita, cianita, almandina e pedras preciosas como ouro e topázio. Além disso, ocorrem os elementos do grupo da platina, e raridades de paládio (Pd) como atheneita e estibiopalladinita.

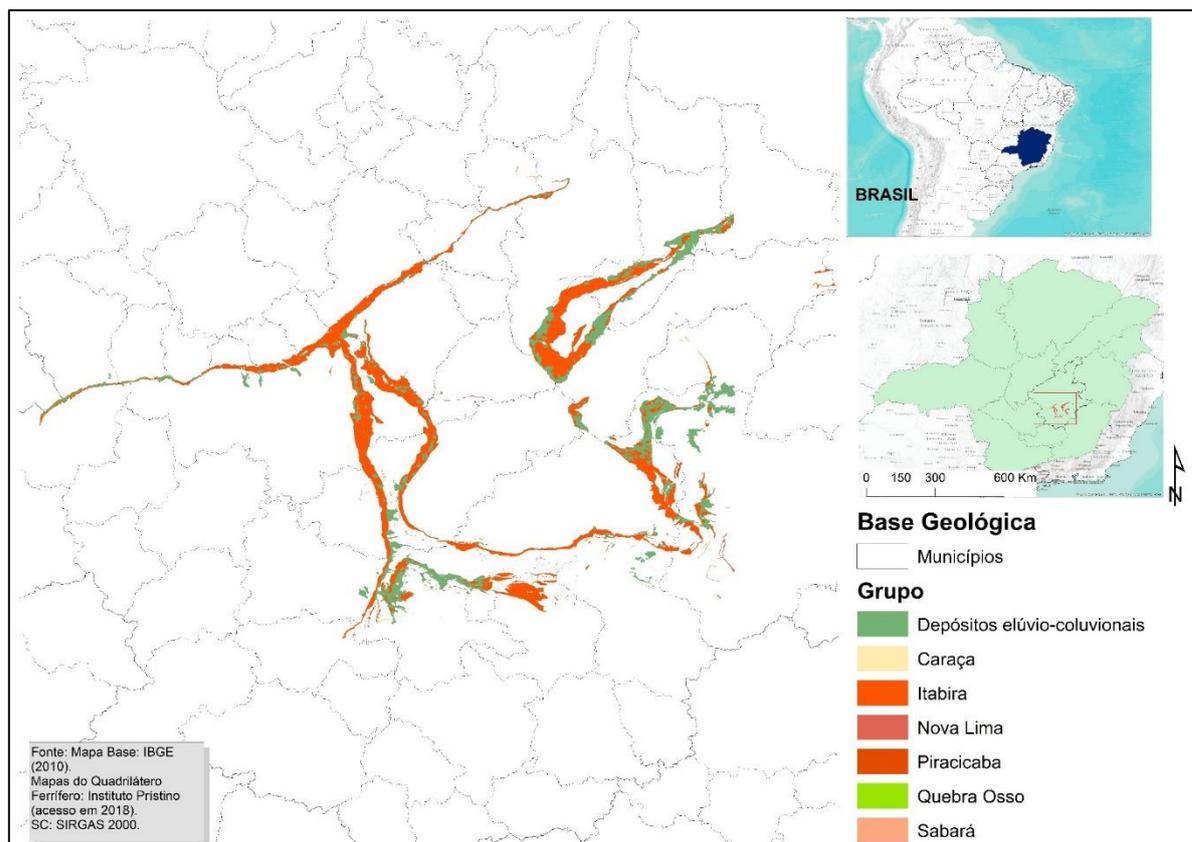
Devido aos altos teores de ferro em seus minérios, as reservas brasileiras se destacam mundialmente, fazendo do Brasil o segundo maior produtor mundial. Em 2008, a sua produção correspondeu a 19% do que foi produzido no mundo sendo que cerca de 70% veio das minas do Quadrilátero Ferrífero (IBRAM, 2009).

De acordo com Dorr (1959), as rochas da área encontram-se dobradas, falhadas e metamorfizadas em graus variáveis. Sendo que as unidades lito-estratigráficas predominantes no QF são: Grupo Itacolomi, o Supergrupo Minas, o Supergrupo Rio das Velhas e o Embasamento Cristalino (Figura 2).

O Supergrupo Rio das Velhas é composto por uma típica sucessão greenstone belt, que congrega metavulcânicas (komatiitos, basaltos, vulcanoclásticas) e metassedimentos, incluindo formações ferríferas, carbonatos e terrígenos. A idade das vulcânicas félsicas da base desta unidade é de 2.776 Ma (Machado et al., 1992 apud Alkmim, 2004).

O supergrupo Minas que possui até 6.000 m de espessura é composto principalmente de metassedimentos pelíticos e quartzosos e coloca-se discordante acima do cinturão verde Rio das Velhas. Dentre os seus quatro grupos, o de Itabira é o mais significativo em termos econômicos, contendo os minérios de ferro, localmente denominados itabiritos, internacionalmente conhecidos como banded Iron Formations (BIF's), minérios bandeados do tipo lake superior. O grupo Itacolomy é basicamente composto de quartzitos. (ROESER e ROSER, 2010)

Em termos fisiográficos, o QF é composto por um relevo caracterizado por longas cadeias de montanhas, com picos robustos e elevados. Esse relevo foi determinado pela estrutura e erosão diferencial, com grandes traços, por uma coincidência entre os Grupos Caraça e Itabira nos relevos mais altos. Os quartzitos, caracterizados por uma maior resistência, permanecem como cristas, que são conformadas pelos granitos e gnaisses, em pontos mais baixos. Os xistos e filitos ocupam uma posição intermediária, compreendendo os anticlinais e sinclinais topograficamente invertidos (DOOR e JOHN, 1969).



**Figura 2.** Mapa de localização das estruturas geológicas do QF. Fonte: IBGE, (2010)

### 3.3 Solos do Quadrilátero Ferrífero

Segundo Filho (2008), o Quadrilátero Ferrífero foi contemplado apenas em levantamentos pedológicos de caráter médio geral, referentes ao Projeto RadamBrasil, em escala 1:1.000.000, que cobrem toda a sua extensão, e no levantamento de reconhecimento (escala 1:500.000), realizado pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, 1983). Para a parte pertencente à bacia de captação do rio São Francisco, recentemente foi realizado um levantamento com mapa na escala 1:50.000 (Shinzato & Carvalho Filho, 2005), como um dos temas integrantes do Zoneamento Ecológico-Econômico da Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belo Horizonte (APA Sul RMBH), sob a responsabilidade da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, através de contrato com a Secretaria de Meio Ambiente (SEMAD/MG).

Na região do QF há um grande domínio dos solos pouco evoluídos (Cambissolos e Neossolos Litólicos) e algumas áreas com expressiva ocorrência de afloramentos rochosos. Desse modo, é forte a influência do material de origem nas características dos solos, em que se destaca o conjunto de solos de constituição ferrífera, distinguidos pelos teores de óxidos de

ferro muito elevados e intensa cor vermelha. Em alguns casos apresentam notável escurecimento, condicionado pela alta concentração de compostos de manganês, e pela constituição mineralógica oxidica, independente do grau de desenvolvimento pedogenético. A ocorrência de concreções ferruginosas é outra característica muito frequente, predominam os Cambissolos Háplicos Perférricos, com ocorrência menor de Latossolos Vermelhos Perférricos, que tendem a localizar-se de forma preferencial em rampas coluvionares de sopé (FILHO, 2008).

### **3.4 A socioeconomia do Quadrilátero Ferrífero**

A região do Quadrilátero Ferrífero abriga a maior concentração urbana do estado de Minas Gerais. Em sua parte norte está localizada a capital do estado, Belo Horizonte com cerca de 2,4 milhões de habitantes. Os municípios da região têm uma população que corresponde a cerca de 20% da população do estado e a sua produção abrange 26,8% do PIB de Minas Gerais, sendo a mineração como base da economia de vários desses municípios (AZEVEDO *et al.*, 2012).

De uma maneira geral, os municípios que compõem o Quadrilátero Ferrífero têm uma economia dinâmica e apresentaram, nos últimos anos, crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) acima da média do Estado e nacional. A economia da região é fortemente influenciada por Belo Horizonte, que detém cerca de 73% do PIB cuja composição, tem forte participação do setor de serviços. No que se refere ao Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), a maioria dos municípios está enquadrada dentro da faixa de médio desenvolvimento humano e apenas alguns municípios como Nova Lima e Belo Horizonte podem ser considerados de alto desenvolvimento humano (CPRM, 2012) .

### **3.5 Rejeitos de mineração**

Os rejeitos de mineração são materiais remanescentes do processo de beneficiamento e concentração de minérios em instalações industriais. Suas características granulométricas encontram-se diretamente dependentes do tipo de minério bruto lavrado e do processo industrial de beneficiamento utilizado. Assim, sua composição pode abranger uma ampla faixa de materiais, variando desde solos arenosos não plásticos até solos de granulometria muito fina (RIBEIRO, 2004).

Depois de gerado, o rejeito obtido do processo de beneficiamento, de forma geral, é disposto em minas subterrâneas, em cavas exauridas de minas, em pilhas, por empilhamento a

seco ou em barragens de rejeitos, dentre outros. Entretanto, segundo FEAM (2011), as barragens caracterizam a principal forma de disposição de rejeitos minerários no estado de Minas Gerais, armazenando em torno de 85 % dos rejeitos da mineração.

A construção de barragens de contenção de rejeitos pode ser realizada com o próprio rejeito ou utilizando materiais provenientes das atividades de lavra (estéreis) e solos naturais de áreas de empréstimo. Por questões econômicas, as empresas de mineração adotam barragens não compactadas de rejeito granular depositado hidraulicamente (aterros hidráulicos). Essas estruturas são normalmente executadas com os equipamentos da própria mineradora com controle sistemático do processo de disposição dos rejeitos. Entretanto, a forma hídrica de lançamento implica a formação de depósitos com complexo comportamento geotécnico, exigindo o conhecimento das características físicas do rejeito, particularmente a resistência ao cisalhamento, o adensamento e a permeabilidade

No passado, devido ao pequeno volume de rejeitos produzidos e à falta de especificações técnicas, esses materiais eram lançados aleatoriamente nos cursos d'água sem qualquer preocupação ambiental. As atuais estruturas de contenção de rejeitos (barragens e pilhas), mesmo executadas com maior controle, ainda tendem a gerar alguns impactos ao ambiente (RIBEIRO, 2004).

### **3.5.1 Rejeitos da mineração de ferro**

O ferro é o metal mais utilizado do mundo, sendo extraído da natureza sob a forma de minério, o qual é rico em óxidos de ferro. Diferentes etapas podem ser empregadas na extração do ferro, a depender da qualidade do minério.

Segundo IBRAM (2012), os minérios de ferro, predominantemente explorados no Brasil, são a hematita ( $Fe_2O_3$ ), um dos principais minerais de ferro é o itabirito, formações ferríferas compostas de hematita e quartzo (sílica). A hematita é extraída principalmente no estado do Pará, e apresenta teor médio de ferro em torno de 60%. Já o itabirito é extraído principalmente na região do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, com teor de ferro em torno de 50%. Apesar deste valor médio, já estão sendo extraídos itabiritos com teores mais baixos de ferro chegando a estar entre 25 e 30% (ALLORE MINERAÇÃO, 2012).

