



FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
LICENCIATURA EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Trabalho de Licenciatura

**EFEITOS DA ACTIVIDADE MINEIRA NA QUALIDADE DA ÁGUA DA  
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ZAMBEZE NO DISTRITO DE  
MOATIZE**

**Autor:**

Langa, Érico José

**Supervisores:**

Prof. Doutor Clemêncio Nhantumbo, Eng<sup>o</sup>

Prof. Doutor Estêvão Pondja, Eng<sup>o</sup>

Maputo, Fevereiro de 2022

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
LICENCIATURA EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Trabalho de licenciatura

**EFEITOS DA ACTIVIDADE MINEIRA NA QUALIDADE DA ÁGUA DA  
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ZAMBEZE NO DISTRITO DE  
MOATIZE**

**Autor:**

Langa, Érico José

**Supervisores:**

Prof. Doutor Clemêncio Nhantumbo, Eng<sup>o</sup>

Prof. Doutor Estêvão Pondja, Eng<sup>o</sup>

Maputo, Fevereiro de 2022

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais, Felismina e José Langa, minha maior fonte de inspiração.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro a Deus, pela vida e saúde que me tem continuamente proporcionado. Sou também muito grato aos meus pais, José Langa e Felismina Langa, pelo imenso esforço e apoio incondicional que me proporcionaram durante a minha formação na Faculdade de Engenharia.

Agradeço aos meus supervisores, Prof. Dr. Eng<sup>o</sup>. Clemêncio Nhantumbo e Prof. Dr. Eng<sup>o</sup>. Estêvão Pondja, pela oportunidade de realizar o presente trabalho e todo ensinamento e direcção durante a elaboração do mesmo, aos técnicos da ARA-Zambeze, pelo acolhimento, apoio durante a realização da investigação no campo, e aos Profs. Drs. Paulino Muteto e Eutilério Chaúque e técnicos de laboratório do Departamento de Química pelo auxílio na análise das amostras. Por fim, a todos os familiares e amigos que directa ou indirectamente contribuíram para a minha formação o meu muito obrigado.

## **DECLARAÇÃO DE HONRA**

Eu, Érico José Langa, declaro por minha honra, que o trabalho de culminação de curso que vos é aqui apresentado é de minha autoria, tendo as fontes bibliográficas consultadas sido devidamente identificadas ao longo do trabalho e na referência bibliográfica. Os resultados obtidos apresentados correspondem àqueles obtidos em medições e análises. Qualquer extracto textual semelhante à de outros trabalhos é resultado de mera coincidência.

---

Érico José Langa

## RESUMO

A mineração gera benefícios económicos, contudo existem vários casos em que causa impactos para meio ambiente, particularmente, sobre os recursos hídricos. Moçambique registou um desenvolvimento significativo da indústria mineira nos últimos anos, devido à sua geologia rica em recursos minerais e a relativa estabilidade política. A província de Tete, com uma reserva de 23 bilhões de toneladas, é referência pelas operações de exploração de carvão, particularmente em Moatize.

A bacia carbonífera de Moatize, na província de Tete, faz parte da bacia hidrográfica do rio Zambeze, com área total de cerca de 1.37 milhões de Km<sup>2</sup>, e é caracterizada por uma intensa exploração mineira. A área da bacia hidrográfica do rio Zambeze em Moçambique ocupa cerca de 137.000 Km<sup>2</sup>. Sendo Moçambique um país em vias de desenvolvimento, as operações de exploração mineira ocorrem em zonas rurais onde a população depende dos reservatórios de água superficial e subterrânea como fonte de água para consumo e uso doméstico. Devido a este facto, é essencial avaliar os impactos da actividade mineira sobre os recursos hídricos.

O presente estudo foi realizado no Distrito de Moatize, Província de Tete, Moçambique, com o objectivo de avaliar o impacto da actividade mineira sobre os recursos hídricos. Os parâmetros de campo e amostras foram colhidos em 16 pontos, num período de amostragem compreendido entre os meses de Setembro e Outubro de 2020. Estas foram colhidas tendo em conta a sua posição em relação a 3 empresas de mineração localizadas no Distrito de Moatize e foram analisadas no Departamento de Química da Universidade Eduardo Mondlane e no Laboratório Nacional de Higiene, de Águas e Alimentos (LNHAA).

Com o estudo observou-se que os valores de pH ( $6.2 \pm 0.1$  -  $8.2 \pm 0.0$ ) na área eram próximos a neutro a alcalinos. A actividade mineira tem efeitos negativos sobre a qualidade de água não só a jusante mas também a montante, devido à natureza topográfica da região. As quantidades de Condutividade eléctrica ( $138.7 \pm 1.5$  -  $11.2 \times 10^3 \pm 0.0$ ,  $\mu\text{S/cm}$ ), Total de sólidos dissolvidos ( $89.0 \pm 1.0$  -  $7338.0 \pm 79.7$ , mg/L), Sulfatos ( $<0,04$  -  $1233.8 \pm 0.8$ , mg/L), Ferro (BDL -  $2.88 \pm 0.02$  mg/L) e iões de maneira geral aumentam devido às actividades mineiras desenvolvidas na região, sendo a influência da mineração maior sobre os cursos de água subterrânea do que superficial.

**Palavras-chave:** Drenagens de minas, Qualidade de água, Bacia do Rio Zambeze, Moatize.

## ÍNDICE DE CONTEÚDOS

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS .....	ii
DECLARAÇÃO DE HONRA.....	iii
RESUMO .....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
ÍNDICE DE TABELAS .....	vii
LISTA DE ACRÓNIMOS .....	viii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Problema.....	2
1.3 Proposta de solução .....	2
1.4 Objectivos .....	2
1.4.1 Objectivo geral.....	2
1.4.2 Objectivos específicos.....	2
1.5 Metodologia.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 Qualidade de água.....	4
2.1.1 Parâmetros de qualidade de água.....	4
2.2 Drenagens de minas .....	6
2.3 Formação e neutralização de drenagem de minas .....	7
2.4 Pesquisas anteriores.....	8
3 ÁREA DE ESTUDO .....	11
3.1 Localização geográfica .....	11
3.2 Clima.....	11
3.3 Actividade mineira.....	12
3.4 Pontos de amostragem .....	16

4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	17
4.1	Trabalho de Campo .....	17
4.1.1	Materiais .....	17
4.1.2	Medição de parâmetros no campo, amostragem e conservação de amostras .....	17
4.2	Trabalho laboratorial .....	18
4.2.1	Materiais .....	18
4.2.2	Métodos de análise .....	18
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	20
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	33
6.1	Conclusões .....	33
6.2	Recomendações .....	34
7	BIBLIOGRAFIA .....	35
	ANEXOS .....	41

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fontes de drenagens de água numa mina. (Lottermoser, 2010) .....	6
Figura 2: Consumo gradual da capacidade de neutralização em um depósito de resíduos sulfídricos hipotéticos. Adaptado de (Lottermoser, 2010).....	8
Figura 3: Localização da Área de Estudo. (Autor: Érico Langa. Fonte da imagem de fundo: Google Satellite).....	11
Figura 4:Instalações da VALE (Autor: Érico Langa).....	13
Figura 5: Instalações da ICVL (Autor: Érico Langa).....	14
Figura 6:Instalações da Minas Moatize (Autor: Érico Langa).....	15
Figura 7:Mineração artesanal de Ouro (Autor: Érico Langa).....	15
Figura 8: Pontos de amostragem. (Autor: Érico Langa. Fonte da imagem de fundo: Google Satellite).....	16
Figura 9: a) Rio Moatize; B) Rio Revuboe.....	22
Figura 10: Zona de descarga da mineradora B: a) Canal de descarga dos efluentes e b) Solo na região.....	22
Figura 11: Rio Mbirimbi : a) Montante e b) Mid-stream. ....	23
Figura 12:Variação de pH na área de estudo.....	26
Figura 13:Variação de TDS na área de estudo. ....	27
<i>Figura 14:Variação da EC na área de estudo. ....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 15:Correlação entre EC e lões nos cursos de água superficial. ....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 16:Correlação entre EC e lões nos cursos de água subterrâneos.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 17:Variação da Carga de lões na área de estudo.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 18:Variação da Carga de Sulfatos na área de estudo.....</i>	<i>32</i>

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Composição da água nas escavações provenientes de água subterrânea durante as actividades mineiras. Traduzido de (Pondja Jr., et al., 2017).....	9
Tabela 2:Resultados dos cursos de água superficial. ....	21
Tabela 3:Resultados dos cursos de água subterrânea. ....	24

## LISTA DE ACRÓNIMOS

ARA- Zambeze – Administração Regional de Águas do Zambeze

BDL - *Below Detection Level* (Abaixo do limite de detecção)

DAM - Drenagem ácida de minas

DNM - Drenagem neutra de minas

DO - *Dissolved oxygen* (Oxigénio dissolvido)

EC - *Electrical conductivity* (Condutividade eléctrica)

EPA - *Environmental Protection Agency* (Agência de protecção Ambiental)

FAO - *Food and Agriculture Organization* (Organização para Alimentação e Agricultura)

FIPAG – Fundo de Investimento e Património de Água

GEMS - *Global Environment Monitoring System* (Sistema de Monitoramento Ambiental Global)

GARD - *Global Acid Rock Drainage* (Drenagem Ácida de Rochas Global)

ICVL – Indian Coal Venture Limited

INE - Instituto Nacional de Estatística

ITIE - Iniciativa de Transparência na Indústria Extractiva

LNHAA - Laboratório Nacional de Higiene, de Águas e Alimentos

MIREME - Ministério dos Recursos Minerais e Energia

MISAU – Ministério da Saúde

ND – Não determinado

ORP – *Oxidation-Reduction Potential* ( Potencial de Oxidação-Redução)

pH - Potencial hidrogeniónico

TDS - *Total dissolved solids* (Total de sólidos dissolvidos)

UNEP - *United Nations Environment Programme* (Programa das Nações Unidas para o Ambiente)

UNESCO - *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* (Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura)

WHO - *World Health Organization* (Organização Mundial da Saúde)

WMO - *World Meteorological Organization* (Organização Mundial de Meteorologia)

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

A mineração é a primeira etapa para a utilização económica dos recursos minerais. Esta é definida como a extracção de material do solo, a fim de obter um ou mais componentes do material extraído (Lottermoser, 2010). Tal como qualquer actividade desenvolvida pelo Homem, a mineração tem impactos no meio ambiente. Os principais impactos da mineração podem ocorrer antes, durante e após a operação e podem incluir: remoção de vegetação, criação de grandes vazios, pilhas de resíduos, barragens de rejeitos e contaminação de águas ambas superficiais e subterrâneas (Lottermoser, 2010; Fetter, 2001).

Moçambique tem um enorme potencial em recursos minerais. Como resultado, a indústria mineira no país tem vindo a crescer, e espera-se que cresça muito mais nos próximos anos (ITIE Moçambique, 2018). A Província de Tete tem um grande potencial em Carvão, Ouro, Prata, Ferro, entre outros (MIREME, 2017), desenvolvendo lá actividades empresas nacionais e multinacionais (ITIE Moçambique, 2018). A exploração destes recursos influencia, directa e indirectamente, a qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Zambeze e nos cursos de água subterrânea associados.

A bacia hidrográfica do rio Zambeze é a quarta maior bacia hidrográfica em África (FAO, 1997). Sua área total, 1.37 milhões de Km<sup>2</sup> (World Bank, 2010), representa 4.5% da área do continente e abrange oito países (FAO, 1997; World Bank, 2010). A bacia do rio Zambeze é geralmente descrita em termos de 13 sub-bacias (World Bank, 2010) das quais se destacam por cobrirem parte do território moçambicano as sub-bacias de Luangwa, Delta do Zambeze e particularmente a de Tete por ser a que cobre maior extensão territorial em Moçambique e possuir maior número de pessoas residentes no seu interior (World Bank, 2010).

Inúmeras pessoas vivem nas zonas rurais e têm os cursos da bacia como fonte principal de água para consumo, confecção de alimentos, irrigação, entre outros usos. Portanto, o conhecimento das implicações da mineração sobre a qualidade de água na bacia hidrográfica do rio Zambeze é de extrema importância, visto que pode auxiliar às autoridades competentes a identificar riscos à saúde pública e servir de

instrumento de tomada de decisão na preservação da mesma e do meio ambiente. Com isto, a presente pesquisa visa investigar os efeitos que as actividades mineiras desenvolvidas na Província de Tete têm sobre a qualidade de água da bacia hidrográfica do rio Zambeze, com base em características físico-químicas da água.

## **1.2 Problema**

A actividade mineira é relacionada à degradação da qualidade ambiental e em específico de águas superficiais e subterrâneas em diversos locais ao redor do mundo (Lottermoser, 2010). Em Moçambique, com o aumento de empresas que desenvolvem a actividade mineira em grande escala, a percepção das implicações específicas destas actividades nos cursos de água superficiais e subterrâneos locais torna-se indispensável para a implantação de medidas de mitigação de impactos apropriadas por parte das empresas e tomada de decisão por parte das autoridades competentes.

Portanto, o problema que a pesquisa visa solucionar é a não percepção dos impactos que as actividades mineiras têm sobre a qualidade de água na bacia do rio Zambeze mais especificamente no distrito de Moatize, centrando-se na seguinte questão principal: Que efeitos a actividade mineira desenvolvida na Província de Tete tem na qualidade de água na bacia hidrográfica do rio Zambeze no distrito de Moatize?

## **1.3 Proposta de solução**

Para solucionar o problema acima citado propõe-se a realização de monitoria, com vista a observar que variações ocorrem nas características físico-químicas da água na bacia hidrográfica do rio Zambeze no distrito de Moatize antes e depois das zonas de descarga de efluentes de mineração.

## **1.4 Objectivos**

### **1.4.1 Objectivo geral**

- Estudar os efeitos da mineração na qualidade de água da bacia hidrográfica do rio Zambeze no distrito de Moatize.

### **1.4.2 Objectivos específicos**

- Identificar as zonas de descarga de efluentes de mineração em Moatize;
- Determinar parâmetros físico-químicos da água a montante e a jusante das zonas de descarga identificadas;

- Comparar parâmetros físico-químicos da água a montante e a jusante das zonas de descarga identificadas;

## 1.5 Metodologia

A metodologia usada para a realização do presente estudo consistiu na pesquisa bibliográfica, realização de trabalho de campo, análise laboratorial e a elaboração do relatório final. A pesquisa bibliográfica foi feita em livros e artigos científicos, em formato físico e digital. O trabalho de campo realizado consistiu em excursões para a observação da área de estudo, medição de parâmetros no campo, que foi feita com recurso a uma sonda Trace2O AQUAMETER disponibilizada pela ARA-Zambeze (actualmente ARA-Centro), colecta de amostras de acordo com os métodos descritos no manual *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA & WEF, 2017) e visitas às mineradoras para melhor compreensão dos seus processos de produção e sistemas de tratamento de efluentes, caso presentes.

As análises laboratoriais das amostras foram conduzidas no Departamento de Química da Universidade Eduardo Mondlane, de acordo com procedimentos descritos no manual *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA & WEF, 2017), e no Laboratório Nacional de Higiene, de Águas e Alimentos (LNHAA).

A compilação de informação, processamento de dados e elaboração do relatório final foi feito num computador com auxílio dos softwares Microsoft Office Word, Excel e QGIS 3.18.2 'Zurich'.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Qualidade de água**

Qualidade da água é um termo usado para descrever as características químicas, físicas e biológicas da água (Li & Migliaccio, 2011; Roy, 2019). Essas características afectam a adequação da água para consumo humano (potável, irrigação, uso industrial) e saúde do ecossistema (Li & Migliaccio, 2011). A interpretação da qualidade da água como “boa” ou “má” difere dependendo do uso a que se destina a água analisada (Li & Migliaccio, 2011).

A análise da qualidade de água exige a mensuração dos parâmetros de água necessários, seguindo métodos padrão, e comparação com os valores padrão para a água com o uso designado (Roy, 2019). Chama-se monitoria da qualidade de água à prática de avaliar as características químicas, físicas e biológicas da água em rios, lagos, estuários e águas costeiras e subterrâneas em relação aos padrões estabelecidos e fornecer informações sobre se essas águas são adequadas para usos específicos, como beber, nadar, irrigação e serviços ecossistêmicos (Li & Migliaccio, 2011).

Os objectivos do monitoramento da qualidade da água geralmente incluem (Li & Migliaccio, 2011):

- 1) Identificar problemas de qualidade da água que afectam a saúde dos seres humanos e ecossistemas;
- 2) Determinar tendências de longo prazo na qualidade da água;
- 3) Documentar os efeitos da prevenção da poluição ou remediação; e
- 4) Fornecer evidências para a conformidade com os regulamentos e disputas legais.

#### **2.1.1 Parâmetros de qualidade de água**

A qualidade da água pode ser descrita em termos de concentração e estado (dissolvido ou particulado) de parte ou todo o material orgânico e inorgânico presente na água, juntamente com certas características físicas da água. É determinado por medições in situ e pela análise de amostras de água no local ou em laboratório. Os principais elementos de monitoramento da qualidade da água são, portanto, medições

no local, a colecta e análise de amostras de água, o estudo e a avaliação dos resultados analíticos, e o relatório dos resultados. (UNEP & WHO, 1996)

#### **2.1.1.1 Parâmetros de campo**

Inúmeras variáveis incluindo pH, condutividade, Oxigénio dissolvido, temperatura e transparência devem ser medidas no local de amostragem (UNEP, WHO, UNESCO & WMO, 1992), ou logo após a amostra ser colectada (UNEP & WHO, 1996). Uma vantagem significativa da análise no campo é que os testes são realizados em amostras frescas cujas características não foram contaminadas ou alteradas de outra forma como resultado do armazenamento em um recipiente e transporte (UNEP & WHO, 1996).

#### **2.1.1.2 Parâmetros de laboratório**

Certos parâmetros de qualidade de água são determinados em laboratórios, devido a natureza do parâmetro a determinar e complexidade do método de análise a usar. Independentemente do minério extraído e das técnicas de processamento do mineral aplicadas, catiões e aniões principais são constituintes importantes de qualquer água que drena de uma mina (Lottermoser, 2010). Uma análise da qualidade de água padrão deve incluir, no mínimo, os quatro catiões principais ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) e os quatro aniões principais ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) (Appelo & Postma, 2005). Para determinar Carbonatos e Bicarbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$  e  $\text{HCO}_3^-$ ) foi usado o parâmetro Alcalinidade. Alcalinidade é capacidade de uma solução neutralizar ácidos (Lottermoser, 2010). Na maioria dos corpos de água natural, a alcalinidade é igual às concentrações molares de iões Bicarbonato e Carbonato (Lottermoser, 2010).

A oxidação de vários minerais sulfetados liberta seus elementos principais e elementos traço, incluindo numerosos metais pesados, o que resulta na concentração elevada de um ou mais metais pesados na água que drena de minas (Lottermoser, 2010). Estes metais podem estar presentes dissolvidos em solução como ião e molécula ou existe como uma massa sólida (Lottermoser, 2010). Por isso, foram, no âmbito do presente trabalho, determinadas as quantidades de Ferro (Fe), Cádmiu (Cd), Chumbo (Pb), Alumínio (Al), Arsénio (As), Prata (Ag), Crómio (Cr), Cobre (Cu), Cobalto (Co), Lítio (Li), Manganês (Mn), Níquel (Ni) e Zinco (Zn) na água.

## 2.2 Drenagens de minas

Diz-se que há drenagens de minas quando águas superficiais ou subterrâneas que entraram em contacto com qualquer dos processos decorrentes numa mina fluem do local da mina para áreas circunvizinhas (Lottermoser, 2010). Na figura 1, podem-se ver algumas fontes de drenagens de minas. O nível de acidez, metais presentes, concentrações de iões e qualidade das drenagens de minas em geral dependem do tipo e quantidade de minerais de sulfeto presentes (produtores de ácido) e minerais de carbonato (neutralizantes de ácidos) contidos na rocha exposta (Skousen, et al., 2000; Skousen, et al., 2018).

De maneira geral, minerais ricos em sulfetos e pobres em carbonatos produzem drenagem ácida de minas (DAM) e minerais ricos em alcalinos, mesmo com concentrações significativas de sulfeto, produzem condições neutras na água (Skousen, et al., 2000). A presença de minerais de carbonato suficientes, neutraliza a DAM (a curto prazo) e gera drenagens neutras de minas (DNM) (Shahhosseini, et al., 2017).

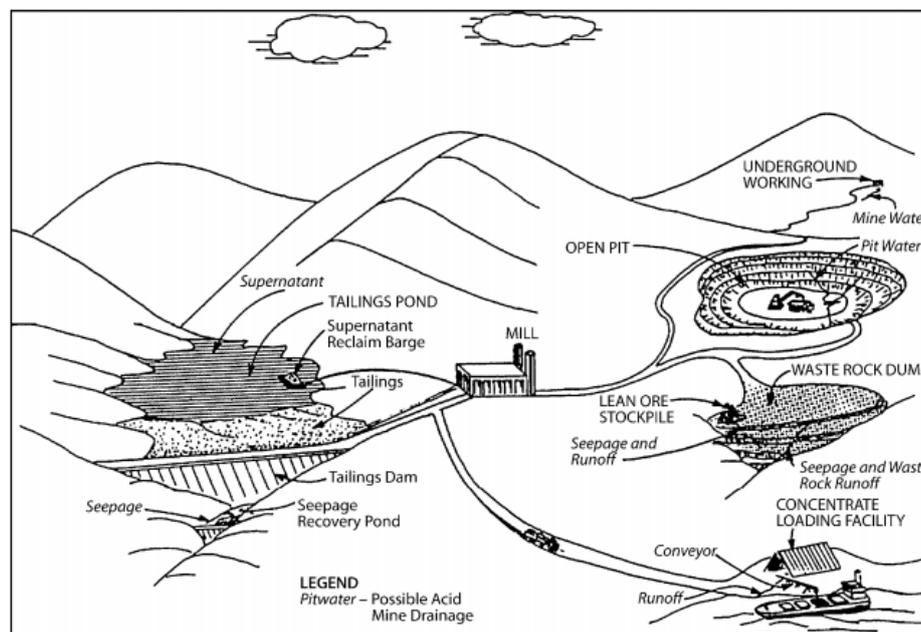


Figura 1: Fontes de drenagens de água numa mina. (Lottermoser, 2010)

Quando as drenagens de minas entram em corpos de água superficiais, os efeitos incluem impactos bióticos em organismos em rios e lagos através de intoxicação directa, alteração do habitat por metais precipitados, mudanças visuais devido à coloração laranja ou amarela de sedimentos de rios, perturbações no ciclo de

nutrientes ou outros mecanismos, e a água muitas vezes se torna inadequada para uso doméstico, agrícola e industrial (Skousen, et al., 2018).

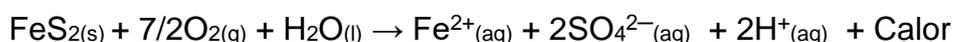
### 2.3 Formação e neutralização de drenagem de minas

A drenagem ácida de minas (DAM) se forma quando os minerais sulfetados presentes no estéril são oxidados, durante as actividades de mineração, pela exposição à atmosfera ou água (Matsumoto, et al., 2016; Lottermoser, 2010; Skousen, et al., 2018). Quando estes minerais são oxidados, baixam o pH e aumentam o teor de sulfatos e metais pesados na água. Pirite mineral ( $\text{FeS}_2$ ) é o mineral de sulfeto mais comum presente e principal responsável pela formação de DAM's (Murray, et al., 2021; Skousen, et al., 2000; Skousen, et al., 2018; Marcus, 1997; Lottermoser 2010; Matsumoto, et al., 2016). A oxidação de Pirite ( $\text{FeS}_2$ ) por água e Oxigénio resulta na libertação de ião Hidrogénio, Sulfatos e hidróxido de Ferro (III) secundários (Dold, 2014; Murray, et al., 2021):

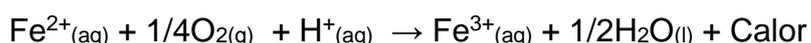


Segundo (Lottermoser, 2010), a oxidação da Pirite ocorre em três etapas:

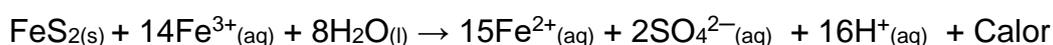
1ª Etapa: Oxidação da Pirite por Oxigénio



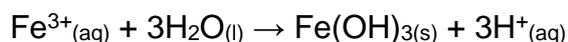
2ª Etapa: Oxidação do Ferro ferroso para o Ferro férrico



3ª Etapa: Oxidação da Pirite pelo Ferro férrico



Em condições ácidas onde o pH é inferior a 3, o  $\text{Fe}^{3+}$  permanece em solução, no entanto, se ocorrer a neutralização parcial, por minerais como carbonatos por exemplo, e o pH aumentar para mais de 3, a seguinte reacção ocorre (Lottermoser, 2010):



Todos estes processos aumentam a acidez da solução, excepto se o hidrogénio for consumido através de reacções de neutralização (Lottermoser, 2010). Neste caso, as drenagens que são originadas são DNM. A neutralização de ácido é causada em

grande parte por intemperismo de silicatos, carbonatos e hidróxidos (Lottermoser, 2010). Na figura abaixo (figura 2), é possível observar o consumo gradual da capacidade de neutralização em um depósito hipotético. Dos inúmeros tipos de compostos neutralizantes de ácidos presentes em rochas, apenas carbonatos e algumas argilas ocorrem em quantidade suficiente para neutralizar efectivamente as rochas produtoras de ácido (Skousen, et al., 2018). Dos Carbonatos, Calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) é o agente neutralizante mais importante, isto devido à sua ocorrência comum em uma ampla variedade de ambientes geológicos e à sua rápida taxa de reacção (Lottermoser, 2010).

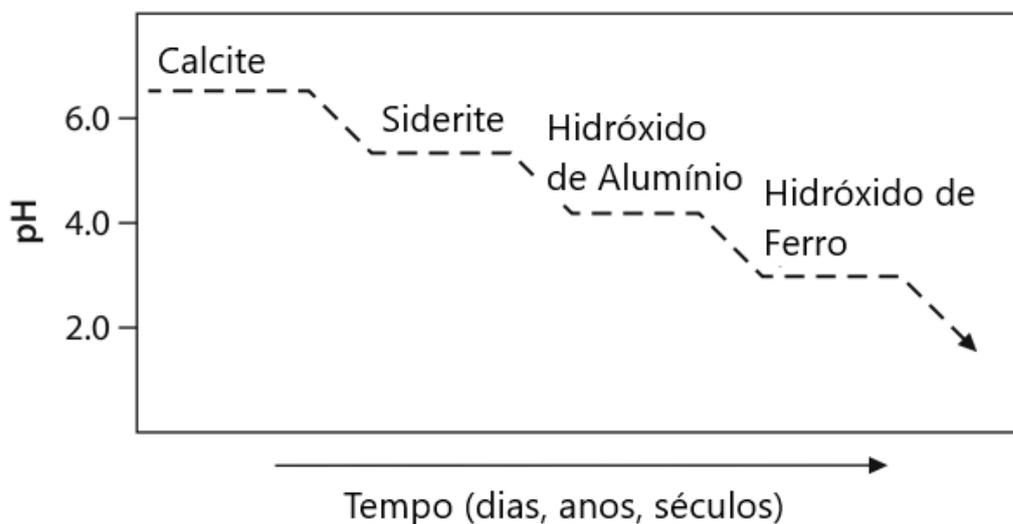


Figura 2: Consumo gradual da capacidade de neutralização em um depósito de resíduos sulfídricos hipotéticos. Adaptado de (Lottermoser, 2010)

## 2.4 Pesquisas anteriores

Pesquisas sobre a qualidade de água já foram conduzidas na área de estudo. Nhantumbo, et al. (2015), em “*Key Issues for Water Quality Monitoring in the Zambezi River Basin in Mozambique in the Context of Mining Development*” (Questões Chave para Monitorização da Qualidade da Água na Bacia do Rio Zambeze em Moçambique no Contexto do Desenvolvimento Mineiro), uma investigação baseada em revisão de literatura, compilação de dados gerais de base e consultas com instituições que trabalham com mineração e gestão de água, nomeadamente empresas mineiras de carvão, ARA-Zambeze, e o Instituto Nacional de Investigação de Pesca do Songo, observaram que apesar da falta de recursos, a ARA-Zambeze, instituição responsável pela gestão da Bacia Hidrográfica do rio Zambeze em Moçambique, realiza monitoria de vigilância, monitorando apenas parâmetros básicos.

Três são os tipos de monitoria realizadas na bacia hidrográfica do rio Zambeze, segundo (Nhantumbo, et al., 2015): Monitoria de vigilância, feita pela ARA-Zambeze; monitoria operacional, feita pelas empresas que usam e/ou afectam a água do rio; e a monitoria de investigação, feita pelo Instituto Nacional de Investigação Pesqueira de Songo e outras instituições de investigação.

Pondja Jr., et al. (2017) no artigo intitulado “*Assessment of coal mine water in Moatize by static and leaching tests*” (Avaliação de água de minas de carvão em Moatize por ensaios estáticos e lixiviação), colheu rejeitos de carvão e água de “*pits*” (escavações) em duas minas, que denominou M e R. Tendo analisado a água estes observaram que a água dos *pits* era neutra e tinha elevadas quantidades de sulfatos, Cálcio e Magnésio, como pode-se ver na tabela 1. Os ensaios estáticos e cinéticos sobre os rejeitos revelaram que na mina denominada R os rejeitos podiam gerar drenagens ácidas de minas, tendo os rejeitos da mina M elevado potencial de neutralização.

Tabela 1: Composição da água nas escavações provenientes de água subterrânea durante as actividades mineiras. Traduzido de (Pondja Jr., et al., 2017).