De acordo com ANDRADE (2014), o minério de ferro, é composto, tanto destes minerais de ferro, que apresentam valor econômico agregado, quanto de outros minerais, que não apresentam valor econômico para a mineração de ferro. Assim sendo, os minerais de ferro, quando processados com objetivo de aumentar o teor de ferro contido no produto final, podem

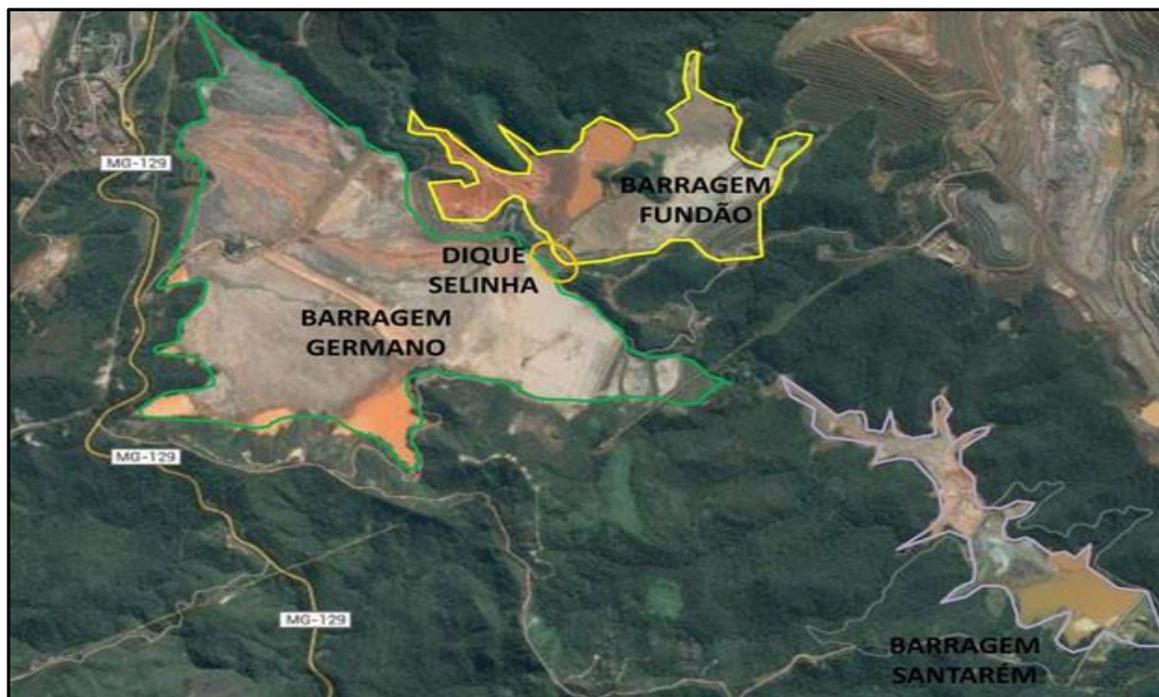
gerar rejeitos que contêm diferentes minerais em sua composição. Segundo o mesmo autor se tem observado atualmente, é que os rejeitos descartados e armazenados em algumas barragens podem apresentar concentração de ferro superior a alguns minérios de baixo teor, lavrados por empresas minerárias no Brasil. Normalmente, os minerais associados aos rejeitos da mineração de ferro são caulinita, gibbsita, goethita, hematita, magnetita e quartzo (WOLFF, 2009).

De acordo com Gomes et al. (2011), que promoveu a caracterização dos finos de uma barragem de rejeito da mineração de ferro, foram encontrados teores médios de 48,08% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 20,58% de  $\text{SiO}_2$  e 3,16% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nestes rejeitos, sendo praticamente todo ferro proveniente da hematita. Supõe-se que esta seja uma realidade em muitas barragens de rejeito da mineração de ferro já encerradas no Brasil, principalmente no Quadrilátero Ferrífero, onde grande quantidade de minérios com altos teores de ferro já foram extraídos e beneficiados por processos pouco eficazes.

### **3.5.2 Impactos da mineração: o desastre na barragem de Fundão, Mariana-MG**

A Samarco Mineração S.A. é uma empresa brasileira produtora de pelotas e finos de minérios de ferro, utilizados pela indústria siderúrgica mundial, com a finalidade de exportação. Criada em 1977, está localizada em duas regiões, sendo em Minas Gerais para a extração e o beneficiamento do minério de ferro e no Espírito Santo para a pelotização e a exportação desse material (SAMARCO, 2014).

Criadas para receberem os rejeitos provenientes do processo de extração de minério de ferro pela mineradora Samarco S/A, as barragens de Fundão e Santarém estavam localizadas num complexo denominado “Alegria” (Figura 3), localizada no Município de Mariana.



**Figura 3.** Complexo “Alegria” antes do rompimento da barragem Fundão.

**Fonte:**Google Earth

O rompimento da barragem de Fundão provocou a liberação de aproximadamente 50 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração no vale do Rio Doce. As barragens estavam localizadas na borda oriental do Quadrilátero Ferrífero, no sopé das serras do Batatal (1.700 m. de altitude) e do Coqueiro (1.796 m. de altitude), as quais fazem a junção entre a Serra do Caraça (ao norte) e a Serra de Antônio Pereira (ao sul) (SALINAS, 2016). A figura 4 mostra o efeito do rompimento da barragem de Fundão nas imediações, com o apoio de imagens de satélite.



**Figura 4.** Efeitos locais do rompimento da barragem.

**Fonte:** Google Earth

De acordo com Gonçalves *et. al* (2015), as barragens do complexo operavam através de um método tradicionalmente utilizado em todo mundo: o aterro hidráulico. Nesse sistema, os resíduos separados do ferro durante o processo de mineração são escoados até as bacias (barragens) por força da ação gravitacional. Já a filtragem da água é realizada pela areia, localizada estrategicamente na parte frontal dessas bacias.

O rompimento da barragem provocou a morte de 19 pessoas, o soterramento do patrimônio arquitetônico e histórico de diversas comunidades locais em Mariana, desabrigou e desalojou centenas de indivíduos (SALINAS, 2016).

A lama destruiu vilarejos, percorreu 663 km ao longo dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, chegando à sua foz, tendo afetado esse ecossistema, área de reprodução de várias espécies animais. Afetou, também, a vida de 35 municípios em Minas Gerais e quatro no Espírito Santo (ES), deixando cerca de 1,2 milhões de pessoas sem abastecimento de água. Em avaliação realizada em 2016, mais de um ano da tragédia, a contaminação da água do rio Doce, utilizada para consumo humano ainda apresentava risco. Também ainda existia um levantamento impreciso de espécies que podem ter sido extintas, estimando-se em décadas o tempo para a recuperação das bacias hidrográficas atingidas (LACAZ *et al.*, 2016).

Com população estimada em 612 habitantes, o distrito de Bento Rodrigues, localizado no município de Mariana, foi o primeiro a receber o impacto da onda de rejeitos. Devido à violência da enxurrada, o pequeno povoado simplesmente desapareceu – soterrado em um mar de lama. Todos os sobreviventes ficaram desabrigados, pois suas casas, igrejas e colégios foram arrastados e destruídos pela força descomunal da avalanche (LOPES, 2016). No que diz respeito ao impacto causado nas habitações, no povoado de Bento Rodrigues, 82% das edificações foram atingidas (BRASIL, 2015).

Dentre as áreas mais atingidas, além de Bento Rodrigues, Paracatu de Baixo em 2016 ainda continuavam com aspecto de cidade fantasma. Os agricultores e produtores de leite do alto Rio Doce ficaram desempregados e sem meios de garantir plenamente a subsistência de suas famílias. Os 11 mil pescadores que viviam do Rio Doce continuam numa situação de deriva, com a atividade da pesca artesanal totalmente inviabilizada. Os trabalhadores indiretos da Samarco foram, em larga escala, demitidos. E os que eram trabalhadores diretos estão numa situação de incerteza, com a empresa ameaçando demissões caso não volte a operar de modo imediato (MILANEZ e LOSEKANN, 2016).

No aspecto ambiental vale ressaltar algumas informações, a bacia do rio Doce está predominantemente inserida no bioma da Mata Atlântica. Embora esse bioma apresente altos índices de biodiversidade e de endemismo, a Mata Atlântica encontra-se em situação crítica. Em seus domínios vivem 70% da população brasileira e nessa região estão localizadas as maiores cidades e os mais importantes polos industriais do Brasil. Segundo o IBAMA, em 2014, a Mata Atlântica estava reduzida a 15% de sua cobertura original (19.676.120 hectares). Dessa forma, o bioma figura entre os 25 hotspots mundiais, uma das regiões mais ricas e, ao mesmo tempo, mais ameaçadas do planeta (IBAMA, 2015).

O desastre também atingiu de forma devastadora as coberturas vegetais conhecidas por “matas de galeria”. Esse tipo de vegetação possui essa nomenclatura devido a sua fisionomia, uma vez que as copas de suas árvores, ao se encontrarem, formam uma espécie de “túnel” ou “galeria”. Sua preservação é considerada basilar para a manutenção do ecossistema hídrico, pois as matas de galeria, assim como as ciliares, possuem raízes que atuam no sentido de preservar os cursos d’água de processos erosivos fluviais (LOPES, 2016).

Segundo o IBAMA, o rompimento da barragem de Fundão causou a destruição de 1.469 hectares (14,69 km<sup>2</sup>) ao longo de 77 quilômetros de cursos d’água, incluindo áreas de preservação permanente (APPs) (IBAMA, 2015).

Apesar de os maiores impactos terem sido observados tendo decorridas apenas algumas poucas horas após o desastre, constata-se um processo contínuo de carreamento e deposição de

sedimentos nos cursos d'água. Esse processo decorre não só da erosão a partir da lama minerária depositada junto às margens, mas também da lenta liberação de lama pela barragem de Santarém (MNHJB, 2015)

Os impactos causados pelo rompimento da barragem de Fundão na qualidade de água do rio Doce e seus tributários podem ser tipificados em duas grandes categorias: (a) aumento na quantidade de partículas em suspensão e dissolvidas; (b) aumento nos níveis de contaminação por metais e outros agentes, com potencial tóxico. O aumento na quantidade de partículas em suspensão na água pode ser refletido em diversas variáveis limnológicas (transparência, cor, turbidez, sólidos dissolvidos, sólidos totais, sólidos sedimentáveis, etc.).

### **3.6 Impactos diretos no solo**

Segundo Silva et al. (2015), os principais impactos no solo responsáveis pelo rompimento das barragens são:

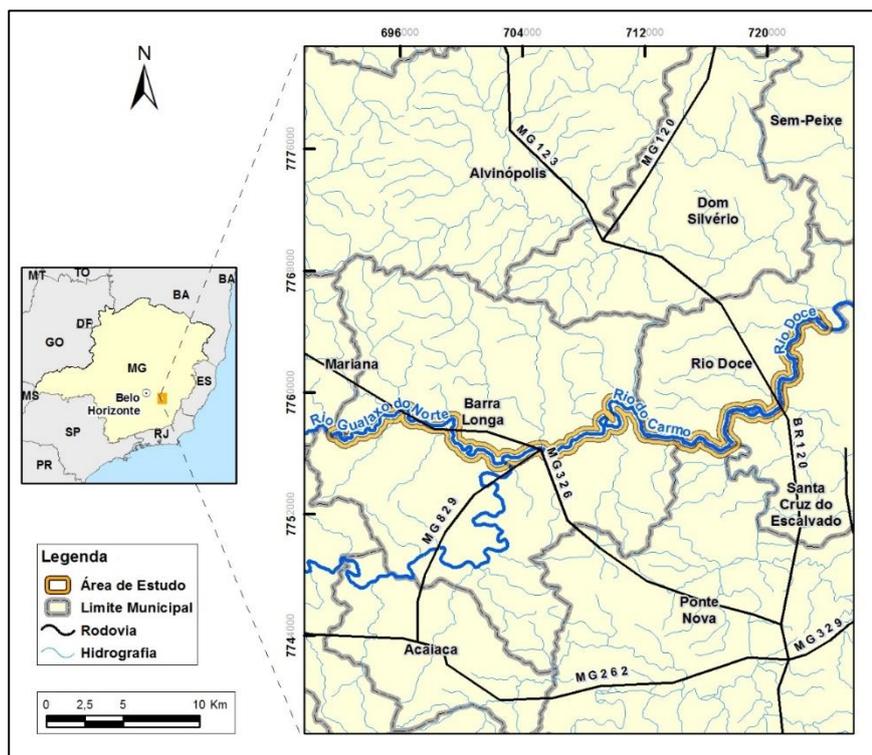
- Sedimento de composição granulométrica com cerca de 90% de areia e silte e apenas 10% de argila, implicando em baixa capacidade de trocas catiônicas e, portanto, baixa fertilidade.
- Compactação do material depositado nas margens, baixa porosidade e presença de concreção ferruginosa quando ressecado, o que gera uma barreira física média resistente ao crescimento radicular vegetal e ambiente anaeróbico para os micro-organismos.
- Baixa coesão e características higroscópicas, que propiciam o surgimento e agravamento dos processos erosivos.
- Ausência de estrutura do solo, baixa fertilidade devido ao déficit de cátions disponíveis, de matéria orgânica e de argila.
- Presença de valores elevados de ferro, manganês e alumínio.
- Valores de arsênio superiores ao limite permitido pela legislação (CONAMA 454/2012).
- Evidencia de uma alteração do pH da mata ciliar de 4.5 para 8.9, prejudicando as atividades celulares de plantas, animais e micro-organismos.
- Presença de grande quantidade de amins potencialmente tóxicas aos sistemas biológicos e toxicidez de amônio, conforme estimado na barragem de Fundão (Mroczkowski, Stuczyński, 2006).