Elementos	Amostras			
	M1	M2	M3	R1
Al (mg/l)	0	0	0	0.028
Ca (mg/l)	331	119	430	338
Fe (mg/l)	0.131	0.057	0.042	0.046
Mg (mg/l)	240	242	407	498
Mn (mg/l)	0	0	0.003	1.4
Ni (mg/l)	0.001	0	0	0.017
S (mg/l)	943	620	1156	1141
Ti (mg/l)	0.0003	0	0	0
Zn (mg/l)	0.001	0	0.001	0.057
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	3154	2028	3812	3594
pH	8.2	8.5	8.1	7.7
Condutividade (µS/cm)	8.4	6.7	11.9	13.7
Alcalinidade (mmol/L)	3.8	4.2	2.4	3.1

Outra investigação realizada na área de estudo foi conduzida por Johansson em 2019 para obtenção do grau de Mestrado e teve por tema “*A water quality assessment and environmental impact analysis of the local mining along the Zambezi River in Tete, Mozambique*” (Avaliação da Qualidade de água e análise do impacto ambiental das mineradoras locais ao longo do rio Zambeze em Tete). (Johansson, 2019) Observou que as actividades mineiras têm impactos negativos, não apenas sob a coloração do solo e topografia, mas estas também deterioram a água superficial e subterrânea na bacia do rio Zambeze tornando-a inapropriada para o consumo humano, devido aos elevados níveis de metais e iões.

### 3 ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1 Localização geográfica

O presente estudo foi realizado no Distrito de Moatize, Província de Tete, Moçambique (figura 3). A Província de Tete localiza-se no extremo noroeste do país, e com uma área total de 100,742 Km<sup>2</sup>, dos quais 98,230 Km<sup>2</sup> são terra firme e 2,494 Km<sup>2</sup> águas interiores, Tete é a 3<sup>a</sup> maior Província do país, depois de Niassa e Zambézia (Governo da Província de Tete, 2017). Esta localiza-se entre as coordenadas de Norte – Latitude 14°00'S, Sul - Latitude 17°42'01"S, Este- Longitude 35°20'07"E e Oeste - Longitude 30°13'E, e faz fronteira com três países, nomeadamente as Repúblicas de Zâmbia, Malawi e Zimbabwe, bem como com as províncias Moçambicanas da Zambézia, Manica e Sofala (Governo da Província de Tete, 2017). Tete tem uma população de 2.829.594 habitantes, dos quais 398.283 habitantes residem no distrito de Moatize (Instituto Nacional de Estatística, 2018).



Figura 3: Localização da Área de Estudo. (Autor: Érico Langa. Fonte da imagem de fundo: Google Satellite)

#### 3.2 Clima

A área de estudo é caracterizada por temperaturas elevadas. Identificam-se na Província de Tete três tipos de clima (Governo da Província de Tete, 2017):

- a) Clima tropical húmido, que ocupa uma faixa alongada no sentido este-oeste no interior da região norte de Tete;
- b) Clima tropical seco, que ocupa uma pequena faixa a esquerda do rio Zambeze e toda a região à direita, excepto uma pequena faixa no distrito de Mutarara que possui clima tropical húmido, com temperaturas máximas médias anuais na ordem dos 32 °C e precipitação máxima de 180 mm; e
- c) Clima modificado pela altitude, que vai desde o rio Aruângua (Zumbo) ao Distrito de Tsangano causado pelos planaltos da Marávia-Angónia, com temperaturas máximas médias anuais na ordem dos 26 °C e precipitação máxima média de 360 mm.

### **3.3 Actividade mineira**

A província de Tete tem uma reserva de 23 bilhões de toneladas de carvão (Source International, 2019), o que a torna alvo de investimento de diversas empresas de mineração. Toda a província, incluindo a bacia carbonífera de Moatize, alvo de exploração mineira, fazem parte da bacia hidrográfica do rio Zambeze, que em território Moçambicano ocupa cerca de 137.000 Km<sup>2</sup> (Vasconcelos, 1995). Na área de intensa exploração mineira, onde se encontram as minas de carvão no estudo abordadas, observa-se quando tratando de geologia a presença de Argilite e Arenitos, sendo Calcário encontrado em áreas adjacentes (Pondja Jr, 2017).

A multinacional brasileira VALE (figura 4) é empresa mais antiga a explorar carvão em Moatize. A sua licença de exploração foi concedida em 2007 (Johansson, 2019) com expectativa de vida útil de 35 anos (Source International, 2019). A empresa ocupa actualmente uma área de cerca de 35 Km<sup>2</sup>, possuindo duas minas a céu aberto, Moatize I e Moatize II (Source International, 2019). A área onde esta opera é drenada pelos rios Revúboe a noroeste, Moatize na parte central e Mwaladzi a nordeste (Source International, 2019).



*Figura 4: Instalações da VALE (Autor: Érico Langa).*

Outra empresa que opera na área de estudo é a Indian Coal Venture Limited (ICVL), que pode ser vista na figura 5, explorando uma mina de carvão na localidade de Benga. A sua concessão localiza-se a cerca de 14 Km da Cidade de Tete, a Oeste da concessão da VALE (Johansson, 2019). A mina foi inaugurada em 2011, com uma licença de exploração de 25 anos (Source International, 2019), no entanto devido à queda do preço de carvão no mercado internacional, em 2015 a empresa interrompeu a produção, tendo reiniciado em 2017 (Johansson, 2019; Source International, 2019). A área da mina tem um comprimento de 11 Km e largura de 6 Km nas suas dimensões mais largas, sendo delimitada pelos rios Zambeze e Revúboe (Source International, 2019).



*Figura 5: Instalações da ICVL (Autor: Érico Langa).*

Para além das acima mencionadas, também está em operação a Minas Moatize (Figura 6), gerida pela Beacon Hill Resources. A Minas Moatize foi adquirida da Borneo Mining pela Beacon Hill Resources em 2010, tendo a empresa convertido a mina subterrânea em “*open-pit mining*”, mina a céu aberto, e começado a minerar carvão térmico na primeira mina a céu aberto, Trial Pit 1, em 2011 (Mining Technology, 2021). Aquando da expansão em 2012, a empresa declarou uma reserva economicamente minerável total de 42.65 Mton com potencial de aumento de mais 7.9 Mton (Beacon Hill Resources Plc, 2012). Esta tem como a parte comerciável 23.46 Mton, que representa a parte comerciável após mineração e processamento, dos quais pelo menos 8.72 Mton seria carvão coque (Beacon Hill Resources Plc, 2012). As operações na Minas Moatize pararam desde a eclosão da pandemia de Covid-19, estando no entanto a mineradora a bombear a água do pit para o rio Revúboe, sem antes passar por qualquer tratamento.



*Figura 6: Instalações da Minas Moatize (Autor: Érico Langa).*

Além das empresas de mineração de carvão, existem também mineradores artesanais de ouro (figura 7) na área de estudo. Na represa de Cachoeira, estes cavam ao longo do leito do rio, introduzem o material extraído, sem rochas grosseiras, numa peneira e separam, por centrifugação (Johansson, 2019), na água que na represa se encontra, não se fazendo uso de Mercúrio no processo de separação segundo os mineradores artesanais.



*Figura 7: Mineração artesanal de Ouro (Autor: Érico Langa).*

### 3.4 Pontos de amostragem

Os parâmetros de campo e amostras foram colhidos em 16 pontos, num período de colheita compreendido entre os meses de Setembro e Outubro de 2020. Estas amostras de água, superficial e subterrânea, foram colhidas para fazer uma análise da tendência espacial da qualidade de água em relação a 3 empresas de mineração localizadas no distrito de Moatize, que para os efeitos do presente trabalho foram designadas Mineradoras A, B e C.

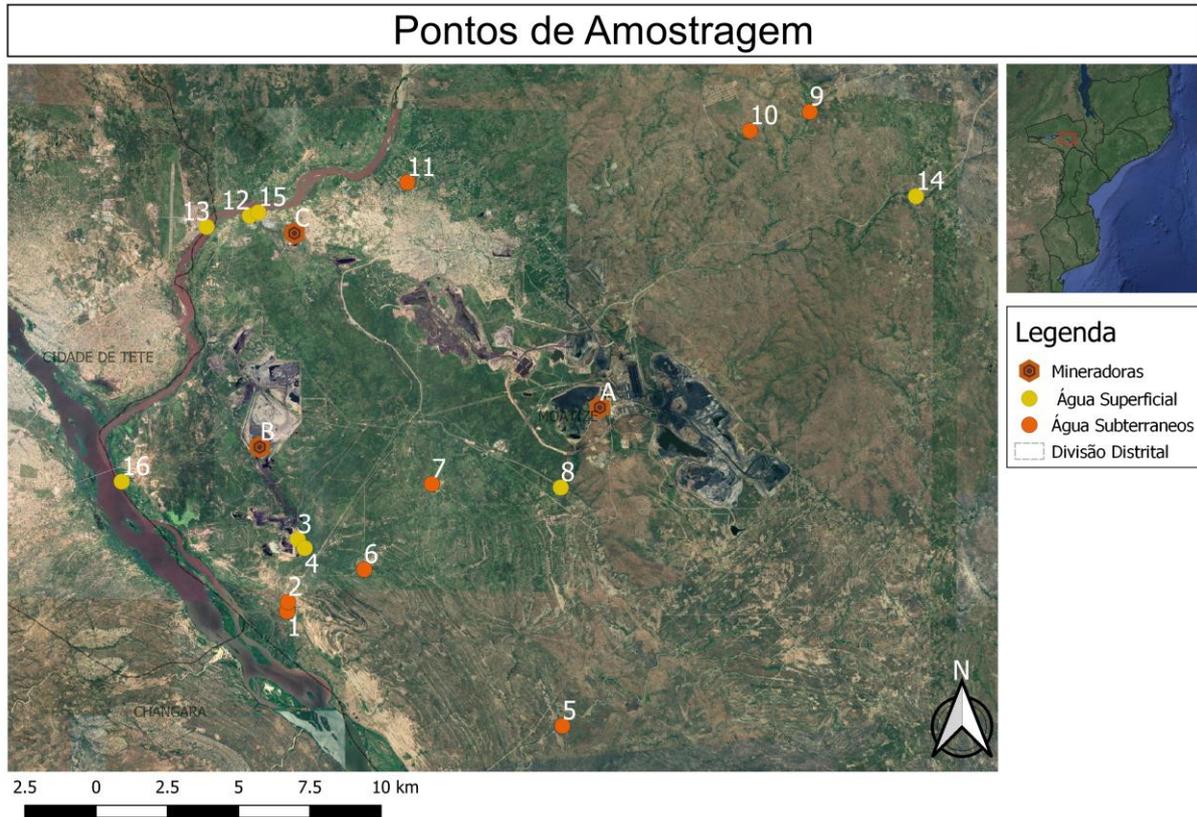


Figura 8: Pontos de amostragem. (Autor: Érico Langa. Fonte da imagem de fundo: Google Satellite)

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Trabalho de Campo

#### 4.1.1 Materiais

Os materiais usados para a realização do trabalho de campo a quando da medição de parâmetros no campo e recolha de amostras de água foram:

- Garrafas de polietileno para armazenamento de amostras;
- Marcador permanente para efeito de rotulação;
- Sonda Trace 20-AQUAMETER para medir os parâmetros de campo, nomeadamente pH, temperatura, condutividade eléctrica, potencial Redox, Oxigénio dissolvido, sólidos totais dissolvidos e salinidade.
- Balde e caneca para a recolha de amostras em pontos onde a colecta ou medição directa não fossem possíveis.
- Caixa térmica (*cooler*).
- Luvas de latex.
- Bloco de notas para registar as observações visuais.

#### 4.1.2 Medição de parâmetros no campo, amostragem e conservação de amostras

Para a realização do presente estudo, foram determinados parâmetros em campo e colhidas amostras de água, superficial e subterrânea, a montante e jusante das zonas de actividade mineira. Os pontos de amostragem foram seleccionados no campo, com base na acessibilidade, presença de água, desenvolvimento de actividade mineira na região e utilização da água pela população. Nos cursos de água superficial que não apresentavam escoamento, por serem periódicos, amostras de água foram colhidas em covas feitas pela população local para ter acesso a mesma.

As medições de parâmetros no campo foram feitas com recurso a uma sonda Trace20 AQUAMETER. Os parâmetros determinados no campo foram Potencial Hidrogeniónico (pH), Temperatura, Condutividade eléctrica (EC), Oxigénio Dissolvido (DO), Potencial de Oxidação- Redução (ORP) e Salinidade. Foram realizadas três medições dos parâmetros em cada ponto de amostragem. As medições eram realizadas directamente no curso de água sempre que possível, sendo usado um balde para colher a amostra e imediatamente inserida a sonda para mensuração quando não fosse possível medir directamente.

As amostras foram colhidas e conservadas de acordo com o recomendado na 23ª edição do manual *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA & WEF, 2017) para os parâmetros que foram analisados no âmbito da presente pesquisa. Estas foram amostras do tipo “*grab samples*”, ou amostras de “pega”. Sempre que possível as amostras foram colhidas directamente na fonte de água, quando não fosse a amostra era colhida com recurso a um balde com corda e de seguida inserido nos recipientes para conservação e transporte. Em cada ponto de amostragem foram colhidas duas amostras, uma sendo para a determinação dos aniões principais ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ), e outra para a determinação de catiões principais ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) e metais pesados (Ag, As, Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Ni, Pb, Zn). As amostras para determinação de metais foram de imediato acidificadas com ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$  55%) na proporção 2mL de  $\text{HNO}_3$  concentrado por L de amostra, e ambas amostras foram armazenadas numa caixa térmica com agentes refrigerantes para o transporte ao laboratório.

## **4.2 Trabalho laboratorial**

### **4.2.1 Materiais**

Para a realização do trabalho de laboratório foram usados os seguintes materiais:

- Bata e luvas de latex;
- Frascos de Erlenmeyer, 250 mL;
- Copos de precipitação (Becker);
- Buretas, 50mL;
- Balões volumétricos, de 100, 250 e 1000 mL;
- Proveta;
- Balança analítica Mettler AE200;
- Pipeta;
- PHmetro BIOBASE PHS-25 cw Benchtop;
- Vidro de relógio;
- Estufa Scientific Series 9000;
- Espectrofotómetro Shimadzu ICPE- 9820.

### **4.2.2 Métodos de análise**

As amostras de água foram analisadas no Departamento de Química da Universidade Eduardo Mondlane (UEM) e Laboratório Nacional de Higiene, de Águas e Alimentos

(LNHAA). Os Cloretos foram determinados pelo Método Argentométrico, a Alcalinidade (usada para determinar as concentrações de  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_3^{2-}$ ) pelo Método Titulométrico e os cátions principais ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) e metais pesados (Ag, As, Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Ni, Pb, Zn) foram determinados por Espectrofotometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS), de acordo com o manual *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA & WEF, 2017), na UEM, num Espectrofotômetro Shimadzu ICPE- 9820. Para a determinação de Nitratos e Sulfatos as amostras foram enviadas ao LNHAA, onde foram analisadas pelo método de Espectrofotometria de radiação Ultra-Violeta.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor compreensão, organização e interpretação, os resultados das análises de águas superficiais e águas subterrâneas serão apresentados separadamente. Os resultados serão apresentados consoante a posição geográfica dos pontos, antes e depois, em relação à localização das mineradoras de carvão. A exceção destes, efluentes, se encontrarão destacados.

Não foi possível determinar a concentração de Sódio no Ponto 1 (Rio Nharenga - Downstream), Ponto 7 (Fontenária Cancope), Ponto 12 (Efluente da mineradora C) e Sódio e Zinco no Ponto 8 (Efluente da mineradora A) devido a limitação de reagente aquando da realização das análises, a saber ruptura de gás Árgon sem clareza da data de reposição.