- Entre as barragens de Fundão e Santarém até o trecho do Rio Gualaxo do Norte próximos ao Rio do Carmo estima-se perda de 560,35 ha de vegetação, sendo 384,71 ha de Mata Atlântica.
- Na área subsequente do Rio Gualaxo do Norte até a foz do Rio Doce estima-se perda de 1026,65 ha de vegetação, sendo 126,37 de Mata Atlântica.
- Drástica redução da população microbiana nas águas e solos atingidos pelo rompimento da Barragem de Fundão.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Área de Estudo

O trabalho foi desenvolvido na Bacia do rio Doce, em suas duas principais bacias constituintes (rio Gualaxo do Norte e rio do Carmo) (Figura 5).



**Figura 5.** Mapa de localização da área de estudo.

**Fonte:** Santos et.al (2018), não publicado

A bacia do rio Doce situa-se na região sudeste do Brasil nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo nos paralelos 17°45' e 21°15' de latitude sul e os meridianos 39°55' e 43°45' de

longitude oeste. Possui uma extensão total de 853 km e uma área de drenagem com cerca de 83.465 km<sup>2</sup>, dos quais 86% pertencem ao Estado de Minas Gerais e o restante (14%) ao Estado do Espírito Santo (ANA, 2010).

Os solos predominantes encontrados na região de coleta das amostras são os Cambissolos, Latossolos, Argissolos, Neossolo Flúvico. Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos elaborado pela Embrapa (2006), tais solos podem ser caracterizados da seguinte forma:

**Cambissolos:** compreende solos constituídos por material mineral, com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial, desde que em qualquer dos casos não satisfaçam os requisitos estabelecidos para serem enquadrados nas classes Vertissolos, Chernossolos, Plintossolos, Organossolos. Têm seqüência de horizontes A ou hístico, Bi, C, com ou sem R. (EMBRAPA, 2006)

Devido à heterogeneidade do material de origem, das formas de relevo e das condições climáticas, as características destes solos variam muito de um local para outro. Assim, a classe comporta desde solos fortemente até imperfeitamente drenados.

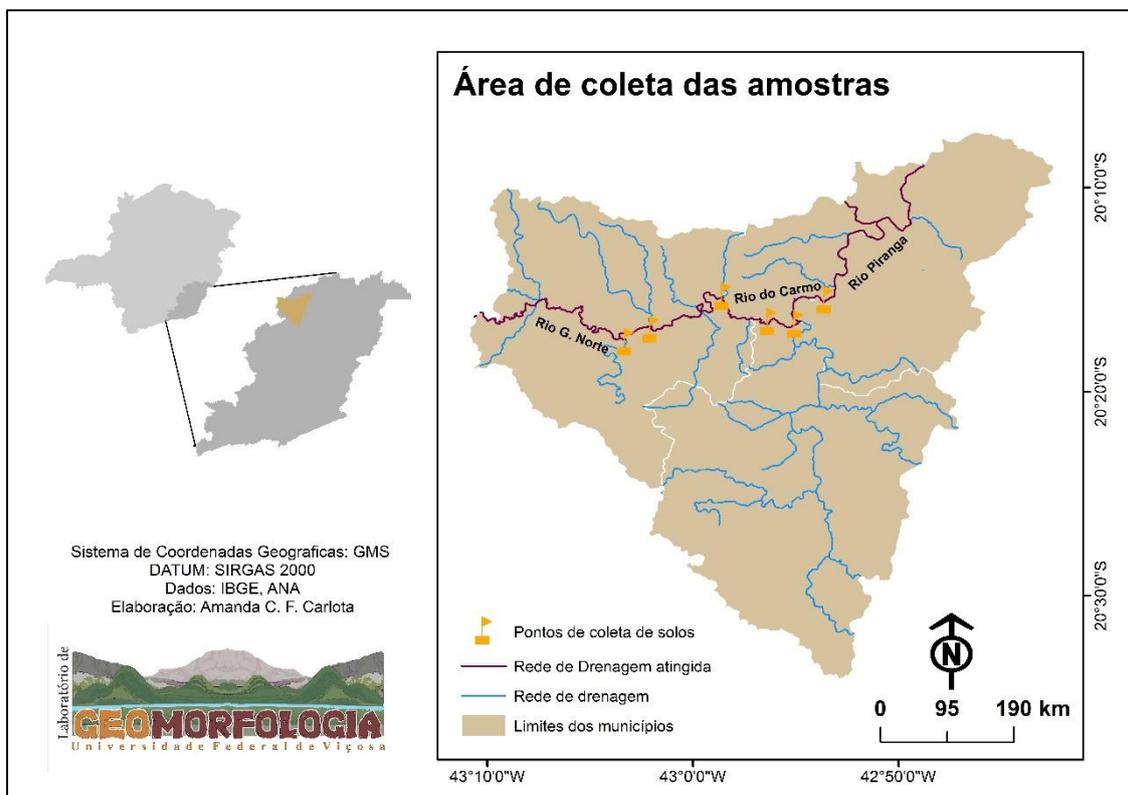
**Latossolos:** compreende solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer um dos tipos de horizonte diagnóstico superficial, exceto hístico. São solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos, como resultado de enérgicas transformações no material constitutivo. Os solos são virtualmente destituídos de minerais primários ou secundários menos resistentes ao intemperismo, e têm capacidade de troca de cátions da fração argila baixa. Variam de fortemente a bem drenados, embora ocorram solos que têm cores pálidas, de drenagem moderada ou até mesmo imperfeitamente drenada, indicativa de formação em condições, atuais ou pretéritas, com um certo grau de gleização. (EMBRAPA, 2006)

**Argissolos:** compreende solos constituídos por material mineral, que têm como características diferenciais a presença de horizonte B textural de argila de atividade baixa, ou alta conjugada com saturação por bases baixa ou caráter alítico. O horizonte B textural (Bt) encontra-se imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte superficial, exceto o hístico, sem apresentar, contudo, os requisitos estabelecidos para serem enquadrados nas classes dos Luvisolos, Planossolos, Plintossolos ou Gleissolos. São de profundidade variável, desde forte a imperfeitamente drenados, de cores avermelhadas ou amareladas, e mais raramente, brunadas ou acinzentadas. A textura varia de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito

argilosa no horizonte Bt, sempre havendo aumento de argila daquele para este. (EMBRAPA, 2006)

## 4.2 Amostragem

Para comparação das condições do rejeito nos dois momentos propostos no estudo, foram utilizadas análises realizadas por Santos et al, (2016; não publicado) no dia 5 de março de 2016 (4 meses após o desastre). No dia 12 de setembro de 2018 foi realizado um novo trabalho de campo para a coleta de amostras deformadas e indeformadas (quase três anos após o rompimento da barragem)(Figura 6). Na segunda coleta foram realizadas observações de campo, levando em consideração aspectos sobre atividade biológica nos locais, profundidade do rejeito de minério presente, textura do material, presença de raízes, vegetação e uso atual da área. O estudo abrangeu, portanto, uma análise dos componentes presentes nos pontos amostrados.



**Figura 6.** Localização dos pontos de coleta das amostras de rejeito.

Os resultados analíticos da primeira coleta, foram utilizados como tempo 0 (T0), ou seja, como referência para o input de MO e nutrientes, uma vez que se trata do rejeito “in natura”. Desta forma, foi possível compara-los os com os dados da segunda coleta (T1), uma vez que a localização geográfica dos pontos de coleta foram equivalentes. A localização geográfica dos pontos é descrita na tabela 1.

**Tabela 1.** Localização geográfica dos pontos amostrais.

<b>Ponto de coleta</b>	<b>Profundidade (cm)</b>	<b>Coordenadas (UTM)</b>
P 05	0-5	720130, 7758554
P 13	0-5	717589, 7756399
P 16	0-5	715301, 7756648
P 22	0-5	711466, 7759006
P 35	0-5	703177, 7754964
P 45	0-5	705345,7756111

**Fonte:** Dados coletados em campo com o auxílio de equipamento de GPS.

Após a coleta as amostras foram secas em estufa à temperatura de 105 °C por 48 horas, destorroadas em almofariz e peneiradas em peneira de 2 mm, a fim de obter apenas silte, areia e argila para as posteriores análises físicas e químicas.

### **4.3 Análises físicas**

#### **4.3.1 Granulometria**

A análise granulométrica foi dada segundo metodologia da EMBRAPA (2017). Foi utilizada, como agente dispersante, solução de NaOH a 0,05 mol/L. As proporções de areia grossa (AG), areia fina (AF), argila (Arg) e silte (S) foram determinadas a partir das fórmulas:

$$T_{ag} = (M_{at} - M_{af}) * 50 \quad (1)$$

Em que: **T<sub>ag</sub>** = Teor de areia grossa; **M<sub>at</sub>** = Massa de areia total (g); **M<sub>af</sub>** = Massa de areia fina (g)

$$T_{af} = (M_{af}) * 50 \quad (2)$$

Em que: **T<sub>af</sub>** = Teor de areia fina; **M<sub>af</sub>** = Massa de areia fina (g)

$$T_{arg} = [(M_{arg} + M_d) - M_d] * 1000 \quad (3)$$

Em que: **T<sub>arg</sub>** = Teor de argila; **M<sub>arg</sub>** = Massa de argila (g); **M<sub>d</sub>** = Massa de dispersante (g)

$$T_s = 100 - (T_{arg} + T_{af} + T_{ag}) \quad (4)$$

Em que: **T<sub>s</sub>** = Teor de silte ; **T<sub>arg</sub>** = Teor de argila; **T<sub>af</sub>** = Teor de areia fina; **T<sub>ag</sub>** = Teor de areia grossa.

#### 4.3.2 Densidade do Solo

A densidade do solo foi avaliada através do método do anel volumétrico através da fórmula:

$$D_s = M_{solo} / V_t \quad (5)$$

Em que: **D<sub>s</sub>** = Densidade do solo; **M<sub>solo</sub>** = Massa do solo; **V<sub>t</sub>** = Volume do cilindro

#### 4.3.3 Densidade de Partículas

A densidade das partículas foi obtida pelo método do balão volumétrico, a partir da determinação do volume de álcool necessário para preencher a capacidade de um balão, contendo 20 g de material fino seco em estufa a 105 °C. A amostra é transferida para o balão aferido de 50 mL. Posteriormente, adiciona-se álcool etílico até que se complete a capacidade do balão para que se obtenha o volume de álcool gasto (Embrapa 2017).