Nos cursos de água superficiais foram medidos parâmetros de água superficial e posteriormente colhidas e analisadas amostras em oito pontos, dos quais dois (14 e 15), correspondentes a pontos recolhidos acima das zonas de mineração de carvão, dois de efluentes de mineração (8 e 12), das mineradoras A e C respectivamente, um referente à zona de descarga da mineradora B (3). Três (4, 13 e 16), correspondem a pontos abaixo das zonas de mineração. A mineradora B descarrega efluentes intermitentemente, e estes escoam para o rio Mbirimbi, tendo sido colhidas amostras de água estagnada na zona de descarga e mais à jusante do rio. A mineradora C descarrega os efluentes no rio Revúboe e a mineradora A, num estreito canal que aquando da pesquisa estava fechado, e segundo a população na época chuvosa é aberto e vai desaguar no rio Catete, que é tributário do rio Moatize. Os resultados obtidos das medições e análises da água superficial podem ser vistos na tabela 2 abaixo.

Tabela 2: Resultados dos cursos de água superficial.

Parâmetros	Antes		Descargas mineiras			Depois			
	Ponto 14 (Rio Moatize)	Ponto 15 (Rio Revuboe Up-stream)	Ponto 8 (Efluente da mineradora A)	Ponto 3 (Zona de descarga da mineradora B)	Ponto 12 (Efluente da mineradora C)	Ponto 4 (Rio Mbirimbi Mid-stream)	Ponto 13 (Rio Revuboe Mid-stream)	Ponto 16 (Rio Zambeze)	
Temperatura [°C]	26.6±0.2	30.9±0.1	25.1±0.5	35.9±0.4	28.9±0.8	32.0±0.1	26.4±0.2	24.2±0.5	
ORP [mV]	114.5±2.0	123.3±2.2	151.3±0.8	50.7±4.7	55.4±4.3	52.3±8.0	114.5±3.0	152.5±1.7	
pH	8.0±0.0	8.2±0.0	7.8±0.0	6.3±0.1	6.8±0.1	6.3±0.1	8.0±0.1	7.75±0.03	
EC [µS/cm]	633.0±2.6	216.7±7.6	4238.0±20.3	8642.7±9.9	5995.7±33.1	10.9x10 <sup>3</sup> ±0.0	247.7±1.2	138.7±1.5	
DO	%	143.5±6.4	125.0±1.4	111.5±0.6	169.0±9.1	137.4±1.9	135.6±2.7	123.9±1.3	121.2±0.2
	mg/L	11.2±0.5	9.2±0.1	8.9±0.0	11.0±0.6	10.3±0.3	9.4±0.2	9.8±0.1	10.02±0.05
TDS [mg/L]	410.7±2.3	147.0±6.1	2758.3±9.9	5617.3±3.2	3890.0±9.6	7053.0±7.0	160.7±0.6	89.0±1.0	
Salinidade [PSU]	0.27±0.01	0.07±0.01	2.25±0.01	4.81±0.01	3.23±0.01	6.13±0.00	0.08±0.00	0.04±0.00	
Cloretos (Cl <sup>-</sup> ) [mg/L]	321.9±1.1	5.8±1.0	445.0±4.0	150.3±1.1	540.7±2.0	409.0±3.0	9.9±1.0	2.3±1.0	
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) [mg/L]	16.2±0.1	4.3±0.2	2.9±0.0	44.5±0.2	8.6±0.1	1.8±0.1	3.4±0.0	4.4±0.0	
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) [mg/L]	73.3±0.0	12.5±0.0	120.7±0.0	102.7±0.1	158.2±0.0	1233.8±0.8	7.1±0.0	<0,04	
Carbonatos (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ) [mgCaCO <sub>3</sub> /L]	15.2±2.4	13.8±2.4	15.2±2.4	15.2±2.4	4.2±0.0	16.6±0.0	18.0±2.4	6.9±2.4	
Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) [mgCaCO <sub>3</sub> /L]	121.1±6.3	56.0±3.6	85.1±9.0	51.2±1.2	44.3±1.2	107.2±1.2	66.4±2.1	27.0±4.2	
Cálcio (Ca <sup>2+</sup> )	37.50±0.21	7.01±0.04	275.20±3.21	232.5±4.4	155.20±0.58	135.5±0.0	10.50±0.06	7.84±0.02	
Potássio (K <sup>+</sup> )	0.86±0.01	0.004±0.00	5.52±0.24	3.1±0.2	2.38±0.02	2.1±0.0	1.27±0.00	1.40±0.01	
Sódio (Na <sup>+</sup> )	46.53±0.10	6.18±0.07	ND	521.1±4.5	ND	695.1±2.6	10.97±0.06	4.79±0.04	
Magnésio (Mg <sup>2+</sup> )	23.30±0.00	3.52±0.02	159.67±0.58	227.0±2.5	47.47±0.12	94.0±1.1	5.01±0.01	2.97±0.01	
Prata (Ag) mg/L	BDL	BDL	4.54±0.06	3.96±0.09	BDL	3.69±0.26	BDL	BDL	
Alumínio (Al) mg/L	3.10±0.01	0.86±0.05	15.68±0.10	16.21±0.06	7.11±0.04	12.05±0.06	0.82±0.04	0.62±0.03	
Arsénio (As) mg/L	0.95±0.01	0.22±0.01	4.24±0.04	4.45±0.01	1.98±0.02	3.25±0.02	0.32±0.00	0.24±0.01	
Cádmio (Cd) mg/L	0.48±0.00	0.15±0.00	1.83±0.02	2.21±0.01	0.81±0.00	1.27±0.01	0.18±0.00	0.14±0.00	
Cobalto (Co) mg/L	0.17±0.00	0.12±0.00	0.25±0.00	0.28±0.00	0.23±0.00	0.18±0.00	0.13±0.00	0.12±0.00	
Crómio (Cr) mg/L	0.17±0.00	0.13±0.00	0.27±0.01	0.266±0.00	0.22±0.00	0.18±0.00	0.14±0.00	0.13±0.00	
Cobre (Cu) mg/L	0.16±0.01	0.06±0.00	0.64±0.01	0.68±0.00	0.32±0.02	0.45±0.03	0.07±0.01	0.05±0.00	
Ferro (Fe) mg/L	0.25±0.01	0.27±0.00	0.22±0.02	0.99±0.01	0.235±0.006	0.08±0.02	0.39±0.01	0.69±0.00	
Lítio (Li) mg/L	0.72±0.01	0.18±0.00	4.23±0.05	3.97±0.03	1.79±0.03	3.32±0.07	0.20±0.01	0.18±0.00	
Manganês (Mn) mg/L	0.23±0.00	0.22±0.00	BDL	0.16±0.00	0.23±0.00	0.11±0.00	0.23±0.00	0.24±0.00	
Níquel (Ni) mg/L	0.14±0.00	0.09±0.00	0.29±0.00	0.32±0.01	0.20±0.00	0.18±0.00	0.10±0.00	0.12±0.00	
Chumbo (Pb) mg/L	0.62±0.01	0.14±0.00	2.39±0.01	2.54±0.01	1.21±0.02	1.83±0.03	0.20±0.00	0.15±0.00	
Zinco (Zn) mg/L	16.80±0.00	2.31±0.01	ND	1.55±0.02	36.72±0.06	60.99±0.10	3.30±0.01	1.95±0.01	

Os dois pontos acima da zona de mineração correspondem ao rio Moatize (14) e Revúboe, Up-stream (15). No ponto do rio Moatize em causa (figura 9a), observou-se a presença acentuada de algas e outras espécies de plantas aquáticas. O rio é a única fonte de água das comunidades de Minga e Nhansosso. No rio Revúboe up-stream, o caudal era baixo. Na região onde foram medidos os parâmetros, no ponto 15 (figura 9b), a população efectua escavações para extracção de areia para construção.



a) Rio Moatize (Ponto 14)



b) Rio Revúboe Up-stream (Ponto 15)

Figura 9: a) Rio Moatize; B) Rio Revuboe

Na zona de descarga da mineradora B, observou-se a presença de um pântano com plantas, onde foi colhida a amostra de água. Tanto na zona de descarga (figura 10) como ao longo do leito do rio, observou-se uma cor esbranquiçada no solo e rochas, que pode ser indicativo de precipitação de um ou mais iões na região.



a) Canal de descarga dos efluentes



b) Solo na região

Figura 10: Zona de descarga da mineradora B: a) Canal de descarga dos efluentes e b) Solo na região.

No rio Mbirimbi, nas proximidades da zona de descarga da mineradora B, foi observada uma camada de óleos a cobrir a superfície do rio (figura 11a). Mais à jusante, Mbirimbi Mid-stream (Ponto 4) a água do rio apresenta uma cor amarela-acastanhada (figura 11b). A população local efectua a pesca no rio.



a) Montante



b) Mid-stream (Ponto 4)

*Figura 11: Rio Mbirimbi : a) Montante e b) Mid-stream.*

No rio Revúboe Mid-stream, ponto 13, a população local usa a água para recreação, lavagem de roupas e loiça. Ocorrem também lavagens de veículos nas margens do rio.

Em cursos de água subterrâneos, foram ao todo analisadas oito amostras de água, das quais três antes das zonas de mineração de carvão (9, 10 e 11) e cinco depois (1, 2, 5, 6 e 7). O ponto (9) é alvo dos praticantes de mineração artesanal de carvão. Na tabela 3, abaixo, podem-se observar os resultados das medições e análises nos cursos de água subterrâneos.

Tabela 3: Resultados dos cursos de água subterrânea.

Parâmetros	Antes			Depois					
	Ponto 9 (Represa Cachoeira)	Ponto 10 (Fontenária Cachoeira)	Ponto 11 (Riacho Moatize)	Ponto 1 (Rio Nharenga - Downstream)	Ponto 2 (Fontenária Izinda)	Ponto 5 (Rio Muarazi)	Ponto 6 (Poço Kanhenga)	Ponto 7 (Fontenária Cancupe)	
Temperatura (°C)	24.4±0.1	29.3±0.1	34.7±0.9	27.9±0.2	31.1±0.8	30.4±0.3	2.7±0.1	29.4±0.3	
ORP(mV)	88.2±0.2	129.2±0.9	75.8±2.1	52.8±5.4	37.8±15.8	5.7±5.0	294.2±0.6	191.3±4.4	
pH	7.0±0.0	6.2±0.0	6.6±0.1	6.5±0.1	6.6±0.2	6.6±0.1	6.7±0.0	7.5±0.1	
EC (µS/cm)	1567.7±10.2	1208.7±0.6	1956.7±46.7	2768±15.6	11.2x10 <sup>3</sup> ±0.0	1411.3±1.2	2690.3±5.1	5406.3±33.3	
DO	%	77.9±1.7	80.2±2.3	148.3±2.4	62.2±5.3	41.9±3.5	13.8±3.2	31.1±2.9	121.9±0.9
	mg/L	6.2±0.1	5.9±0.2	10.1±0.1	5.1±1	2.9±0.2	1.0±0.3	2.4±0.2	9.0±0.1
TDS (mg/L)	1018.3±5.5	785.3±0.6	1270.3±30.7	1799.7±7.5	7338.0±79.7	917.0±2.0	1747.3±4.5	3520.7±31.9	
Salinidade (PSU)	0.77±0.01	0.57±0.01	0.96±0.02	1.42±0.01	6.36±0.01	0.67±0.00	1.38±0.00	2.89±0.01	
Cloretos (Cl <sup>-</sup> ) [mg/L]	110.8±1.0	29.0±1.0	198.4±6.4	159.6±1.0	279.7±1.0	50.5±2.1	46.4±1.0	824.5±2.7	
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) [mg/L]	57.3±0.0	<0.5	12.7±0.6	14.6±0.0	<0.5	<0.5	7.5±0.2	12.6±0.1	
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) [mg/L]	67.1±0.8	131.6±0.1	340.2±0.4	108.8±0.4	587.5±0.4	107.8±0.0	100.1±0.1	104.8±0.1	
Carbonatos (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ) [mgCaCO <sub>3</sub> /L]	271.2±10.4	168.8±2.4	8.3±0.0	8.3±0.0	19.4±2.4	5.5±2.4	0.0±0.0	168.8±2.4	
Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	568.0±1.2	938.9±3.2	92.7±1.2	115.5±1.2	166.7±1.2	93.4±2.1	381.2±1.2	938.9±3.2	
Cálcio (Ca <sup>2+</sup> )	40.96±0.15	53.06±0.55	31.73±0.35	105.2±0.6	13.6±0.1	52.10±0.21	56.23±0.52	15.5±0.12	
Potássio (K <sup>+</sup> )	3.77±0.03	1.61±0.01	3.00±0.02	11.2±0.1	1.9±0.0	3.04±0.04	1.80±0.02	6.20±0.19	
Sódio (Na <sup>+</sup> )	74.53±0.46	120.80±1.15	118.47±0.58	ND	554.1±6.9	40.23±0.00	103.6±0.6	ND	
Magnésio (Mg <sup>2+</sup> )	53.10±0.30	43.50±0.00	24.53±0.06	25.4±0.1	18.5±0.2	27.57±0.29	22.70±0.10	23.53±0.06	
Prata (Ag) mg/L	2.12±0.01	2.24±0.03	BDL	0.49±0.01	0.98±0.05	2.21±0.05	2.07±0.03	1.39±0.03	
Alumínio (Al) mg/L	7.05±0.05	6.88±0.06	3.09±0.02	7.94±0.13	3.80±0.15	5.85±0.21	6.21±0.01	4.43±0.08	
Arsênio (As) mg/L	1.88±0.01	1.91±0.02	1.23±0.00	1.73±0.14	1.04±0.01	1.63±0.04	1.62±0.02	1.22±0.01	
Cádmio (Cd) mg/L	0.80±0.00	0.67±0.00	0.96±0.00	0.37±0.00	0.27±0.00	0.42±0.01	0.34±0.00	0.36±0.00	
Cobalto (Co) mg/L	0.11±0.00	0.10±0.00	0.50±0.00	0.06±0.00	0.04±0.00	0.07±0.00	0.06±0.00	0.05±0.00	
Crômio (Cr) mg/L	0.12±0.00	0.11±0.00	0.18±0.00	0.07±0.00	0.06±0.00	0.10±0.00	0.09±0.00	0.08±0.00	
Cobre (Cu) mg/L	0.35±0.03	0.31±0.01	0.17±0.00	0.22±0.00	0.17±0.01	0.25±0.02	0.28±0.00	0.23±0.00	
Ferro (Fe) mg/L	0.75±0.01	0.0048±0.0020	0.166±0.014	2.88±0.02	BDL	0.10±0.00	0.83±0.01	BDL	
Lítio (Li) mg/L	2.23±0.00	2.30±0.02	0.27±0.01	1.00±0.00	1.42±0.04	2.16±0.07	2.14±0.03	1.88±0.01	
Manganês (Mn) mg/L	0.16±0.00	BDL	0.23±0.00	0.96±0.01	BDL	0.63±0.01	BDL	BDL	
Níquel (Ni) mg/L	0.10±0.00	0.10±0.00	0.15±0.00	0.06±0.00	0.05±0.00	0.07±0.00	0.05±0.00	0.08±0.00	
Chumbo (Pb) mg/L	1.22±0.00	1.13±0.01	0.64±0.00	0.85±0.01	0.61±0.00	0.93±0.02	0.91±0.01	0.76±0.01	
Zinco (Zn) mg/L	32.99±0.26	26.59±0.20	17.42±0.06	18.92±0.06	10.45±0.06	16.55±0.06	13.59±0.00	13.19±0.00	

Os três pontos antes da zona de mineração correspondem à represa de Cachoeira (9) sobre o rio Moatize, fontenária em Cachoeira (10) e escavação no leito do rio Moatize (11). A represa de Cachoeira foi construída pela ARA-Zambeze (actualmente ARA-Centro), para auxiliar a população na obtenção de água na época seca. A população usa a água da represa para todos os fins. A água também é usada pelos mineradores artesanais de Ouro durante o processo de separação. A água da fontenária em Cachoeira também é usada para todos os fins. A população diz que a água tem sabor salgado e que tem dificuldades para lavar com a mesma. A escavação no leito do rio Moatize (11) encontra-se numa zona onde escavações são feitas no leito para a retirada de areia para a produção de blocos.