Utiliza-se as fórmulas:

$$D_p = \frac{M_s}{M_v} \quad (6)$$

$$Dp = \frac{Ms}{Vb - Vg}$$

Em que: **Ms** = Massa da amostra seca a 105 °C; **Vb** = Volume real; **Vg** = Volume de álcool gasto

#### 4.4 Análises químicas

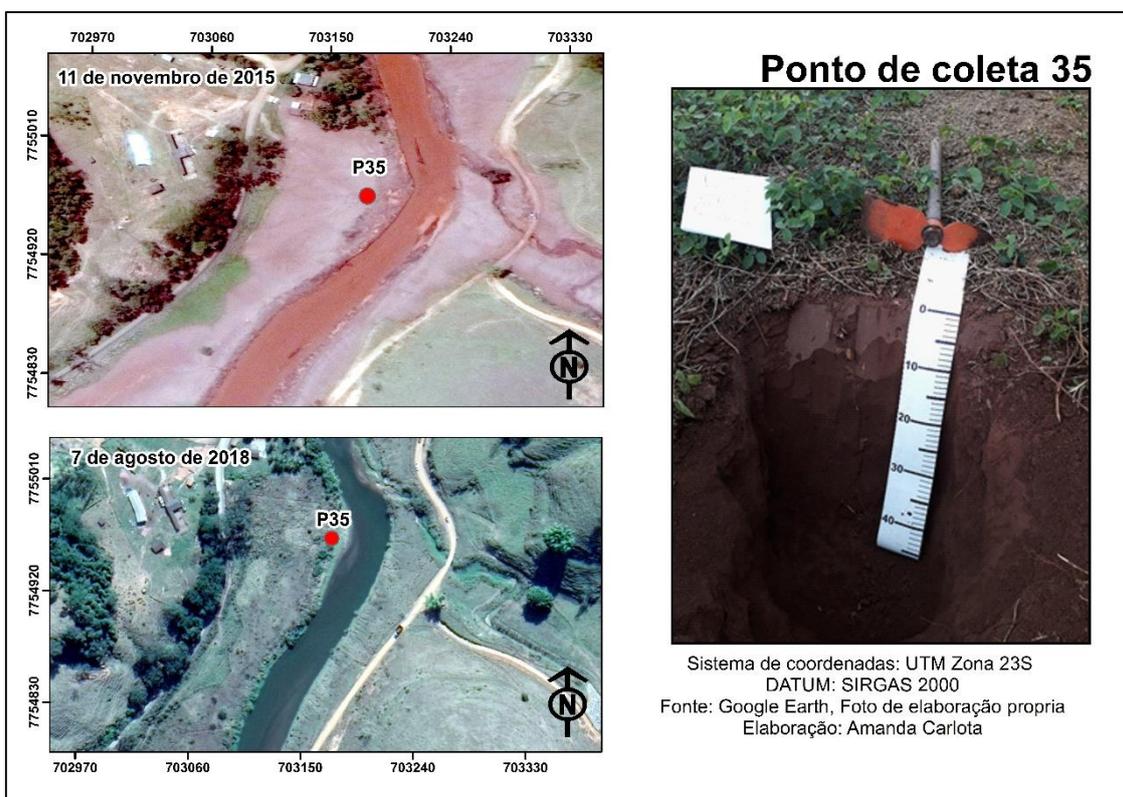
As análises químicas foram realizadas segundo metodologia do manual de métodos de análise do solo, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2011). Os teores de Cu, Fe, Mn, P e K foram extraídos por Melich-1. Cu, Fe e Mn foram quantificados por espectrofotometria de absorção atômica; O P foi dosado por espectrofotometria de absorção molecular segundo Braga e De Filippo (1974), e o K determinado por espectrofotometria de emissão em chama. Para a determinação do Ca, Mg foi utilizada solução KCl 1,0 mol/L sendo, para o Ca e Mg, realizada leitura em espectrofotômetro de absorção atômica. Para a determinação da acidez potencial (H+Al) foi utilizado o extrator acetato de cálcio 0,5 mol/L com ajuste para pH = 7 e dosagem por titulação com solução NaOH 0,025 mol/L utilizando como agente indicador fenolftaleína. O carbono orgânico foi quantificado pelo método Walkley-Black (1934).

O pH em água foi determinado por eletrodo imerso em suspensão utilizando-se a relação 1 : 2,5 (solo : líquido) com leitura em potenciômetro. Para a análise do pH em KCl 1 mol/L foi realizado o mesmo procedimento do pH em H<sub>2</sub>O substituindo a água pela solução. A acidez potencial (H + Al) foi analisada por extração com acetato de cálcio em pH 07 determinada por titulação em NaOH tendo como indicador a fenolftaleína.

## 5. RESULTADOS

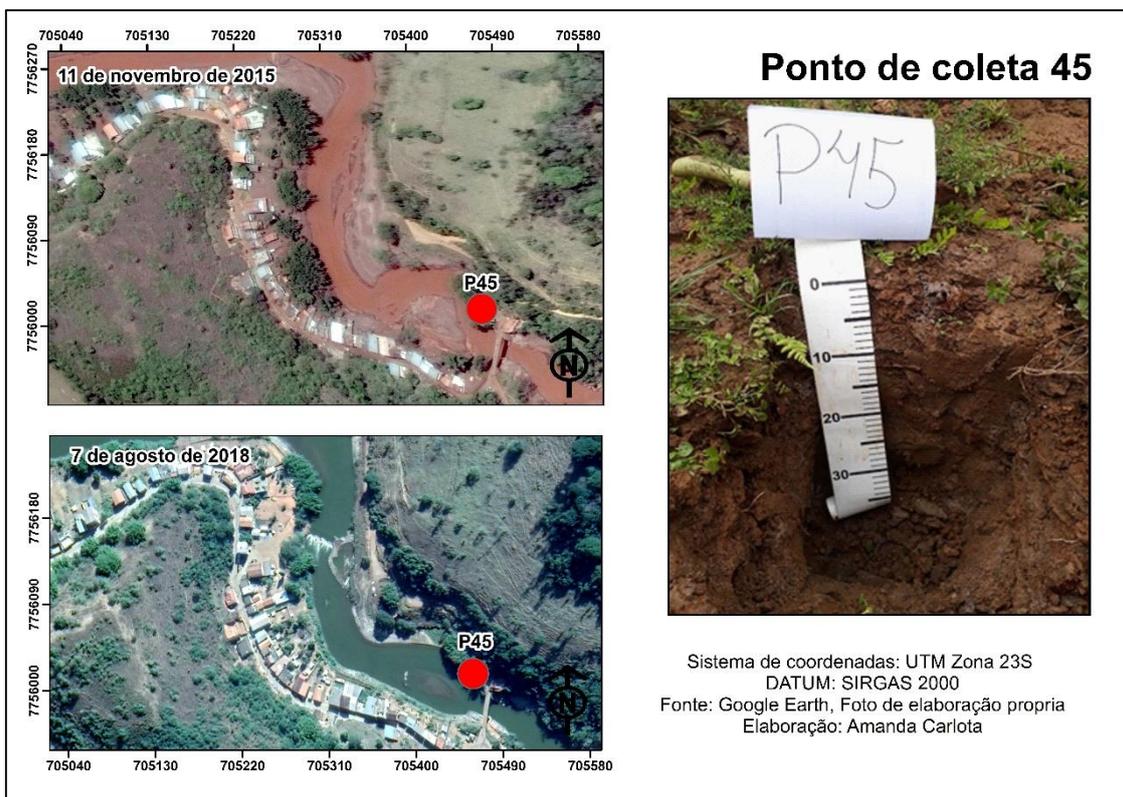
### 5.1 Descrição dos pontos de coleta

A seguir são apresentados a localização dos pontos de coleta bem como a descrição das observações de campo.



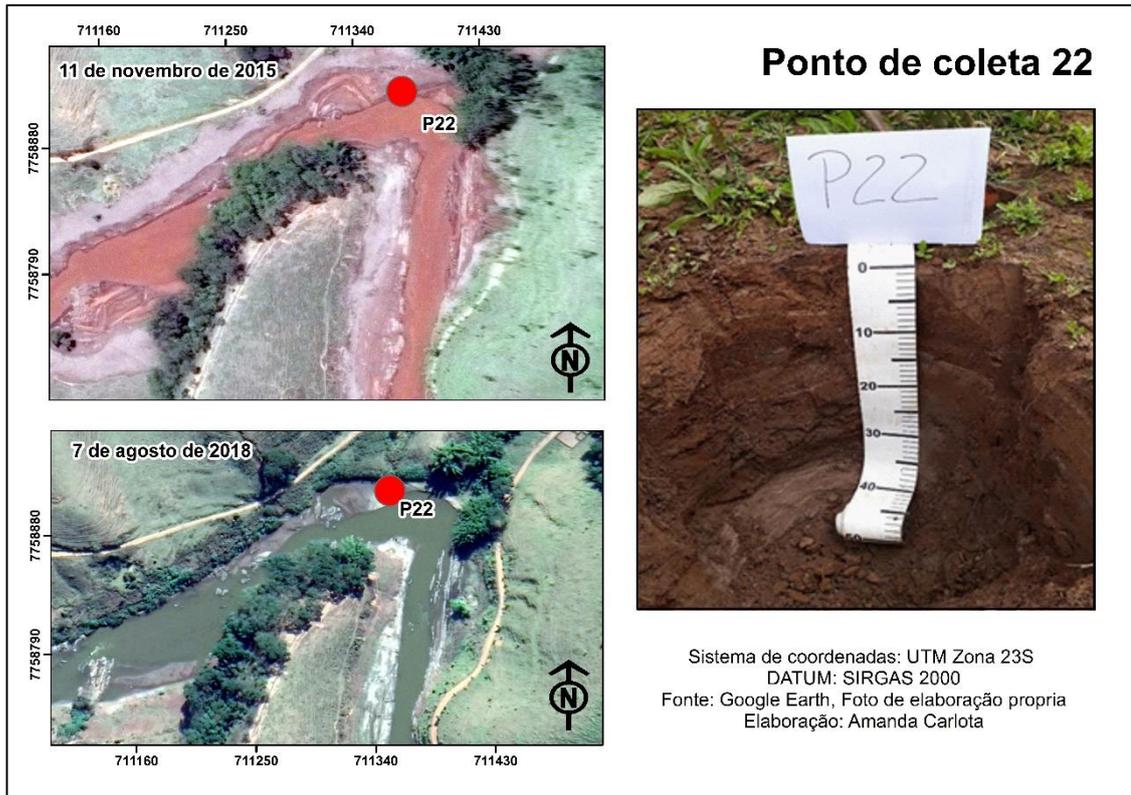
**Figura 7.** Ponto de coleta 35.

O ponto de coleta número 35 localiza-se à jusante do rio Gualaxo do Norte. Apresentou fraca atividade de térmitas. Até 10 centímetros apresentaram poucas raízes, presença de raízes médias, finas e raras ao longo do perfil. Apresentou raízes médias até 10 cm e raízes raras e finas até 40 cm. Presença de vegetação arbustiva, leguminosas e gramíneas espaçadas em touceiras. Local de pastagem. Presença de esterco. Estrutura maciça. Atividade biológica fraca.



**Figura 8.** Ponto de coleta 45.

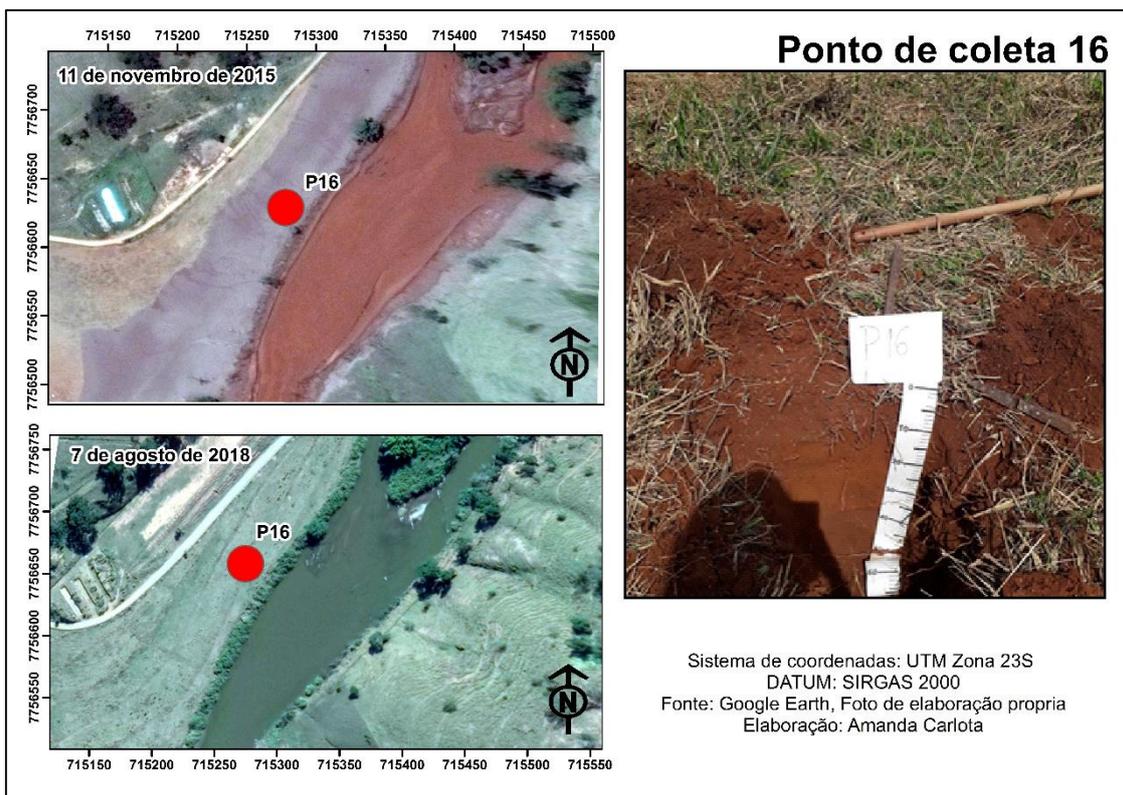
O ponto de coleta 45 localiza-se a montante do rio do Carmo. Área de leito menor, sujeito a encharcamento sazonal. Localiza-se a uns 20 metros do leito atual, uns 200 metros da ponte. Presença de lama misturada com material arenoso aparentemente da própria lama e não do Neossolo Flúvico. Vegetação esparsa, aparentemente espontânea. Raízes raras e finas até 20 cm, abaixo de 20 cm sem presença de raízes. Sem atividade biológica. Rejeito com muita areia, tudo misturado.