Abaixo da zona de mineração, os pontos correspondem a água retirada do leito do rio Nharenga à jusante (1), fontenária na localidade de Izinda (2), leito do rio Muarazi (5), poço em Kanhenga (6) e fontenária na localidade de Cancupe (7). A população da localidade de Izinda usa a água do rio Nharenga para todos os fins na época chuvosa e para o pasto na época seca. A água da fontenária é usada para o pasto, lavagem de roupa e banho. A água para o consumo e confecção de alimento é retirada no rio

Zambeze. À montante do rio Nharenga (ponto 6), a água extraída pela população de Kanhenga para todos os fins. No leito do rio Muarazi a população escavou para ter acesso à água subterrânea para o seu consumo.

A temperatura nos cursos de água superficial varia de 24.2-35.9°C e na água subterrânea de 2.7±0.1 à 34.7±0.9 °C. As temperaturas observadas nos cursos de água subterrânea foram relativamente baixas quando comparadas com as temperaturas observadas nos cursos de água superficial, o que era de se esperar visto que a temperatura da água é fortemente dependente da temperatura ambiente no dia e hora da medição, radiação solar incidente, e para os cursos de água subterrâneos profundidade das escavações para ter acesso à água.

As concentrações de DO observados ao longo dos cursos de água superficial foi de 8.9±0.0 - 11.0±0.6 mg/L e nos cursos de água subterrânea de 1.0±0.3 - 10.1±0.1mg/L. Os graus de saturação de DO dos cursos de água superficial estavam entre 111.5±0.6% e 169.0±9.1% e dos cursos de água subterrânea entre 13.8±3.2 - 148.3±2.4%. Tanto para a concentração como para o grau de saturação os limites inferiores observados nos cursos de água superficial foram maiores que os observados nos cursos de água subterrâneos. Este fenómeno era esperado visto que a concentração de DO na água depende do contacto da água com o ar atmosférico. Para os limites superiores esta diferença já não é tão saliente, isto provavelmente devido ao facto de algumas escavações para acesso aos cursos de água subterrâneos terem sido rasas, expondo as águas subterrâneas às condições à superfície. Os graus de saturação ultrapassam os 100%, isto devido à contribuição que o oxigénio puro produzido pelas algas tem sobre a quantidade de DO na água.

O pH observado nos diversos pontos de água superficial e subterrânea, incluindo efluentes de mineração, são próximos a neutro à alcalino. Todos os valores de pH medidos estavam entre 6.2±0.1 e 8.2±0.0, o que significa que as drenagens de minas ocorrentes no local não se classificam como ácidas, de acordo com a classificação de águas de minas do *Global Acid Rock Drainage (GARD) Guide* (Opitz & Timms, 2016). Tais valores dão a entender que a geologia local é rica em minerais neutralizantes de ácido, minerais estes que reagem consumindo os iões hidrónio formados pela oxidação da Pirite.

Pelo mapa abaixo, Figura 12, é possível observar que os menores valores de pH observados tendem a se encontrar à jusante das mineradoras. Observou-se que valores de pH das amostras de água superficial ( $6.3\pm 0.1$  a  $8.2\pm 0.0$ ) tenderam a ser de maneira geral maiores que os valores observados nas amostras de água subterrânea ( $6.2\pm 0.0$  -  $7.5\pm 0.1$ ). O pH do rio Revúboe sofre uma diminuição (de  $8.2\pm 0.0$  a  $8.0\pm 0.1$ ) com o descarte dos efluentes da mineradora C no mesmo. Pela natureza topográfica da área, as mineradoras podem também ter influência sobre a água do ponto 11 (Riacho Moatize), por se encontrar numa zona baixa em relação à zona de mineração, apesar deste se encontrar antes da zona de mineração.

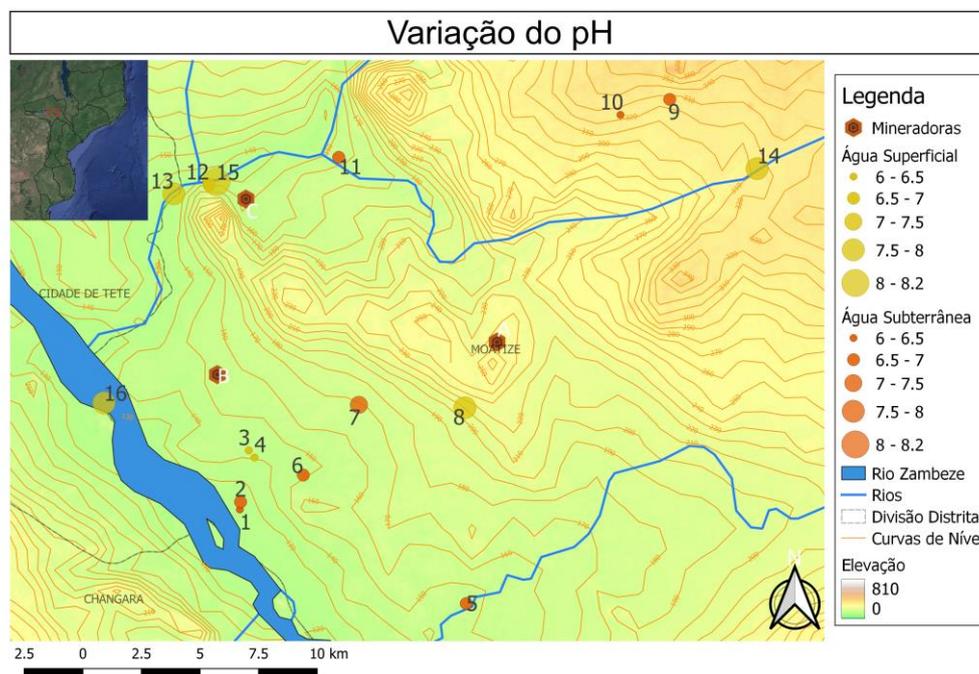


Figura 12: Variação de pH na área de estudo.

Todos os valores de pH estão dentro dos limites para efluentes de mineração e produção de carvão em Moçambique (Assembleia da República de Moçambique, 2004). Analogamente, todos os valores estão dentro dos padrões de qualidade de água para o consumo humano estabelecido pelo MISAU (MISAU, 2004), excepto a fontenária em Cancope para os cursos de água subterrâneos e zona de descarga da mineradora B e o rio Mbirimbi para os cursos de água superficiais.

Olhando para os TDS observados na área de estudos, observou-se que estes eram de maneira geral elevados e que variam nos cursos de água ( $89.0\pm 1.0$ -  $7338.0\pm 79.7$  mg/L), sofrendo influência negativa pela actividade mineira. A mineradora B é a que

tem impacto mais negativo sob os TDS na água, com a água superficial e subterrânea à sua jusante a apresentar os maiores valores observados, ambos acima de 7000mg/L ( $7053.0 \pm 7.0$  e  $7338.0 \pm 79.7$  mg/L). A mineradora C contribui para um aumento no rio Revúboe (de  $147.0 \pm 6.1$  a  $160.7 \pm 0.6$  mg/L), podendo também estar por detrás dos elevados TDS ( $1270.3 \pm 30.7$  mg/L) observados no ponto de água subterrânea antes, que apesar de estar à montante, está numa zona mais baixa. A variação dos TDS pode ser observada na figura 13.

Os efluentes, zona de descarga, Rio Mbirimbi, nos cursos de água superficial, e todos os cursos de água subterrâneos excepto na fontenária em Cachoeira, à montante, e no rio Muarazi à jusante, ultrapassaram o limite estabelecido pelo MISAU para água para consumo. A legislação não estabelece limites para TDS em efluentes de mineração de carvão mas (Pondja Jr., et al., 2016) propuseram que este fosse 300mg/L, e os TDS nos efluentes, zona de descarga, Rio Mbirimbi e Rio Moatize, que está acima da região de forte actividade mineira, bem como todos os pontos de água subterrânea, ultrapassaram este valor.

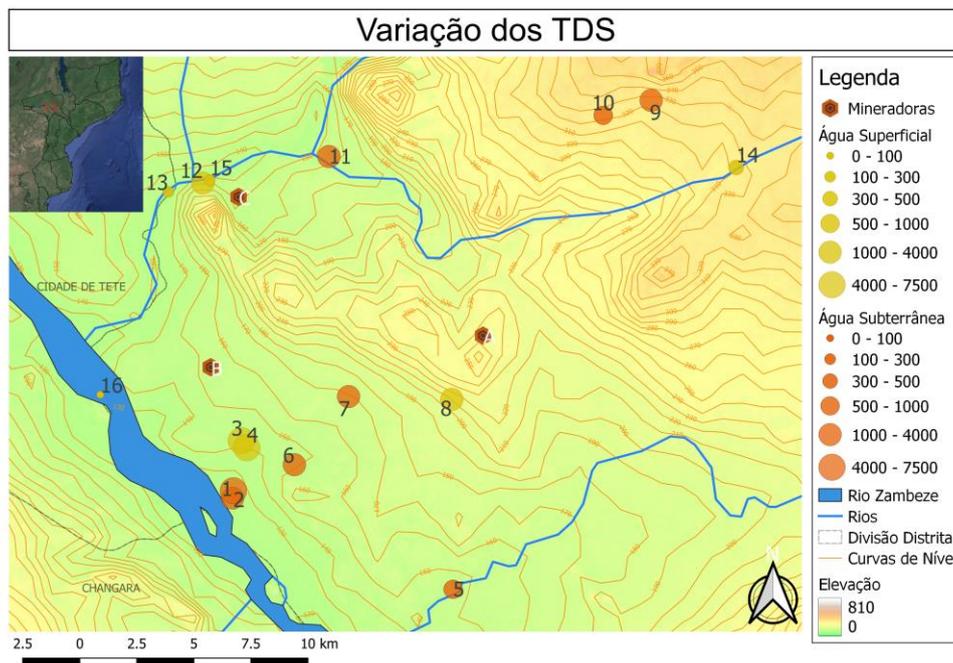


Figura 13: Variação de TDS na área de estudo.

A concentração de TDS nos efluentes e alguns dos outros pontos, tanto de água superficial como subterrânea, ultrapassa em muito os 1000mg/l, o que classifica, de acordo com a classificação de águas de minas do GARD Guide (Opitz & Timms,

2016), as drenagens de minas ocorrentes no local como Drenagens Neutras e Drenagens Salinas.

À semelhança dos TDS, os valores de EC observados ( $138.7 \pm 1.5 - 11.2 \times 10^3 \pm 0.0$   $\mu\text{S/cm}$ ) foram elevados (figura 14). Este parâmetro sofre também uma influência negativa pelas actividades mineiras. A mineradora A tem maior influência sobre a EC na água subterrânea ( $5406.3 \pm 33.3$   $\mu\text{S/cm}$ ) do que superficial ( $4238.0 \pm 20.3$   $\mu\text{S/cm}$ ), isto devido ao facto do efluente passar por um tratamento antes de escoado. A mineradora C, tal como no caso dos TDS eleva ligeiramente a EC do rio Revúboe (de  $216.7 \pm 7.6$  a  $247.7 \pm 1.2$   $\mu\text{S/cm}$ ) com o descarte dos efluentes no rio, e eleva a EC do curso de água subterrânea à montante ( $1956.7 \pm 46.7$   $\mu\text{S/cm}$ ). A mineradora B é a que mais impactos negativos tem sobre a EC, com os extremos máximos para a água superficial e subterrânea ( $10.9 \times 10^3 \pm 0.0$  e  $11.2 \times 10^3 \pm 0.0$   $\mu\text{S/cm}$ ) tendo sido observados em cursos de água associados a esta. Tanto para os valores de TDS como de EC foi observado que os valores no rio Mbirimbi, para onde os efluentes escoam, eram mais elevados que no ponto de descarga, assim como (Johansson, 2019) observou. Isto deve-se provavelmente ao facto da água que fica na zona de descarga estar estagnada, numa zona pantanosa, o que possibilita uma espécie de tratamento, natural, por evaporação, sedimentação, precipitação entre outros mecanismos físico-químicos e/ou biológicos, visto que a região apresenta vegetação.

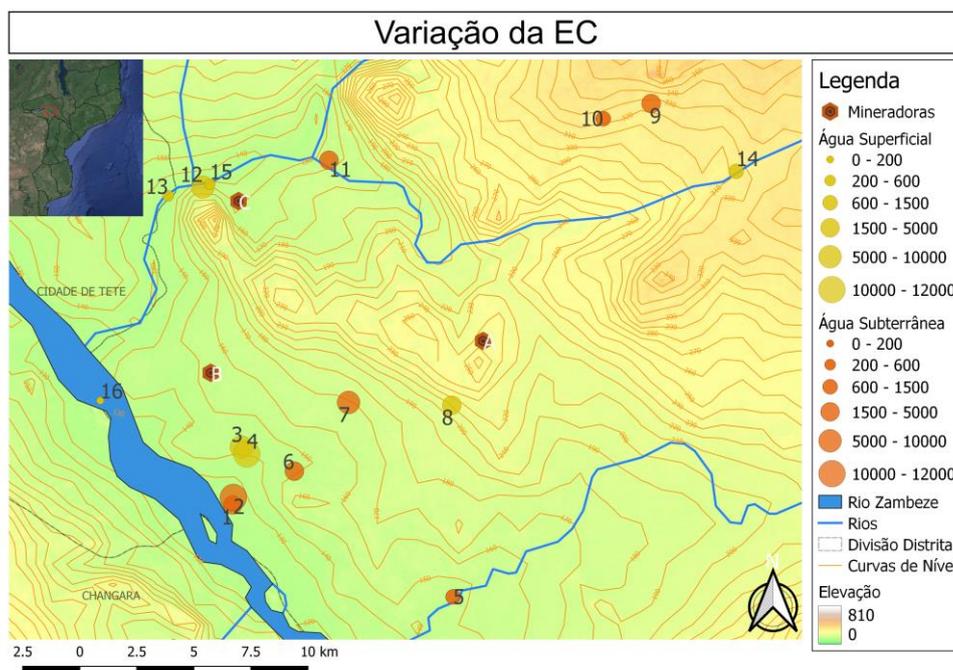


Figura 14: Variação da EC na área de estudo.

O MISAU estabeleceu no Regulamento sobre a Qualidade de Água para o Consumo Humano, que a condutividade eléctrica deve estar entre 50-2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Na água superficial, os efluentes, zona de descarga e rio Mbirimbi ultrapassam os limites em mais do que o dobro. Já para os cursos de água subterrâneos, quatro têm os valores de EC dentro dos limites de qualidade de água para consumo humano impostos pelo MISAU, e quatro se encontram acima dos limites previstos.