**Figura 9.** Ponto de coleta 22.

**Fonte:** Google Earth

O ponto de coleta 22 pertence a área de meandro do rio do Carmo. Foi observado vegetação natural, regeneração arbustiva espontânea do tipo herbácea, raízes raras e finas até 10 cm. Aparentemente, não houve adição de insumos químicos no local, não houve intervenção de recuperação, o material foi coletado diretamente sobre os rejeitos. Neossolo Flúvico.



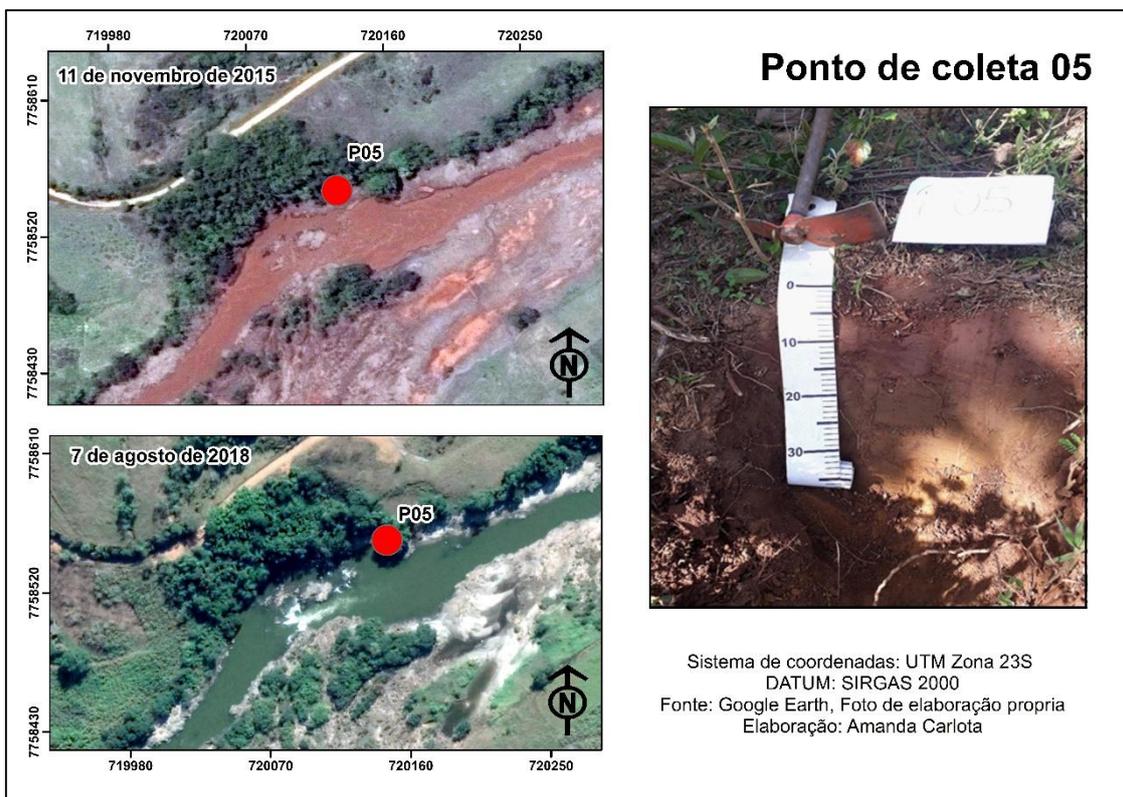
**Figura 10.** Ponto de coleta 16.

O ponto de coleta 16 pertence a área a 25 metros do leito menor. Uso destinado à pastagem (Fazenda Porto Alegre). Presença de braquiária irrigada desenvolvida com algumas invasoras. Foi misturado solo com rejeito (Topsoil com rejeito), adicionaram 35 cm de Topsoil. Presença de muitas raízes, médias profundas, Raízes saindo do topsoil e penetrando no rejeito a 38 cm. Raízes finas abundantes até 38 cm penetram no rejeito e tornam se raras finas no rejeito. Rejeito de 38 a 50 cm. Baixa atividade biológica. Obs: O topsoil de cima está um pouco misturado com a lama.



**Figura 11.** Ponto de coleta 13

No ponto de coleta 13 foi constatada a presença de vegetação espontânea, em sua maioria braquiária. Rejeito com 25 cm de espessura seguidos de Neossolo Flúvico decaptado, na camada C Raízes finas. No rejeito não tem raízes, de 25 a 65 presença de raízes finas.



**Figura 12.** Ponto de coleta 05.

**Fonte:** Google Earth

O ponto de coleta 05 se situa a jusante do rio Doce. Nas profundidade 0-5 cm encontra-se apenas lama, 5-15 cm lama, 15-35 cm C Flúvico, raízes raras de 0-15 cm, 5-15 cm raízes raras, 15- 35 cm raízes finas e comuns. Presença de vegetação invasora. Sem atividade biológica.

## 5.2. Atributos químicos

Os resultados obtidos para os atributos químicos analisados para os Tecossolos encontram-se nas tabelas 2 e 3.

**Tabela 2.** Resultados das análises químicas da primeira coleta (T0) dos Tecnosolos.

Variáveis		P35	P45	P22	P16	P13	P05
<b>pH</b>	H <sub>2</sub> O	7,16	6,95	7,71	6,27	7,91	7,17
<b>P</b>	mg/dm <sup>3</sup>	6	11,9	6,5	8,7	8,2	6,9
<b>K</b>		12	40	37	15	38	3
<b>Ca<sup>2+</sup></b>		1,06	1,38	1,55	1,23	1,19	0,95
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	0,23	0,38	0,03	0,04	0,05	0,02
<b>H+Al</b>		0,3	0,7	0,7	1	0,7	0,8
<b>CTC (T)</b>		1,65	2,62	3,88	2,4	2,16	1,69
<b>MO</b>	dag/kg	1,66	1,41	1,41	1,79	1,66	0,9
<b>P-rem</b>	mg/L	31,2	43	39,7	34,6	30,8	36
<b>Fe</b>		1309,8	162,4	133,2	183,5	171,9	165,7
<b>Pb</b>		2,38	2,58	1,17	2,51	3,46	1,58
<b>Cu</b>		1,68	1,29	1,05	1,15	1,04	0,88
<b>Mn</b>	mg/dm <sup>3</sup>	440	62,1	186,4	263,4	53,1	125,6
<b>Zn</b>		1,14	1,36	0,5	1,18	1,16	1,06
<b>Cr</b>		0,98	0,25	0,49	1,15	1,04	0,88
<b>Ni</b>		2,14	1,45	0,95	1,25	1,29	0,63
<b>Cd</b>		0,29	0,3	0,03	0,51	0,48	0,4
<b>V%</b>		81,8	73,3	82	58,3	67,3	58,6
<b>SB</b>		1,35	1,92	1,67	1,46	1	0,7
<b>t</b>	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	1,35	1,92	3,18	1,4	1,46	0,99

Fonte: Laboratório de rotina UFV.

**Tabela 3.** Resultados das análises químicas da segunda coleta (T1) dos Tecnosolos

Variáveis		P35	P45	P22	P16	P13	P05
<b>pH</b>	H <sub>2</sub> O	7,08	6,58	6,03	6,19	6,97	6,23
<b>P</b>		18,5	8,2	4,7	6,1	7,4	7,1
<b>K</b>	mg/dm <sup>3</sup>	132	87	53	100	62	144
<b>Ca<sup>2+</sup></b>		3,15	3,44	1,86	2,02	1,23	2,07
<b>Mg<sup>2+</sup></b>		0,79	1,44	0,71	0,69	0,19	1,13
<b>H+Al</b>		0,3	1,5	1,3	1,2	0,1	1,5
<b>CTC (T)</b>	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	4,58	6,6	4,01	4,17	1,68	5,07
<b>MO</b>	dag/kg	1,48	2,55	1,34	1,01	0,27	2,02
<b>P-rem</b>	mg/L	47,7	15,2	32,2	19,2	37,7	39,3
<b>Fe</b>		24	1215,3	668,2	32,4	67,1	70,9
<b>Pb</b>		0,88	0,79	0,12	0,42	0,5	1,48
<b>Cu</b>		0,11	6,51	2,81	4,46	0,7	0,97
<b>Mn</b>	mg/dm <sup>3</sup>	99,4	315,8	67,7	48	55	68,7
<b>Zn</b>		4,08	4,54	2,18	3,79	0,75	2,66
<b>Cr</b>		1,22	1,3	1,07	0,99	0,9	0,85
<b>Ni</b>		0,83	2,05	0,91	0,7	0,77	1,19
<b>Cd</b>		0,31	0,39	0,25	0,23	0,29	0,31
<b>V%</b>		93,4	77,3	67,6	71,2	94	70,4
<b>SB</b>		4,28	5,1	2,71	2,97	1,58	3,57
<b>t</b>	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	4,28	5,1	2,71	2,97	1,58	3,57

Fonte: Laboratório de rotina UFV.

### 5.3 Atributos Físicos

A granulometria dos Tecnosolos bem como sua classificação textural é descrita na tabela 4.

**Tabela 4.** Análise granulométrica da primeira e segunda coleta dos Tecnosolos.

Pontos de coleta		P35	P35	P45	P45	P22	P22	P16	P16	P13	P13	P05	P05
Tempo		T0	T1	T0	T1	T0	T1	T0	T1	T0	T1	T0	T1
Areia Grossa	dag/kg	6,3	25,6	9,6	0,6	4,7	25,4	4,9	5,8	4,7	3,5	4,8	7,5
Areia Fina		41,3	47,1	72,3	62,5	43,4	12,9	44,7	35,3	0,37	36,8	43	44,5
Silte		40,5	12,3	9,5	27,7	39,9	7,5	38,6	45,2	45,9	52,7	41,4	31,7
Argila		11,9	15	8,6	9,1	0,12	54,1	11,8	13,7	12,4	7	10,8	16,3
Classificação Textural		Franco siltosa	Franco arenosa	Areia franca	Franco arenosa	Franco siltosa	Argila	Franco siltosa	Franco siltosa	Silte	Franco siltosa	Franco siltosa	Franco siltosa
Porosidade (%)			30		52		32		29		23		27

**Fonte:** Laboratório de física do solo UFV.

A tabela a seguir apresenta as análises de densidade de partícula e densidade do solo para os dois tempos de coleta.

**Tabela 5.** Densidade de partícula e densidade do solo da primeira e segunda coleta.

Pontos de coleta		P35	P35	P45	P45	P22	P22	P16	P16	P13		P13	P05	P05
Tempo		T0	T1	T0	T1	T0	T1	T0	T1	T0		T1	T0	T1
Dens.Part		3,05	3,11	2,67	2,74	3,03	2,80	3,12	2,74	3,07		3,16	2,99	3,01
Densidade do solo	g/cm <sup>3</sup>		2,19		1,34		1,42		1,97			2,45		2,25

**Fonte:** Laboratório de física do solo UFV.

## 6. DISCUSSÃO

### 6.1. Atributos Químicos

As análises químicas e físicas serão discutidas principalmente sob o ponto de vista agrônomo de acordo com com Ribeiro et al. (1999), e com base nos solos do entorno de acordo com Schaefer et. al (2016).

Para a classificação do solo em aspectos químico e agrônomo a partir dos valores de pH utilizou-se a proposta sugerida por Ribeiro et al. (1999), conforme tabela a seguir.