Para auxiliar na discussão, foi feito o balanço iónico nos cursos de água superficiais e subterrâneos, em  $\text{mEq}/\text{L}$  (tabelas da folha cálculo em anexo). Alguns pontos apresentaram um erro acima dos limites ( $\pm 20\%$ ) (Pinto, et al., 2006), razão pela qual os iões serão no presente trabalho abordados de maneira semi-quantitativa, olhando para a tendência de aumento ou diminuição com as actividades mineiras desenvolvidas na região. Foi também calculada a correlação entre a EC e os valores cumulativos dos iões (Figuras 15 e 16) em  $\text{mEq}/\text{L}$ .

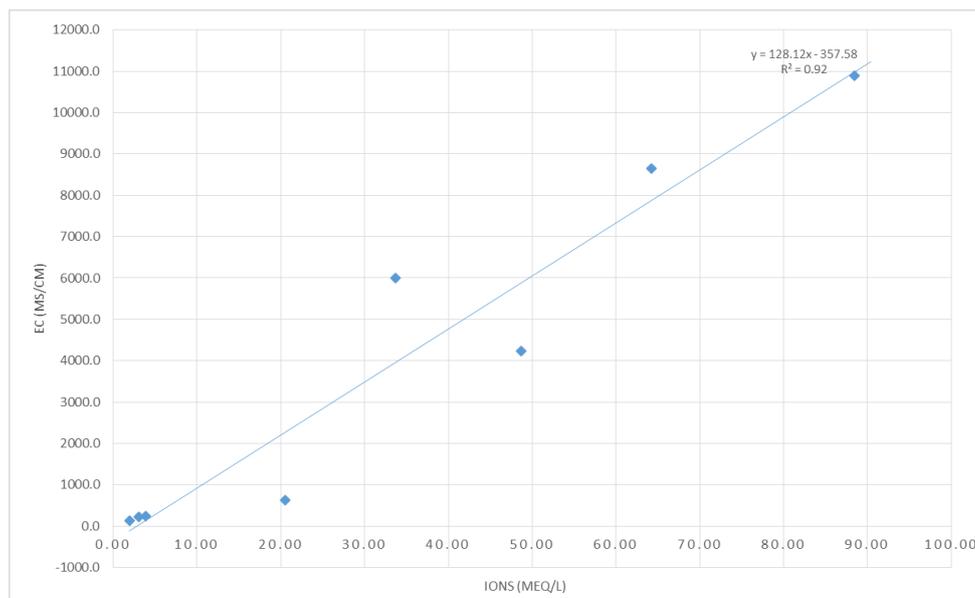


Figura 15: Correlação entre EC e Iões nos cursos de água superficial.

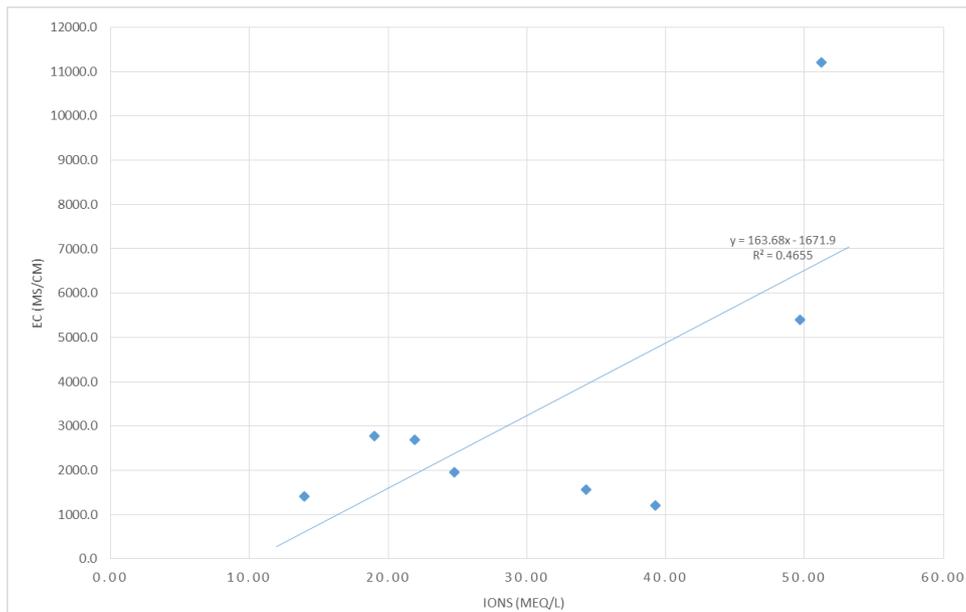


Figura 16: Correlação entre EC e Iões nos cursos de água subterrâneos.

A carga de iões é bastante variada ao longo da área de estudo (figura 17). Observou-se que a actividade mineira aumenta a carga de iões na região (tendo a média de 24.36 mEq/L à montante e 36.04 mEq/L à jusante). A actividade aumenta a carga de iões nos cursos de água subterrânea mais do que nos pontos de água superficial, o que se pode justificar pelo maior contacto entre a água e os minerais presentes, o que favorece a oxidação e o intemperismo químico dos minérios (Correia, 2014).

A mineradora A é a mineradora com maior influência na carga de iões das águas subterrâneas, seguindo as mineradoras B e C. A carga de iões eleva e com a mistura e transporte reduz mais a jusante, como se pode observar nos pontos 5 e 6 de águas subterrâneas. A mineradora C aumenta a carga de iões no rio Revúboe, bem como no ponto 11, antes da zona de mineração.

O ponto 14, rio Moatize, à montante, apresentou uma carga de iões elevada, no entanto este ponto se encontra numa cota acima da cota das zonas de mineração, o que exclui a possibilidade de drenagens de minas das mineradoras no estudo abordadas serem a causa deste aumento, resultando então esta carga de outras actividades ou características daquele local. O rio Zambeze apresentou uma baixa carga de iões, isto devido ao caudal que o rio apresentava que propiciou a diluição.

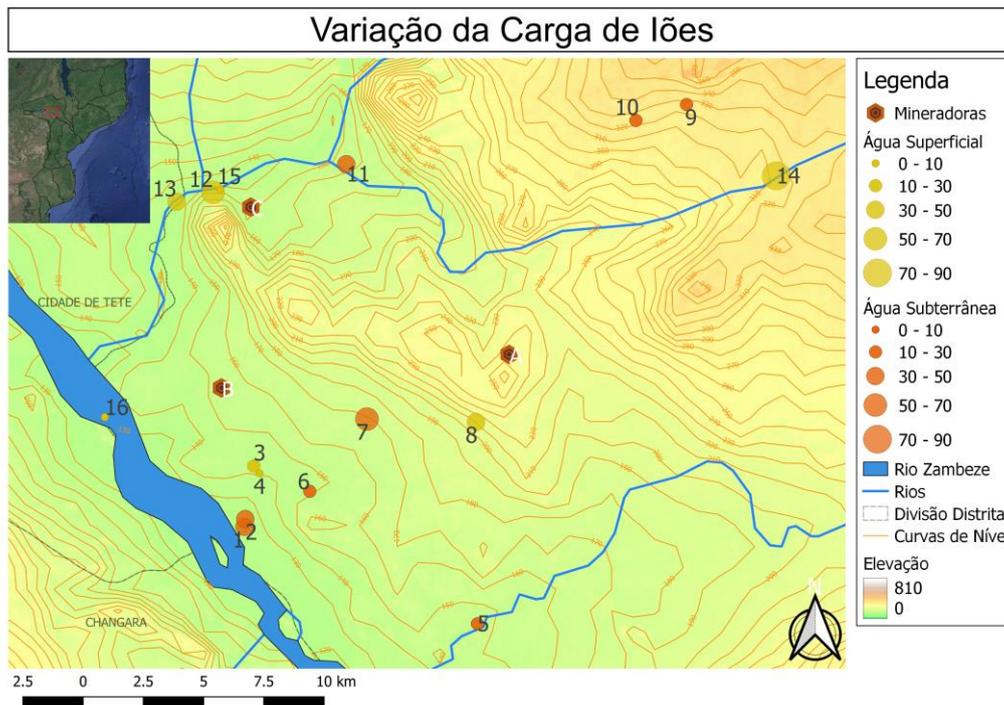


Figura 17: Variação da Carga de Iões na área de estudo.

Desvios nos cálculos de balanço iónico, e consequentemente nas ilações aqui tiradas, que indicam desequilíbrio eléctrico da água, podem ser indicativo da presença de iões em quantidades significativas que o plano de amostragem e análise não considerou (Braz, 2014). Além disto, os catiões cuja determinação não foi possível também influenciam para o desvio, principalmente o sódio. No entanto, a forte correlação observada nos cursos de água superficiais ( $R^2=0.92$ ), semelhante ao observado por (Pinto, et al., 2006), é indicativo de que o desvio observado é numa tendência, visto que a EC é indicativo da quantidade de iões na água. Nas águas subterrâneas a correlação foi moderada ( $R^2=0.47$ ), o que pode ser indicativo de outras possíveis razões de desvio além de iões negligenciados, entre as quais falhas no processo de amostragem e análise.

Os Sulfatos e Ferro, são dois dos parâmetros fundamentais para a caracterização de drenagens, observou-se que os Sulfatos ( $<0,04 - 1233.8 \pm 0.8$ , mg/L) sofrem influência negativa com a actividade mineira. Estes apresentam valores mais elevados na zona de actividade mineira e à jusante desta (figura 18). A mineradora B é a que mais influência sobre a quantidade de Sulfatos, tanto para águas superficiais ( $1233.8 \pm 0.8$  mg/L) como subterrâneas ( $587.5 \pm 0.4$  mg/L), com extremos tendo sido observados em cursos de água associados a esta. A zona de descarga apresenta menor quantidade

de Sulfatos ( $102.7 \pm 0.1$  mg/L) do que o rio Mbirimbi mais abaixo ( $1233.8 \pm 0.8$  mg/L), resultados semelhantes aos obtidos por (Johansson, 2019). No entanto o contrário se observa quando se considera a carga de iões em geral. Isto provavelmente encontra explicação no facto da zona de descarga ser uma zona pantanosa, onde provavelmente ocorrem fenómenos como sedimentação, precipitação, absorção, adsorção e trocas iónicas, fenómenos que contribuem para o tratamento da água.

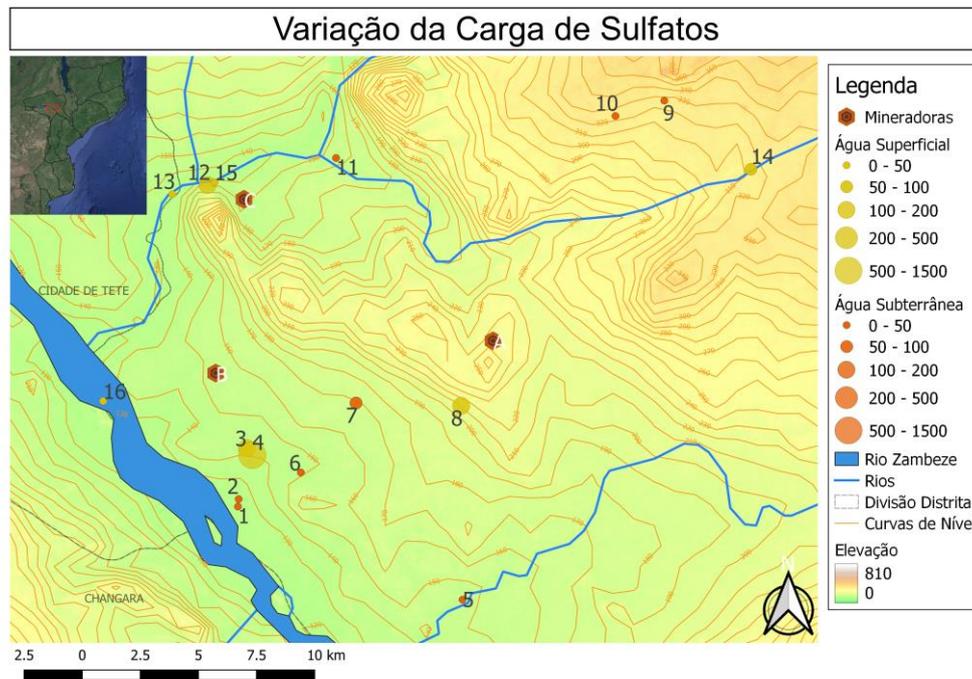


Figura 18: Variação da Carga de Sulfatos na área de estudo.

A quantidade de Ferro observada foi de maneira geral baixa ( $BDL - 2.88 \pm 0.02$ , mg/L), tal como observado por (Johansson, 2019) e (Pondja Jr., et al., 2017), estando abaixo do nível de detecção em alguns dos pontos porque Ferro em pH elevado precipita como  $Fe(OH)_3(s)$ .

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1 Conclusões

Foram identificadas três fontes principais de poluição mineira para a água na bacia do rio Zambeze, no distrito de Moatize. Estas são as mineradoras de carvão no presente trabalho denominadas Mineradora A, B e C. Os seus efluentes são descarregados em cursos de água superficiais próximos às suas áreas de operação, descarregando a mineradora A para um canal fechado que vai dar ao rio Catete, tributário do rio Moatize. A mineradora B descarrega os seus efluentes sobre o rio Mbirimbi e a mineradora C para o rio Revúboe, tributário do rio Zambeze.

Foi observado que a actividade mineira não influencia significativamente o valor do pH na área estudada, visto que tanto para os cursos de águas superficiais ( $6.3 \pm 0.1$  à  $8.2 \pm 0.0$ ) como subterrâneos ( $6.2 \pm 0.0$  à  $7.5 \pm 0.1$ ), é próximo neutro a alcalino, no entanto o valor do pH da água subterrânea é relativamente menor que da água superficial.

Observou-se também que os valores de EC ( $138.7 \pm 1.5 - 11.2 \times 10^3 \pm 0.0 \mu\text{S/cm}$ ) e de TSD ( $89.0 \pm 1.0 - 7338.0 \pm 79.7 \text{ mg/L}$ ) são significativamente aumentadas pelas actividades mineiras na bacia do Zambeze.

No que diz respeito aos iões, conclui-se que a actividade mineira aumenta a carga dos mesmos na água (de uma média de 24.36 para 36.04 mEq/L), mais nos cursos de água subterrâneos do que superficiais. Os sulfatos ( $<0,04 - 1233.8 \pm 0.8 \text{ mg/L}$ ) são particularmente elevados à jusante da mineradora B ( $1233.8 \pm 0.8 \text{ mg/L}$ ), não apresentando os cursos de água muito elevada concentração de Ferro (BDL –  $2.88 \pm 0.02 \text{ mg/L}$ ), devido ao pH da mesma.

Por fim, com o presente estudo, conclui-se que a actividade mineira do local apresenta drenagens neutras e salinas de minas, que têm impactos negativos na qualidade de água da bacia do rio Zambeze no distrito de Moatize. Estas têm influência negativa tanto na jusante como na montante, devido ao facto da região imediatamente antes da zona de mineração estar numa zona baixa, Estas actividades, fazem com que a água na região tenha características que perigam a saúde pública.