**Tabela 6.** Classificação Química e Agrônoma

<b>Classificação Química</b>						
Acidez muito elevada	Acidez elevada	Acidez Média	Acidez Fraca	Neutra	Alcalinidade Fraca	Alcalinidade Elevada
< 4,5	4,5 – 5	5,1 – 6	6,1 – 6,9	7	7,1 – 7,8	>7,8
<b>Classificação Agrônoma</b>						
Muito Baixo	Baixo	Bom	Alto	Muito Alto		
< 4,5	4,5 – 5,4	5,5 – 6	6,1 – 7	>7		

Fonte: Ribeiro et al. (1999).

Para a interpretação do pH em água feitas na primeira coleta (Tabela 2), o pH em água foi considerado muito alto para a classificação agrônoma (maior que 7) no P35, P22, P13 e P05 e alto para a classificação agrônoma (de 6,01 a 7,0) em P45 e P16. Nas análises químicas da segunda coleta (Tabela 3) o pH foi considerado muito alto no P45 e alto nos outros pontos. Os solos de referência (Tabela 7) foram classificados como bons segundo a classificação agrônoma, apresentando pHs bem mais baixos do que os pHs dos Tecnosolos, com valores de 5,65 no Neossolo Flúvico e 5,77 nos Cambissolos. O pH dos Tecnosolos é maior do que nos solos de referência, quando o pH aumenta a acidez potencial reduz. Em ambos os solos de referência a acidez potencial é muito maior do que nos Tecnosolos. Uma explicação para o pH ter reduzido das análises da primeira coleta para a segunda pode ser por causa da acidez produzida pela respiração proveniente da atividade biológica.

**Tabela 7.** Tabela dos solos de referência.

Análises Químicas		Neossolo Flúvico	Cambissolo
		Média	Média
<b>pH</b>	H <sub>2</sub> O	5,65	5,77
	KCl	4,91	4,6
<b>P</b>		11,05	5,38
<b>K</b>	mg/dm <sup>3</sup>	15,87	46,67
<b>Na</b>		5,23	4,88
<b>Ca<sup>2+</sup></b>		1,61	1,76
<b>Mg<sup>2+</sup></b>		0,57	0,48
<b>Al<sup>3+</sup></b>		0,07	0,14
<b>H+Al</b>	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	1,53	3,28
<b>CTC (T)</b>		3,78	5,67
<b>MO</b>	dag/kg	0,85	1,42
<b>P-rem</b>	mg/L	29,57	24
<b>Fe</b>		610,3	604,72
<b>Pb</b>	mg/dm <sup>3</sup>	0,73	1,57

Fonte: (Schaefer et al., 2015)

A disponibilidade do fósforo nas análises químicas da primeira coleta (Tabela 2) feitas de acordo com a interpretação sugerida por Ribeiro et al. (1999), foi considerada muito baixa nos pontos P35, P22, P16, P13, P05 e bom no ponto P45 e nas análises da segunda coleta (Tabela 3) o fósforo foi considerado muito bom em P35, bom em P45 e muito baixa em P22, P16, P13 e P05. De acordo com as análises dos solos de referência (Tabela 7), o fósforo também foi considerado muito baixo. Comparando-se as análises químicas da primeira coleta com as da segunda coleta (Tabelas 2 e 3) nota-se que a disponibilidade do fósforo teve variação nas classes de disponibilidade apenas para o ponto P35. A disponibilidade do fósforo não variou muito da primeira análise para a segunda devido ao fósforo apresentar baixa mobilidade. Segundo Klein et al.(2012), o fósforo, no geral, permanece onde é adicionado. A transferência do fósforo por percolação é pouco considerada em virtude dessa baixa mobilidade. No entanto, o excesso de

fósforo em superfície alerta para a sua transferência via escoamento superficial o que representa risco à qualidade da água. (STEFANUTTI et al,1994)

O potássio nas análises da primeira coleta (tabela 2) dos Tecnosolos foi considerado muito baixo para os pontos P35, P16, P05 e baixo para os outros pontos, já em relação às análises da segunda coleta, as classes de disponibilidade para os pontos foram, média para os pontos P22 e P13, Bom para P35 e muito bom para P45, P16 e P05. Nos solos de referência (tabela 8) o elemento potássio se apresentou como baixo no Neossolo Flúvico e médio no Cambissolo. Comparando os Tecnosolos da primeira coleta com os da segunda coleta constatou-se que houve uma melhora na disponibilidade de potássio em alguns pontos constatando que pode ser que tenha sido feita fertilização potássica na área em estudo.

O cálcio trocável nas análises químicas da primeira coleta foram feitas de acordo com a interpretação sugerida por Ribeiro et al. (1999), foi considerado baixo em P35, P13, P05 e médio nos outros pontos. Nas análises químicas da segunda coleta dos Tecnosolos o cálcio foi considerado bom em P45 e P35 e médio nos outros pontos. Sendo que em comparação com os solos de referência o cálcio foi considerado médio no Neossolo Flúvico e no Cambissolo. Ao comparar as análises da primeira coleta com as da segunda coleta percebe-se que o P35 que foi considerado baixo passou a ser considerado como bom, o P45 passou de médio para bom, os pontos P22 e P16 não variaram sua classe de disponibilidade e os pontos P13 e P05 alternaram de médio para bom.

Comparando as duas análises químicas realizadas, observa-se que o  $\text{Ca}^{2+}$ , apresentou uma média de valores em  $1,23 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$  e desvio padrão de  $0,20 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$  (Tabela 8), para a primeira análise realizada. Na análises da segunda coleta, o cálcio apresentou média de  $2,30$  e desvio padrão de  $0,76$ . Sendo que em comparação com os solos da região o cálcio trocável foi considerado médio no Neossolo Flúvico e no Cambissolo. Normalmente recomenda-se calagem em solos ácidos com o objetivo de elevar o pH do solo até a faixa considerada adequada agronomicamente e disponibilizar cálcio para as plantas, segundo Ribeiro et al. (1999). Que não é o caso de nenhuma das análises em estudo. A variação dos valores de cálcio, indica que pode ser que utilizaram calagem nos pontos que apresentaram variação da disponibilidade de  $\text{Ca}^{2+}$ , mesmo essa operação não sendo necessária devido aos valores de pH encontrados nas análises feitas na primeira coleta. Portanto, a elevação dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$ , com queda de pH, conforme consta nas análises realizadas, pode estar relacionada com a utilização de compostos de  $\text{Ca}^{2+}$  associados a um anión proveniente de ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ).

**Tabela 8.** Avaliação do coeficiente de variação (CV%) e do desvio padrão (S) das amostras de rejeito.

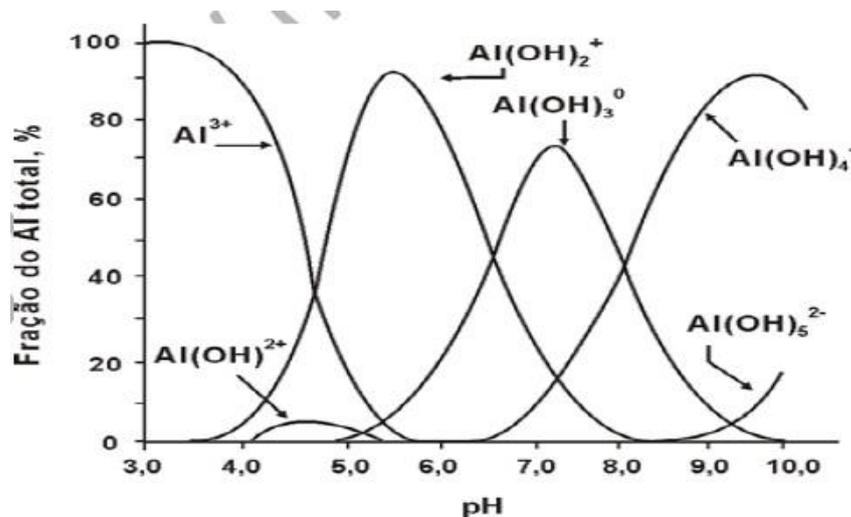
Variáveis Químicas	Análises 4 meses			Análises atuais		
	MÉDIA	S	CV%	MÉDIA	S	CV%
pH H <sub>2</sub> O	7,20	0,53	7,38	6,51	0,40	6,12
P	8,03	1,97	24,47	8,67	4,53	52,30
K	24,17	14,64	60,60	96,33	33,42	34,69
Ca <sup>2+</sup>	1,23	0,20	16,09	2,30	0,76	33,24
Mg <sup>2+</sup>	0,13	0,13	107,80	0,83	0,39	47,13
Acidez potencial	0,70	0,21	29,74	0,98	0,57	57,65
SB	1,60	0,80	50,02	3,37	1,13	33,55
T	1,72	0,71	41,27	3,37	1,13	33,55
T	2,40	0,75	31,19	4,35	1,47	33,71
V%	70,22	9,73	13,86	78,98	10,80	13,68
MO	1,47	0,29	19,75	1,45	0,72	50,01
P-Rem	35,88	4,37	12,18	31,88	11,39	35,72
Cu	1,18	0,25	21,56	2,59	2,28	88,01
Mn	188,43	133,62	70,91	109,10	93,83	86,00
Fe	354,42	427,53	120,63	346,32	450,00	129,94
Zn	1,07	0,27	25,22	3,00	1,29	43,06
Cr	0,80	0,32	40,18	1,06	0,16	15,37
Ni	1,29	0,47	36,23	1,08	0,46	43,05
Cd	0,34	0,16	47,54	0,30	0,05	17,26
Pb	2,28	0,74	32,37	0,70	0,43	61,42

S = Desvio padrão das amostras; CV = coeficiente de variação (%)

Em relação ao magnésio das análises realizadas na primeira coleta, o P35 apresentou disponibilidade baixa, o P45 apresentou boa disponibilidade e os outros pontos apresentaram disponibilidade muito baixa. Para as análises da segunda coleta, o P35 e P05 apresentaram boa disponibilidade, o P13 foi classificado como baixa e os demais pontos apresentaram média disponibilidade. Para a amostra realizada na primeira coleta, o Mg<sup>2+</sup> apresentou média de dispersão de 0,13 e desvio padrão de 0,13. Em relação as análises atuais, o valor de média foi de 0,83 e desvio padrão de 0,39. O aumento dos teores de Mg<sup>2+</sup>, pode estar relacionado com a realização de calagem nos pontos que apresentaram elevação da disponibilidade deste elemento, pois os calcários possuem teores que podem variar de 5 a 12% de MgO, de acordo com sua classificação técnica (calcítico, magnesiano ou dolomítico).

A acidez potencial nas análises químicas realizadas na primeira coleta de acordo com a interpretação sugerida por Ribeiro et al. (1999) foi muito baixa em todos os pontos amostrados. Em relação às análises da segunda coleta, as classes foram muito baixas para os pontos P35 e P13 e baixa para os demais pontos. Em relação aos valores estatísticos, os pontos da primeira

coleta, apresentaram média de 0,70 e desvio padrão de 0,21. Para as amostras da segunda coleta, os valores de média e desvio padrão foram 0,98 e 0,57 respectivamente. Os valores encontrados de acidez potencial está relacionado com o  $H^+$  retidos na CTC, pois conforme Marion et al. (1976), em valores de pH superior a 5,6, o  $Al^{3+}$  é complexado em outras formas de Al, que não são tóxicas para as plantas, conforme figura 12 a seguir.