## 6.2 Recomendações

Após a realização do presente estudo recomenda-se:

- A realização de estudos adicionais para aferir a evolução da drenagem de minas gerada;
- A realização de uma análise qualitativa dos cursos de água para aferir que iões estão presentes em maior quantidade na amostra e posteriormente determinar as suas concentrações;
- Realização de fiscalização às empresas mais frequentemente e sem informais;
- Realizar um estudo semelhante que dure o ano meteorológico inteiro para aferir como variam as características físico-químicas da água da bacia nas diferentes estações;
- Investimento por parte das empresas de mineração em mecanismos de tratamento de água e mitigação dos seus impactos nos cursos de água locais;
- Actualização da legislação referente à limites para efluentes mineiros; e
- Recomenda-se que as entidades superintendentes das áreas de Saúde e Ambiente colaborem por forma a fazer um mapeamento das características físico-químicas da água na região e desenhar um plano para que a população local não seja exposta a tais riscos à saúde pública.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- APHA, AWWA & WEF, 1985. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 16th ed. Washington, D.C: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- APHA, AWWA & WEF, 2017. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd ed. Washington, D.C: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Appelo, C. A. J. & Postma, D., 2005. *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2nd ed. Amsterdam: A. A. Balkema Publisher.
- Atlantum, 2008. *Parâmetros Analíticos*. [Online] Available at: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/parametros-analiticos/> [Acedido em 5 November 2021].
- Beacon Hill Resources Plc, 2012. *Completion of Minas Moatize Coking Coal Project / Definitive Feasibility Study*. [Online] Available at: <https://www.rns-pdf.londonstockexchange.com/rns/8514x -2012-2-21.pdf> [Acedido em 31 Maio 2021].
- Bhushan, C. & Basu, D., 2017. *Gauging The Ganga: Guidelines for sampling and monitoring water quality*. Nova Deli: Centre for Science and Environment.
- Braz, A., 2014. *CARACTERIZAÇÃO DE ÁGUAS PRODUZIDAS PROVENIENTES DE PLATAFORMAS MARÍTIMAS DA BACIA DO CEARÁ. TESE DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL*. Fortaleza: UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ.
- Correia, C., 2014. *Hidrogeologia, Hidroquímica e Análise de Risco dos Sistemas Aquíferos nas Envoltentes das Exurgências de Montouro e dos Olhos da Fervença (Cantanhede)*. Tese de Doutoramento. Coimbra: Universidade de Coimbra.

- Cumbe, Â. N. F., 2007. *O Património Geológico de Moçambique: Proposta de Metodologia de Inventariação, Caracterização e Avaliação*. Braga: Universidade do Minho.
- Department of Mines And Energy, 2016. *Methodology for the Sampling of Surface Water*. s.l.:Northern Territory Government .
- Dold, B., 2014. Evolution of acid mine drainage formation in sulphidic mine tailings. *Minerals*, Volume IV, pp. 621-641.
- Duarte, J. V. d. N. et al., 2016. *Balanço Iônico e Classificação de Águas Envasadas e Comercializadas no Brasil e na União Europeia*. Campina grande, Realize Editora.
- EPA, Ireland, 2001. *Parameters of Water Quality: Interpretation and Standards*. Wexford: Environmental Protection Agency, Ireland.
- EPA, 1983. *Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes*. Washington DC: Environmental Protection Agency .
- EPA, 2014. *Sampler's Guide*. Washington DC: Environmental Protection Agency.
- FAO, 1997. The Zambeze basin. Em: *Irrigation potential in Africa: A basin approach*. s.l.:FAO Land and Water Development Division, pp. 70-73.
- Fetter, C. W., 2001. *Applied Hydrogeology*. 4th ed. New Jersey: Prentice-Hall.
- Fundação Nacional de Saúde, 2006. *Manual Prático de Análise de Água*. 2nd ed. Brasília: Fundação Nacional de Saúde.
- Governo da Província de Tete, 2017. *Geografia*. [Online] Available at: <https://www.tete.gov.mz/por/A-Propincia/Geografia2> [Acedido em 02 Julho 2020].
- Governo de Moçambique, 2004. *Regulamento Sobre Padrões de Qualidade Ambiental e de Emissão de Efluentes*. I Série-Número 22 ed. s.l.:Boletim da República - Publicação Oficial da República de Moçambique.

- INE, 2007. *Indicadores Socio-Demográficos Província de Tete*. [Online] Available at: <http://www.ine.gov.mz/operacoes-estatisticas/censos/censo-2007/rgph-2007/indicadores-socio-demograficos-provincia-de-tete-2007.pdf/view> [Acedido em 2 Agosto 2020].
- Instituto Nacional de Estatística, 2018. *Anuário Estatístico da Província de Tete*. Maputo: Instituto Nacional de Estatística.
- ITIE Moçambique, 2018. *Relatório de progresso anual - 2017 e 2018*, Maputo: ITIE Moçambique.
- Johansson, V., 2019. *A water quality assessment and environmental impact analysis of the local mining along the Zambezi River in Tete, Mozambique*. Master Thesis. Lund: Lund University.
- Lächelt, S., 2004. *Geology and Mineral Resources of Mozambique*. Maputo: Direcção Nacional de Geologia.
- Lottermoser, B. G., 2010. *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. 3rd ed. Berlín: Springer.
- Marcus, J. J., 1997. *Mining Environmental Handbook: Effects of Mining on the Environment and American Environmental Controls on Mining*. San Mateo: Imperial College Press.
- Matsumoto, S., Shimada, H. & Sasaoka, T., 2016. The Key Factor of Acid Mine Drainage (AMD) in the History of the Contribution of Mining Industry to the Prosperity of the United States and South Africa: A Review. *Natural Resources*, Volume 7, pp. 445-460.
- Mining Technology, 2021. *Minas Moatize Coal Mine, Tete*. [Online] Available at: <https://www.mining-technology.com/projects/minas-moatize-mine-mozambique/> [Acedido em 31 Maio 2021].
- MIREME, 2017. *Perguntas&Respostas: Saiba mais sobre recursos minerais*. [Online] Available at:

[http://www.mireme.gov.mz/index.php?option=com\\_content&view=article&id=20&Itemid=153](http://www.mireme.gov.mz/index.php?option=com_content&view=article&id=20&Itemid=153)

[Acedido em 1 Março 2020].

- MISAU, 2004. *Regulamento sobre a Qualidade da Água para o Consumo Humano*. I Série- Número 37 ed. s.l.:Boletim Da República- Publicação Oficial da República de Moçambique.
- Muchangos, A. d., 1999. *Moçambique: Paisagens e Regiões Naturais*. s.l.:Edição: do autor.
- Murray, J., Nordstrom, D. K., Dold, B. & Kirschbaum, A., 2021. Seasonal fluctuations and geochemical modeling of acid mine drainage in the semi-arid Puna region: The Pan de Azúcar Pb–Ag–Zn mine, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 109, pp. 1-17.
- Omer, N. H., 2019. *Water Quality Parameters*. [Online] Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/69568> [Acedido em 09 Setembro 2021].
- Opitz, J. & Timms, W., 2016. *Mine water discharge quality – a review of classification frameworks*. Freiberg, International Mine Water Association, pp. 17-26.
- Pinto, B. V., Godoy, J. M. & de Almeida, M. C., 2006. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICO-QUÍMICAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. *Águas Subterrâneas*.
- Pondja Jr., E., Persson, K. & Matsinhe, N., 2017. Assessment of coal mine water in Moatize by static and leaching Assessment of coal mine water in Moatize by static and leaching tests. *Sustain. Water Resour. Manag.*
- Pondja Jr., E., Persson, K. M. & Matsinhe, N. P., 2016. Proposal of Standard Guideline for Effluent Water in Coal Mine In Mozambique. *International Journal of Management and Applied Science*, Volume II, pp. 28-33.
- Pondja Jr, E., 2017. *Environmental aspects of coal mine drainage: a regional study of Moatize in Mozambique*. Doctoral Dissertation. Lund: Lund University.

- Shahhosseini, M., Ardejani, F. D. & Baaf, E., 2017. Geochemistry of rare earth elements in a neutral mine drainage environment, Anjir Tangeh, northern Iran. *International Journal of Coal Geology*, Volume 183, pp. 120-135.
- Skousen, J. G., Sexstone, A. & Ziemkiewicz, P. F., 2000. Acid Mine Drainage Control and Treatment. *Reclamation of Drastically Disturbed Lands*, Issue 41, pp. 1-42.
- Skousen, J. G., Ziemkiewicz, P. F. & McDonald, L. M., 2018. Acid Mine Drainage Formation, Control and Treatment: Approaches and Strategies. *The Extractive Industries and Society*, Outubro, pp. 1-19.
- Source International, 2019. *Estudo de Linha de Base (ELB) da Qualidade Ambiental e dos Direitos Humanos em Seis Comunidades Piloto Ameaçadas pelas Actividades de Mineração de Carvão em Moatize*. Tete: Source International.
- Texas A&M University Corpus Christi, s.d. *Salinity*. [Online] Available at: <https://www.freshwaterinflow.org/salinity/> [Acedido em 7 Setembro 2021].
- UNEP & WHO, 1996. *Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes*. 1st ed. London: E & FN Spon.
- UNEP, WHO, UNESCO & WMO, 1992. *GEMS/WATER Operational Guide*. 3rd ed. Burlington: United Nations Environment Programme, World Health Organization, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization & World Meteorological Organization.
- Vasconcelos, L., 2014. Breve apresentação sobre os recursos geológicos de Moçambique. *Comunicações Geológicas*, II(101), pp. 869-874.
- Vasconcelos, L. A., 1995. *Contribuição para o conhecimento dos carvões da Bacia Carbonífera de Moatize, Província de Tete, República de Moçambique*. Porto: Universidade do Porto.

- Wilson, P. C., 2019. *Water Quality Notes: Alkalinity and Hardness*1. [Online] Available at: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/SS540> [Acedido em 07 Setembro 2021].
- WMO, 2008. *Guide to Hydrological Practices*. 6th ed. Geneva 2: World Meteorological Organization.
- World Bank, 2010. *The Zambezi River Basin: A Multi-Sector Investment Opportunities Analysis*. s.l.:The World Bank.

# **ANEXOS**

**ANEXO 1: Classificação de águas de minas do Guia GARD (Opitz & Timms, 2016)**

<b>Classificação do Guia GARD</b>	<b>Descrição da classe</b>	<b>Limiares</b>
Drenagem Ácida de Rochas/ Drenagem Ácida e Metalífera de Minas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH ácido</li> <li>• Metais moderados a elevados</li> <li>• Sulfatos elevados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH&lt;6</li> </ul>
Drenagem Neutra de Minas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH próximo a neutro a alcalino</li> <li>• Metais baixos a moderados</li> <li>• Sulfatos baixos a moderados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH&gt;6</li> <li>• Sulfatos&lt;1000mg/L</li> <li>• TDS&lt;1000mg/L</li> </ul>
Drenagem Salina	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH neutro a alcalino</li> <li>• Metais baixos (apenas Fe moderado)</li> <li>• Sulfatos, Mg e Ca moderados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH&gt;6</li> <li>• Sulfatos&gt;1000mg/L</li> <li>• TDS&gt;1000mg/L</li> </ul>

**ANEXO 2: Padrões para emissão de efluentes de Mineração e produção de Carvão em Moçambique** (Assembleia da República de Moçambique, 2004)

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
pH	6-9
SST	35-50 mg/L
Óleos e gorduras	10 mg/L
Mercúrio	3.5 mg/L

### ANEXO 3: Padrões para Qualidade da água para Consumo Humano em Moçambique (MISAU, 2004)

Parâmetro	Limite Máximo Admissível	Unidades	Riscos para a Saúde Pública
pH	6-8.5		Sabor, corrosão, irritação da pele
Sólidos Totais Dissolvidos	1000	mg/L	Sabor desagradável
Alumínio	0.2	mg/L	Afecta o sistema locomotor e causa anemia
Arsénico	0.01	mg/L	Cancro de Pele
Cádmio	0.003	mg/L	Vasoconstrição urinária
Cálcio	50	mg/L	Aumenta dureza da água
Chumbo	0.01	mg/L	Intoxicação aguda
Cloretos	250	mg/L	Sabor desagradável e corrosão
Cobre	1.0	mg/L	Irritação intestinal
Crómio	0.05	mg/L	Gastroenterites, hemorragias e convulsões
Ferro Total	0.3	mg/L	Nacrose hemorrágica
Magnésio	50	mg/L	Sabor desagradável
Manganês	0.1	mg/L	Anemia, afecta o sistema nervoso
Mercúrio	0.001	mg/L	Distúrbios renais e neurológicos
Nitrato	50	mg/L	Reduz o O <sub>2</sub> no sangue
Níquel	0.02	mg/L	Eczemas e intoxicações
Sódio	200	mg/L	Sabor desagradável
Sulfato	250	mg/L	Sabor e corrosão
Zinco	3.0	mg/L	Aparência e sabor desagradáveis

**ANEXO 4: Proposta de padrões para emissão de efluentes de Minas de Carvão em Moçambique (Pondja Jr., et al., 2016)**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor máximo</b>
pH	6-9
TDS	300 mg/L
TSS	70 mg/L
COD	150 mg/L
BDO <sub>5</sub>	50 mg/L
Óleos e gorduras	10 mg/L
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	250 mg/L
As	0.1 mg/L
Cd	0.05 mg/L
Cr	0.1 mg/L
Cu	0.3 mg/L
CN	1.0 mg/L
Fe (total)	2.0 mg/L
Pb	0.2 mg/L
Hg	0.002 mg/L
Ni	0.5 mg/L
Zn	0.5 mg/L
Mn	2.0 mg/L
Al	0.2 mg/L