**Figura 13.** Proporção das formas de Al em função do pH.

**Fonte:** (Marion et al., 1976).

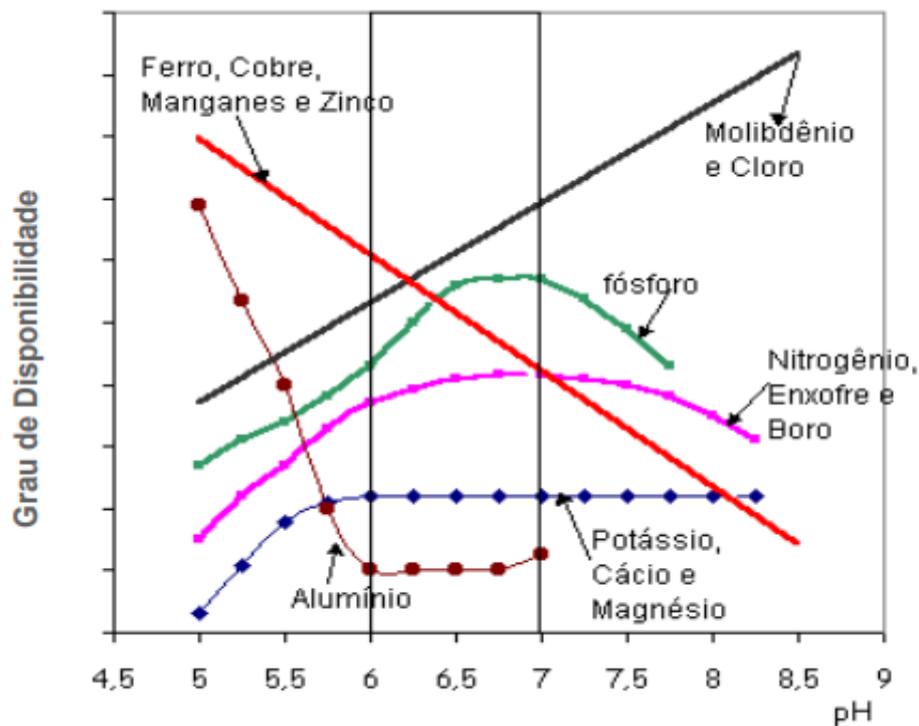
A capacidade de troca catiônica CTC (T) nas análises químicas da primeira coleta de acordo com a interpretação sugerida por Ribeiro et al. (1999) foi considerada baixa em todos os pontos. Já nas análises químicas da segunda coleta a capacidade de troca catiônica CTC foi considerada baixa em P22, P16, P13 e média em P35, P45, e P05. A elevação da CTC (T), entre a análise da primeira coleta e as análises da segunda coleta, está relacionada com aumento dos valores de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ , pois esta está relacionada com a Soma de Base SB mais  $H+Al$ , indicando que houve aumento da quantidade de cátions retidos no complexo sortivo. Para a amostra realizada na primeira coleta, a CTC apresentou média de dispersão de 2,40 e desvio padrão de 0,75. Em relação às análises da segunda coleta, o valor de média foi de 4,35 e desvio padrão de 1,47.

A matéria orgânica (MO) nas análises químicas da primeira coleta foram feitas de acordo com a interpretação sugerida por Ribeiro et al. (1999), foi considerada muito baixa em P05 e baixa nos outros pontos. Nas análises químicas da segunda coleta a matéria orgânica foi considerada baixa em P35, P22 e P16. Muito baixa em P13 e média em P45 e P05. A variação dos valores de MO está relacionado com o aporte de compostos orgânicos, proveniente da parte

aérea e sistema radicular das plantas, juntamente com a atividade biológica dos microrganismos. Como houve a supressão da cobertura vegetal devido ao derrame de rejeito de minério de ferro, a matéria orgânica tende a aumentar com o tempo, devido a baixa presença de plantas na área, seja de forma natural ou em procedimentos de revegetação. Para a amostra realizada na primeira coleta, a MO apresentou média de dispersão de 1,47 dag/kg e desvio padrão de 19,75 dag/kg. Em relação às análises da segunda coleta, o valor de média foi de 1,45 dag/kg e desvio padrão de 0,72. O coeficiente de variação da MO aumentou da primeira coleta para a segunda, foi 19,75 dag/kg para 50,0 dag/kg. Isso significa que a quantidade de matéria orgânica aumentou e está variando de um ponto para o outro mais na segunda coleta do que na primeira coleta.

O fósforo remanescente (P-rem) nas análises químicas da primeira coleta após o derramamento do rejeito de acordo com a interpretação sugerida por Ribeiro et al. (1999) foi considerada de acordo com o teor de argila muito bom em todos os pontos. Nas análises da segunda coleta o fósforo remanescente (P-rem) de acordo de acordo com o teor de argila foi considerado baixo em P45. Bom em P22, P16, P13, P05 e muito bom em P35. Para a amostra realizada na primeira coleta, o fósforo remanescente apresentou média de dispersão de 35,88 mg/L e desvio padrão de 4,37 mg/L. Em relação as análises da segunda coleta, o valor de média foi de 31,88 mg/L e desvio padrão de 11,39 mg/L.

A elevação do pH afeta diretamente a disponibilidade dos nutrientes, em especial os micronutrientes que reduzem a disponibilidade com o aumento do pH, conforme Figura 13 de grau de disponibilidade de nutrientes em relação ao pH.



**Figura 14.** Disponibilidade de nutrientes em função do pH do solo.

**Fonte:** Malavolta, 1976.

Porém para o ferro observa-se que mesmo em pH elevado a classe de disponibilidade está muito alta. Este fato está relacionado com valores elevados de ferro presente em todos os pontos de coleta, da primeira coleta e da segunda coleta, corroborando com as análises feitas por Schaefer et al. (2016) que encontraram níveis médios de Fe de  $499,2 \text{ mg/dm}^3$  em amostras de rejeitos da mesma região, semelhantes aos encontrados neste estudo. Os teores elevados de ferro estão relacionados com o derramamento do rejeito de minério de ferro.

A disponibilidade do ferro nas análises químicas da primeira coleta de acordo com a interpretação sugerida por Ribeiro et al. (1999), foi considerada muito alta em todos os pontos. Nas análises químicas da segunda coleta a disponibilidade do ferro foi considerada médio em P45. Alto em P16 e P13. Muito alto em P35, P22 e P05. Para a amostra realizada na primeira coleta, o ferro apresentou média de dispersão de  $354,42 \text{ mg/dm}^3$ , desvio padrão de  $427,53 \text{ mg/dm}^3$  e coeficiente de variação de  $120,63 \text{ mg/dm}^3$ . Em relação as análises da segunda coleta, o valor de média foi de  $346,32 \text{ mg/dm}^3$ , desvio padrão de  $450,00 \text{ mg/dm}^3$  e coeficiente de variação de  $129,94 \text{ mg/dm}^3$ . Esses valores estatísticos mostram que o elemento ferro variou muito de um ponto de coleta para o outro, principalmente nas análises da segunda coleta.

A disponibilidade do cobre nas análises químicas da primeira coleta de acordo com a interpretação sugerida por Ribeiro et al. (1999), foi considerada bom em P35, P22, P16, P13 e médio nos outros pontos. Nas análises químicas da segunda coleta a disponibilidade do cobre foi considerado baixa em P13. Médio em P35, P05 e alto P45, P22 e P16. Para a amostra realizada na primeira coleta, o cobre apresentou média de dispersão de 1,18 e desvio padrão de 0,25. Em relação às análises da segunda coleta, o valor de média foi de 2,59 e desvio padrão de 2,28.

Em relação à disponibilidade do manganês nas análises da primeira coleta de acordo com a interpretação sugerida por Ribeiro et al. (1999), foi considerada muito alto em todos os pontos de coleta. Nas análises da segunda coleta a disponibilidade do manganês foi considerada muito alto em todos os pontos de coleta. Para a amostra realizada na primeira coleta, o manganês apresentou média de dispersão de 188,43 e desvio padrão de 133,62. Em relação às análises da segunda coleta, o valor de média foi de 109,10 e desvio padrão de 93,83. O coeficiente de variação do manganês foi de 70,91 na primeira coleta e 86,00 na segunda coleta. O alto teor de Mn pode estar relacionado ao rejeito vindo do Quadrilátero Ferrífero. Segundo Costa (2003) e Carvalho Filho (2008) é notável o elevado teor de Mn em alguns solos do Quadrilátero Ferrífero.

O zinco nas análises químicas da primeira coleta de acordo com a interpretação sugerida por Ribeiro et al. (1999), foi considerada baixo em P22, médio em P35, P45 e bom nos outros pontos. Nas análises da segunda coleta foi considerada baixo em P13 e alto em todos os outros pontos de coleta. Para a amostra realizada na primeira coleta, o zinco apresentou média de dispersão de 1,07 e desvio padrão de 0,27. Em relação às análises da segunda coleta, o valor de média foi de 3,00 e desvio padrão de 1,29. O coeficiente de variação do zinco aumentou da primeira coleta para a segunda coleta, foi de 25,22 para 43,06.

Embora a concentração dos metais pesados encontrados nos Tecnoossolos estejam baixos, a interferência antrópica é considerada a principal responsável pelo aumento da concentração de metais pesados no solo. Alloway (1995) aponta ainda as principais fontes antropogênicas: insumos agrícolas, resíduos de mineração, queima de combustível fóssil, lodo de esgoto, indústrias químicas e depósito de resíduos.

Os elementos Fe e Mn foram encontrados na primeira coleta com níveis médios de 354, 42 e 188,43 mg/dm<sup>3</sup>, respectivamente, e 346, 32 e 109,10 mg/dm<sup>3</sup>, respectivamente na segunda coleta. Embora Mn e Fe sejam micronutrientes vegetais, altos níveis como os encontrados nos rejeitos podem ser tóxicos para plantas. Segundo KONZEN et al. (2005), os micronutrientes encontrados no solo em estado natural como o Cu, Zn e Mn são essenciais ao desenvolvimento das plantas, mas podem causar impactos negativos quando em proporções acima do normal. Esses elementos merecem uma atenção especial em função da capacidade de acumulação no perfil do solo com risco de contaminação da água subterrânea por processo de lixiviação e pela tendência de acumulação em profundidade.

Para a interpretação de Soma de Bases (SB) nas análises químicas da primeira coleta de acordo com a interpretação sugerida por Ribeiro et al. (1999), o P05 foi considerado muito baixo, P45 e P22 médios e os outros pontos foram considerados baixos. Para a interpretação de Soma de Bases das análises químicas da segunda coleta o P13 foi considerado baixo. P35 e P45 foram considerados bons. P22, P16 e P05 foram considerados médios. A soma de base aumentou devido ao aumento das bases trocáveis no solo. Este fato pode estar relacionado com calagem e fertilização.

A Saturação por bases (V) nas análises químicas da primeira coleta de acordo com a interpretação sugerida por Ribeiro et al. (1999) foi considerada muito bom em P35, P22. Bom em P45, P13 e médio em P16 e P05. Nas análises químicas da segunda coleta a saturação por bases (V) em P45, P22, P16, P05 foram considerados bom em P35, P13 muito bom. Nas análises da primeira coleta de acordo com a interpretação por Ribeiro et. al (1999) todos os pontos analisados foram considerados eutróficos (V% foi maior que 50 em todos os pontos). O aumento da saturação por base se deu devido a elevação dos teores de cálcio e magnésio trocáveis na CTC.

### **6.1.2 Classificação das variáveis químicas em classes de disponibilidade.**

Os valores relacionados as variáveis químicas dos Tecnosolos, foram classificados em oito classes de disponibilidade, segundo proposta por Ribeiro et al. (1999), indicando sua disponibilidade para fins agronômicos.

**Tabela 9.** Classificação das variáveis químicas da primeira coleta dos Tecnossls.

Variáveis químicas	PONTOS DE COLETA DE REJEITO					
	P35	P45	P22	P16	P13	P05
pH	MA	A	MA	A	MA	MA
P	MBA	B	MBA	MBA	MBA	MBA
K	MBA	BA	BA	MBA	BA	MBA
Ca+	BA	M	M	M	BA	BA
Mg 2+	BA	B	MBA	MBA	MBA	MBA
H+Al	MBA	MBA	MBA	MBA	MBA	MBA
CTC (T)	BA	BA	BA	BA	BA	BA
MO	BA	BA	BA	BA	BA	MBA
P – rem	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Fe	A+	A+	A+	A+	A+	A+
Cu	B	M	B	B	B	M
Mn	A+	A+	A+	A+	A+	A+
Zn	M	M	M	B	B	B
SB	BA	M	B	BA	BA	BA
V	MB	B	MB	M	B	M

A+ = Altíssima (Classe criada para níveis críticos); **MA** = Muito Alta; **A** = Alta; **M** = Média; **MB** = Muito bom; **B** = Bom; **BA** = Baixa; **MBA** = Muito baixa.

**Tabela 10.** Classificação das variáveis químicas da segunda coleta

Variáveis químicas	PONTOS DE COLETA DE REJEITO					
	P35	P45	P22	P16	P13	P05
pH	A	MA	A	A	A	A
P	MB	B	MBA	MBA	MBA	MBA
K	B	MB	M	MB	M	MB
Ca+	B	B	M	M	M	M
Mg 2+	B	M	M	M	BA	B
H+Al	MBA	BA	BA	BA	MBA	BA
CTC (T)	M	M	BA	BA	BA	M
MO	M	BA	BA	BA	MBA	M
P – rem	BA	MB	B	B	B	B
Fe	A+	M	A+	A	A	A+
Cu	A	M	A	A	BA	M
Mn	A+	MA	A+	A+	A	A+
Zn	A	A	A	A	BA	A
SB	B	B	M	B	MB	B
V	MB	B	B	B	MB	B

A+ = Altíssima (Classe criada para níveis críticos); **MA** = Muito Alta; **A** = Alta; **M** = Média; **MB** = Muito bom; **B** = Bom; **BA** = Baixa; **MBA** = Muito baixa

## 6.2 Atributos Físicos

Fisicamente, os Tecnosolos configuram-se como um substrato residual rico em areia fina e silte, com classificação textural franco arenosa em quase todos os pontos de coleta da primeira e segunda coleta, com exceção do P22, onde a classificação textural foi bem diferente dos outros pontos devido ao ambiente estar em possível mudança dada a processos de recuperação que aconteceram no local. Apesar dos Tecnosolos se configurarem como um material heterogêneo a priori, os pontos apresentaram uma certa homogeneidade na classificação textural.

O rejeito foi caracterizado como altamente compactado e apresentou baixa porosidade em todos os pontos de coleta. A falta de estrutura e a alta compactação pode ser um entrave à recuperação natural.

A densidade de partícula de um modo geral foi alta devido ao mineral hematita que apresenta uma alta massa específica. A densidade de partículas é bem mais elevada pela alta densidade do minério de ferro dando valores de 2,67 a 3,16 g/cm<sup>3</sup>.

Foi observado um aumento na densidade de partículas comparando as análises da primeira coleta com a segunda coleta, já que as partículas mais densas tendem a se reacomodar em subsuperfície. A DP aumentou nos pontos P35, P45, P13, P05 e diminuiu nos pontos P22 e P16.

Não foram coletadas amostras indeformadas de T0 para análise de densidade do solo. O material encontrava-se pastoso, sendo impossível a coleta de amostras indeformadas.

## 6. CONCLUSÕES

Os Tecnosolos formados pela deposição de rejeitos nas margens desses rios possuem limitações químicas e físicas para fins agrônômicos. O rejeito é um substrato muito menos poroso do que o solo que é mais poroso e tem mais atividade biológica gerando essa aeração que é importante inclusive para dar sustentação ao sistema radicular das plantas. A alta compactação interfere na infiltração da água, o que aumenta o escoamento superficial e o carreamento de sedimentos composto por rejeito de minério de ferro para os rios podendo gerar

uma contaminação crônica por metais residuais e potencialmente o acúmulo de traços de metais nos seres vivos.

Em alguns pontos foi observada uma melhora da atividade biológica, características físicas e melhor desenvolvimento de raízes devido a intervenções de recuperação. Porém em outros pontos de coleta depois de quase três anos após o desastre, pontos que não tiveram intervenção de recuperação apresentaram muito pouca atividade biológica (raízes finas e raras ao longo dos perfis), presença de vegetação invasora e espontânea.

Quanto as análises químicas, o material analisado tem reduzida capacidade de resistir a mudança do pH devido a textura franca. A acidez proveniente do gás carbônico produzida pelas plantas e raízes fez o pH reduzir da primeira para a segunda coleta. Foram encontradas baixas concentrações de metais pesados nos Tecnosolos, exceto para Fe e Mn.

## 7. REFERÊNCIAS

- ANA. **Agência Nacional de Àguas**. 2010. Disponível em: <  
<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/sala-de-situacao/rio-doce/rio-doce-saiba-mais>> .  
Acessado em: 03/07/2018.
- ALKMIM, F. F. **O que faz de um cráton um cráton? O Cráton São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo**. In: MANTESSO-NETO, Virgínio;
- ALMEIDA, F. F. M. **O Cráton do São Francisco**. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 7, n. 4, p. 349-364, dez. 1977.
- ALLORE MINERAÇÃO. **Mercado**. 2012. Disponível em: <  
[http://www.allore.com.br/allore/web/conteudo\\_pt.asp?idioma=0&conta=28&tipo=27261](http://www.allore.com.br/allore/web/conteudo_pt.asp?idioma=0&conta=28&tipo=27261)>. Acessado em: 04/07/2018.
- ALLOWAY, B. J **The origin of heavy metals in soils**. In: Alloway, B. J. Heavy metals in soils. New York: John Wiley & Sons, 1990. p.29-39.
- BARTORELLI, Andréa; CARNEIRO, Celso Dal Ré; NEVES, Benjamin Bley de Brito (Org.). **Geologia do continente Sul Americano**. São Paulo: Beca, 2004. p. 17-35.
- BRAGA, J.M. & DE FILIPPO, B.V. **Determinação espectrofotométrica de fósforo em substratos de solos e plantas**. Ceres. Viçosa. Universidade Federal de Viçosa. 21:73-85. 1974.
- CARVALHO FILHO, A. de. **Solos de ambientes do Quadrilátero Ferrífero (MG) e aptidão silvicultural dos Tabuleiros Costeiros**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 2008. 245p.
- COSTA, S. A. D. **Caracterização química, física, mineralógica e classificação de solos ricos em ferro do Quadrilátero Ferrífero**. Tese (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa, MG. 2003. 71p.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Geoparque Quadrilátero Ferrífero. Proposta**. Belo Horizonte, MG. 2012. 188p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Sumário Mineral**. Brasília: DNPM, 2015. Acesso em: setembro. 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Informe Mineral**. Brasília: DNPM, 2014. Acesso em: setembro. 2018.
- DORR II, John Van N.; et al. **Esboço Geológico do Quadrilátero Ferrífero**. Minas Gerais, Brasil. Publicação Especial. DNPM, Rio de Janeiro, n. 1, 25 nov. 1959.

- DORR II, John Van N. **Physiographic, stratigraphic and structural development of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil.** U.S. Geological Survey Professional Paper, v.641A, p.1-110, 1969.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise do solo.** 2.ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisas de Solos, 1997. 212p.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos.** Rio de Janeiro: Embrapa solos, 2011. 230 p. (Documentos 132).
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). 2. ed. – Rio de Janeiro : EMBRAPA-SPI, 2006.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. 2006. **World reference base for soil resources 2006.**
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – FEAM. **Inventário estadual de barragens do estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: FEAM, 2011. 31 p.
- FILHO, A. C. **Solos e ambientes do quadrilátero ferrífero (mg) e aptidão silvicultural dos tabuleiros costeiros.** Tese. UFLA. 2008.
- FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Estudos integrados de recursos naturais: bacia do A São Francisco e parte central da área mineira da SUDENE: pedologia.** Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia/CETEC, 1983. 301p. Relatório final e mapas.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. **Informações e análises da economia mineral brasileira.** 7ª Edição. 2012.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM 2009. Disponível em: < <http://www.ibram.org.br/> >. Acesso em: 18 set. 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. 2015. **Lauda Técnico Preliminar.** Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Nov. 2015. 38p.
- KLEIN, C.; AGNE, S. A. A. **Fósforo: de nutriente à poluente.** In: Ver. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental/ UFSM. V.8, n°8, P. 1713-1721, 2012.
- KONZEN, E. A. et al. **Manejo de esterco líquido de suínos e sua utilização na adubação do milho.** Sete Lagoas: EMBRAPACNPMS, 1997. 31 p.(EMBRAPA-CNPMS. Circular Técnica, 25).

- LACAZ, F. A. C.; PORTO, M. F. S.; PINHEIRO, T. C. M. **Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/Samarco**. Revista brasileira de saúde ocupacional. vol.42. São Paulo. 2017
- MACHADO, Nuno; CARNEIRO, Maurício Antônio. Canadian Journal of Earth Sciences, Ottawa, v. 29, n. 11, p. 2341-2346, nov. 1992.
- MARENT, B. R.; LAMOUNIER, W. L; GONTIJO, B. M. **Conflitos ambientais na Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero – MG: mineração x preservação**. *Revista Geografias*, v.7 n.1, pp. 99-113. 2011.
- MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1976. 410 p.
- MARION, G. M.; HENDRICKS, D. M.; DUTT, G. R. & FULLER, W. H. Aluminum and silica solubility in soils. **Soil Science**, v. 121, p. 76-85, 1976.
- MILANEZ, B.; LOSEKANN, C. **Desastre no Vale do Rio Doce: antecedentes, impactos e ações sobre a destruição**. Folio Digital: Letra e Imagem, Rio de Janeiro. 2016.
- MUSEU DE HISTORIA NATURAL E JARDIM BOTANICO – MHNJB. **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico – UFMG**, Belo Horizonte. v. 24, n.1, 2015.
- NUNES, M, A. J.; COSTA, S. G.; SILVA, R.G. **O QUADRILÁTERO FERRÍFERO E O NORTE DE MINAS GERAIS: ANÁLISE DA HISTÓRIA E IMPORTÂNCIA ECONÔMICA**. Artigo desenvolvido durante a disciplina: Geografia do Comércio e Circulação, – 1º/2012.
- REZENDE, V. L. **A mineração em minas gerais: uma análise de sua expansão e os impactos ambientais e sociais causados por décadas de exploração**. Revista Sociedade & Natureza, Uberlândia, v 28 : pp. 375-384. 2016.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. **Qualidade do solo e sustentabilidade de sistemas agrícolas**. Ciências e Ambiente, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 29-48, 2003.
- RIBEIRO, A. C; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V. A, H. **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Mina Gerais – 5º aproximação**. Viçosa 1999. 359 p
- RIBEIRO, L. F. M.; FILHO, L. H. A. **Avaliação da densidade in situ de barragens de rejeitos com o penetrológico**. Revista Escola de Minas, vol.57 n.4. Ouro Preto. 2004.
- ROESER, H. M. P.; ROESER, P. A. **O quadrilátero ferrífero - MG, Brasil: aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados**. Geonomos, v.18, n.1, pp. 33-37. 2010.
- SAADI, A. CAMPOS, J. C. F. **Geomorfologia do caminho da lama: contexto e consequências da ruptura da Barragem do Fundão (novembro 2015, Mariana–**

MG). Disponível em:  
<https://seer.ufmg.br/index.php/mhnpj/article/download/11322/8520>. Acesso em: 05 de Setembro de 2018.

SALINAS, N. S.C. **Caso Samarco: implicações jurídicas, econômicas e sociais do maior desastre ambiental do Brasil**. Caso de Ensino, 2016. Disponível em:  
[https://diretorio.fgv.br/sites/diretorio.fgv.br/files/u2726/caso\\_de\\_ensino\\_mariana\\_2016.pdf](https://diretorio.fgv.br/sites/diretorio.fgv.br/files/u2726/caso_de_ensino_mariana_2016.pdf). Acesso em: 08 de Setembro de 2018.

SILVA, L. C. M. **Rompimento da barragem de fundão em mariana-mg: caracterização e qualidade física de tecnossolo formado pela deposição dos rejeitos**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Viçosa, 2017.

STEFANUTTI, R.; **Comportamento de extratores em solos tratados com fontes diversas de fósforo**. MURAOKA, T.; MALAVOLTA, E. *Scientia Agrícola*, v. 51, n. 1, p.105-112, 1994.

SHINZATO, E.; CARVALHO FILHO, A. de. Pedologia. In: **PROJETO APA Sul RMBH: estudos do meio físico**. Belo Horizonte: CPRM/EMBRAPA/SEMAD, 2005. v.5, partes A-B. (Série programa informações básicas para a gestão territorial - GATE).

SCHAEFER, C. E., SANTOS, E. E., Souza, C. M., Neto, J. D., Filho, E. I., & C. D. (2015). Histórico, quadro fisiográfico e estratégias para recuperação ambiental de Tecnossolos nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem do Fundão, Mariana, MG.

SOBREIRA, F. G.; FONSECA, M. A. **Impactos físicos e sociais de antigas atividades de mineração em Ouro Preto, Brasil**. Revista Geotecnia, n 92, pp.5-27. 2001.

VIEIRA, Frederico Wallace Reis; OLIVEIRA, Geraldo Antônio Ibrahim de. **Geologia do distrito aurífero de Nova Lima, Minas Gerais**. In: SCHOBENHAUS, Carlos; COELHO, Carlos Eduardo Silva (Coord.). **Principais depósitos minerais do Brasil: ferro e metais da indústria do aço**. Brasília: DNPM; Vale do Rio Doce, 1988. v. 3. p. 377-391

WOLFF, A. P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da VALE**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto. 107 p. 2009. (Dissertação Mestrado).