## ANEXO 5: Tabela de datas de amostragem e resultados das análises

Parâmetros		Semana	Dia	Pontos de amostragem												
				Ponto 1 (Rio Nharenga - Downstream)			Ponto 2 (Fontenaria Izinda)			Ponto 3 (Zona de descarga da mineradora B)			Ponto 4 (Rio Mbirimbi Mid-stream)			
				1ª Medição (10:16)	2ª Medição (10:22)	3ª Medição (10:26)	1ª Medição (10:58)	2ª Medição (11:06)	3ª Medição (11:11)	1ª Medição (12:02)	2ª Medição (12:05)	3ª Medição (12:07)	1ª Medição (12:41)	2ª Medição (12:44)	3ª Medição (12:47)	
Parâmetros de campo	Temperatura (°C)			28.1	27.8	27.8	30.2	31.4	31.6	35.5	36.1	36.2	32	32	31.9	
	ORP (mV)			46.9	54.3	57.3	19.7	45.2	48.6	45.9	50.9	55.3	43.9	53.4	59.7	
	pH			6.62	6.51	6.48	6.82	6.46	6.4	6.36	6.22	6.22	6.38	6.26	6.16	
	EC (µS/cm)			2750	2776	2778	11.22x10 <sup>3</sup>	11.2x10 <sup>3</sup>	11.2x10 <sup>3</sup>	8654	8636	8638	10.87x10 <sup>3</sup>	10.83x10 <sup>3</sup>	10.85x10 <sup>3</sup>	
	DO	Percentual			68.20%	58.20%	60.20%	38%	42.80%	44.80%	160.60%	167.70%	178.60%	132.50%	137.2%	137.20%
		mg/L			6.23	4.46	4.6	2.68	3	3.14	10.45	10.95	11.61	9.16	9.5	9.52
	TSD (mg/l)			1791	1804	1804	7430	7290	7294	5621	5616	5615	7058	7045	7056	
Salinidade (PSU)			1.41	1.42	1.42	6.36	6.35	6.36	4.81	4.81	4.8	6.13	6.13	6.13		
Catiões principais	Cálcio (Ca <sup>2+</sup> ) (mg/l)			105.53	106	104.53	13.73	13.53	13.53	234.53	235.53	227.53	135.53	135.53	135.53	
	Potássio (K <sup>+</sup> ) (mg/l)			11.154	11.154	11.354	1.934	1.864	1.914	3.244	2.854	3.244	2.104	2.114	2.104	
	Sódio (Na <sup>+</sup> ) (mg/l)			ND	ND	ND	548.133	561.633	552.633	525.633	521.133	516.633	696.633	696.633	692.133	
	Magnésio (Mg <sup>2+</sup> ) (mg/l)			25.4	25.4	25.3	18.5	18.7	18.4	224.1	228.6	228.15	94.9	92.8	94.2	
Aniões principais	Cloretos (Cl <sup>-</sup> )	volumes														
		mg/L														
	Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) (mg/l)			160.13474	160.13474	158.394145	280.235795	278.4952	280.235795	151.531025	149.70535	149.70535	412.521015	407.29923	407.29923	
	Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg/l)			15	15	15	<0.5	<0.5	<0.5	44.3	44.586	44.586	1.871	1.729	1.729	
	Alcalinidade P	volumes														
		mgCaCO <sub>3</sub> /L			4.15134	4.15134	4.15134	10.37835	10.37835	8.30268	6.22701	8.30268	8.30268	8.30268	8.30268	8.30268
	Alcalinidade T	volumes														
		mgCaCO <sub>3</sub> /L			6	5.9	6	9	9	8.9	3.1	3.2	3.3	5.9	6	6
	Carbonatos (CO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mgCaCO <sub>3</sub> /L			124.540	122.465	124.540	186.810	186.810	184.735	64.346	66.421	68.497	122.465	124.540	124.540
	Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mgCaCO <sub>3</sub> /L			8.303	8.303	8.303	20.757	20.757	16.605	12.454	16.605	16.605	16.605	16.605	16.605
				116.238	114.162	116.238	166.054	166.054	168.129	51.892	49.816	51.892	105.859	107.935	107.935	
Metais	Prata (Ag) (mg/l)			0.501	0.491	0.491	0.961	1.041	0.941	3.871	3.951	4.051	3.411	3.921	3.731	
	Alumínio (Al) (mg/l)			7.79	8.03	8	3.64	3.81	3.94	16.28	16.18	16.18	12.08	12.08	11.98	
	Arsênio (As) (mg/l)			1.63	1.66	1.89	1.05	1.04	1.03	4.44	4.46	4.44	3.24	3.27	3.25	
	Cádmio (Cd) (mg/l)			0.377	0.376	0.371	0.268	0.276	0.267	2.21	2.21	2.22	1.27	1.28	1.27	
	Cobalto (Co) (mg/l)			0.0582	0.0582	0.0583	0.0378	0.0397	0.0376	0.28	0.282	0.289	0.185	0.183	0.181	
	Crômio (Cr) (mg/l)			0.0666	0.0681	0.0682	0.0568	0.0582	0.0566	0.254	0.254	0.262	0.177	0.175	0.176	
	Cobre (Cu) (mg/l)			0.217	0.216	0.216	0.172	0.173	0.157	0.686	0.684	0.682	0.473	0.463	0.41	
	Ferro (Fe) (mg/l)			2.8975	2.8775	2.8675	BDL	BDL	BDL	0.9975	0.9875	0.9775	0.0995	0.0675	0.0825	
	Lítio (Li) (mg/l)			0.9951	0.9951	0.9951	1.4051	1.4651	1.3951	3.9451	3.9551	3.9951	3.3851	3.3251	3.2451	
	Manganês (Mn) (mg/l)			0.975	0.953	0.95	BDL	BDL	BDL	0.164	0.166	0.16	0.106	0.108	0.106	
	Níquel (Ni) (mg/l)			0.0604	0.0592	0.0591	0.0499	0.0503	0.0502	0.318	0.327	0.307	0.179	0.176	0.175	
	Chumbo (Pb) (mg/l)			0.849	0.854	0.843	0.608	0.604	0.603	2.53	2.53	2.55	1.8	1.85	1.83	
	Zinco (Zn) (mg/l)			18.9852	18.8852	18.8852	10.4852	10.3852	10.4852	1.566	1.545	1.533	60.9852	60.8852	61.0852	

Parâmetros		Semana	Dia	Pontos de amostragem			
				Ponto 1 ( Rio Muarazi)			
				1ª Medição (13:28)	2ª Medição (13:33)	3ª Medição (13:50)	
Parâmetros de campo	Temperatura (°C)		2	02-Oct	30.2	30.4	30.7
	ORP (mV)				4.6	11.2	1.2
	pH				6.75	6.55	6.50
	EC (µS/cm)				1412	1412	1410
	DO	Percentual			11.70%	17.50%	12.30%
		mg/L			0.87	1.27	0.8
	TSD (mg/l)				915	917	919
	Salinidade (PSU)				0.67	0.67	0.67
Catiões principais	Cálcio (Ca <sup>2+</sup> ) (mg/l)		52.33	51.93	52.03		
	Potássio (K <sup>+</sup> ) (mg/l)		3.004	3.034	3.074		
	Sódio (Na <sup>+</sup> ) (mg/l)		40.233	40.233	40.233		
	Magnésio (Mg <sup>2+</sup> ) (mg/l)		27.4	27.4	27.9		
Aniões principais	Cloretos (Cl <sup>-</sup> )	volumes	2.8	3	2.8		
		mg/L	49.293	52.945	49.293		
	Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) (mg/l)		107.743	107.809	107.809		
	Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg/l)		<0.5	<0.5	<0.5		
	Alcalinidade P	volumes	0.1	0.1	0.2		
		mgCaCO3/L	2.07567	2.07567	4.15134		
	Alcalinidade T	volumes	4.7	4.8	4.8		
		mgCaCO3/L	97.55649	99.63216	99.63216		
Carbonatos (CO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )		4.15134	4.15134	8.30268			
Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )		93.40515	95.48082	91.32948			
Metais	Prata (Ag) (mg/l)		2.241	2.241	2.151		
	Alumínio (Al) (mg/l)		5.83	6.07	5.65		
	Arsênio (As) (mg/l)		1.61	1.61	1.68		
	Cádmio (Cd) (mg/l)		0.418	0.427	0.416		
	Cobalto (Co) (mg/l)		0.0684	0.0718	0.0675		
	Crômio (Cr) (mg/l)		0.0983	0.0931	0.0955		
	Cobre (Cu) (mg/l)		0.266	0.232	0.252		
	Ferro (Fe) (mg/l)		0.1025	0.0945	0.0995		
	Lítio (Li) (mg/l)		2.1251	2.2351	2.1151		
	Manganês (Mn) (mg/l)		0.625	0.624	0.635		
	Níquel (Ni) (mg/l)		0.064	0.0674	0.0666		
	Chumbo (Pb) (mg/l)		0.918	0.924	0.961		
	Zinco (Zn) (mg/l)		16.4852	16.5852	16.5852		

Parâmetros		Semana	Dia	Pontos de amostragem								
				Ponto 1 (Poco Kanhenga )			Ponto 2 (Fontenaria Canclope)			Ponto 3 (Efluente da mineradora A)		
				1ª Medição (10:14)	2ª Medição (10:16)	3ª Medição (10:17)	1ª Medição (11:10)	2ª Medição (11:11)	3ª Medição (11:12)	1ª Medição (12:03)	2ª Medição (12:05)	3ª Medição (12:06)
Parâmetros de campo	Temperatura (°C)		2.62	2.72	2.73	29	29.5	29.6	25.7	25	24.7	
	ORP (mV)		294.7	294.4	293.5	186.9	191.5	195.6	152.2	151.1	150.6	
	pH		6.71	6.72	6.74	7.57	7.47	7.39	7.72	7.76	7.77	
	EC (µS/cm)		2696	2686	2689	5443	5398	5378	4216	4242	4256	
	DO	Percentual	32.10%	33.40%	27.90%	123%	121.70%	121.20%	112.00%	111.50%	110.9%	
		mg/L	2.51	2.61	2.16	9.16	8.98	8.9	8.87	8.85	8.91	
	TSD (mg/l)		1752	1743	1747	3557	3508	3497	2747	2763	2765	
Salinidade (PSU)		1.38	1.38	1.38	2.9	2.89	2.88	2.24	2.25	2.26		
Catiões principais	Cálcio (Ca <sup>2+</sup> ) (mg/l)		55.93	55.93	56.83	15.43	15.43	15.63	271.53	277.53	276.53	
	Potássio (K <sup>+</sup> ) (mg/l)		1.804	1.784	1.814	6.074	6.414	6.114	5.354	5.424	5.794	
	Sódio (Na <sup>+</sup> ) (mg/l)		102.933	103.833	104.133	ND	ND	ND	40.233	40.233	40.233	
	Magnésio (Mg <sup>2+</sup> ) (mg/l)		22.8	22.7	22.6	23.5	23.5	23.6	160	160	159	
Aniões principais	Cloretos (Cl <sup>-</sup> )	volumes	2.8	2.7	2.8	47.3	47.6	47.5	25.8	25.4	25.8	
		mg/L	47.00	45.26	47.00	821.56	826.78	825.04	447.33	440.37	447.33	
	Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) (mg/l)		99.98	100.11	100.11	104.72	104.72	104.85	120.70	120.77	120.70	
	Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg/l)		7.59	7.30	7.59	12.73	12.59	12.59	2.87	2.87	2.87	
	Alcalinidade P	volumes	0	0	0	4.1	4	4.1	0.4	0.3	0.4	
		mgCaCO3/L	0	0	0	85.10	83.03	85.10	8.30	6.23	8.30	
	Alcalinidade T	volumes	18.3	18.4	18.4	53.3	53.4	53.4	5.4	4.5	4.6	
		mgCaCO3/L	379.85	381.92	381.92	1106.33	1108.41	1108.41	112.09	93.41	95.48	
	Carbonatos (CO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mgCaCO3/L	0.00	0.00	0.00	170.20	166.05	170.20	16.61	12.45	16.61	
	Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mgCaCO3/L	379.85	381.92	381.92	936.13	942.35	938.20	95.48	80.95	78.88	
Metais	Prata (Ag) (mg/l)		2.101	2.061	2.051	1.411	1.411	1.351	4.491	4.541	4.601	
	Alumínio (Al) (mg/l)		6.21	6.2	6.21	4.45	4.5	4.35	15.78	15.68	15.58	
	Arsênio (As) (mg/l)		1.62	1.63	1.6	1.23	1.22	1.22	4.26	4.27	4.2	
	Cádmio (Cd) (mg/l)		0.345	0.34	0.345	0.356	0.355	0.356	1.84	1.84	1.8	
	Cobalto (Co) (mg/l)		0.0629	0.0613	0.0624	0.0533	0.0538	0.0539	0.252	0.25	0.249	
	Crômio (Cr) (mg/l)		0.0881	0.0874	0.0875	0.0736	0.0768	0.0759	0.27	0.278	0.251	
	Cobre (Cu) (mg/l)		0.274	0.278	0.282	0.226	0.224	0.229	0.649	0.638	0.639	
	Ferro (Fe) (mg/l)		0.8225	0.8395	0.8335	0.0034	0.0041	0	0.2085	0.2485	0.2125	
	Lítio (Li) (mg/l)		2.1351	2.1651	2.1151	1.8751	1.8851	1.8651	4.2751	4.2151	4.1851	
	Manganês (Mn) (mg/l)		BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	
	Níquel (Ni) (mg/l)		0.0525	0.0561	0.0546	0.0742	0.0745	0.0788	0.286	0.288	0.286	
	Chumbo (Pb) (mg/l)		0.92	0.922	0.898	0.76	0.76	0.75	2.4	2.38	2.38	
	Zinco (Zn) (mg/l)		13.5852	13.5852	13.5852	13.1852	13.1852	13.1852	ND	ND	ND	

Parâmetros		Semana	Dia	Pontos de amostragem												
				Ponto 1 (Represa Cachoeira)			Ponto 2 (Fontenaria Cachoeira)			Ponto 3 (Riocho Moatize)			Ponto 4 (Efluente da mineradora C)			
				1ª Medição (11:24)	2ª Medição (11:37)	3ª Medição (11:40)	1ª Medição (12:38)	2ª Medição (12:40)	3ª Medição (12:41)	1ª Medição (14:28)	2ª Medição (14:30)	3ª Medição (14:40)	1ª Medição (15:31)	2ª Medição (15:35)	3ª Medição (15:38)	
Parâmetros de campo	Temperatura (°C)	3	09-Oct	24.4	24.3	24.4	29.2	29.3	29.3	34.1	34.3	35.8	28	29.2	29.5	
	ORP (mV)			88.3	87.9	88.3	128.2	129.8	129.6	73.6	75.9	77.8	50.9	55.9	59.4	
	pH			7	7	6.97	6.25	6.23	6.18	6.78	6.66	6.5	6.87	6.8	6.75	
	EC (µS/cm)			1556	1572	1575	1209	1209	1208	1979	1988	1903	5958	6020	6009	
	DO			Percentual	76.70%	77.10%	79.80%	82.90%	78.90%	78.90%	147.10%	146.70%	151.10%	137.00%	135.70%	139.4%
				mg/L	6.14	6.15	6.34	6.06	5.78	5.72	10.09	9.99	10.1	10.3	9.97	10.48
	TSD (mg/l)			1012	1021	1022	786	785	785	1286	1290	1235	3883	3901	3886	
Salinidade (PSU)	0.77	0.77	0.78	0.57	0.57	0.57	0.97	0.98	0.94	3.22	3.23	3.23				
Catiões principais	Cálcio (Ca <sup>2+</sup> ) (mg/l)	41.13	40.83	40.93	53.43	53.33	52.43	31.53	31.53	32.13	155.53	155.53	154.53			
	Potássio (K <sup>+</sup> ) (mg/l)	3.794	3.794	3.734	1.604	1.614	1.604	3.024	2.984	2.984	2.404	2.374	2.364			
	Sódio (Na <sup>+</sup> ) (mg/l)	75.033	74.133	74.433	122.133	120.133	120.133	118.133	118.133	119.133	ND	ND	ND			
	Magnésio (Mg <sup>2+</sup> ) (mg/l)	53.4	53.1	52.8	43.5	43.5	43.5	24.6	24.5	24.5	47.4	47.6	47.4			
Aniões principais	Cloretos (Cl <sup>-</sup> )	volumes	6.5	6.4	6.5	1.7	1.8	1.8	10.6	11.3	11	31.1	31.1	31.3		
		mg/L	111.39808	109.657485	111.39808	27.84952	29.590115	29.590115	191.695875	204.4756	198.998575	539.58445	539.58445	543.06564		
	Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) (mg/l)	67.56578947	67.56578947	66.25	131.625	131.756579	131.5592105	339.9342105	339.9342105	340.5921053	158.2697368	158.2039474	158.2039474			
	Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg/l)	57.3	57.3	57.3	<0.5	<0.5	<0.5	12.586	13.3	12.157	8.586	8.729	8.586			
	Alcalinidade P	volumes	6.8	6.3	6.5	4.1	4	4.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1		
		mgCaCO <sub>3</sub> /L	141.14556	130.76721	134.91855	85.10247	83.0268	85.10247	4.15134	4.15134	4.15134	2.07567	2.07567	2.07567		
	Alcalinidade T	volumes	41	39.9	40.4	53.3	53.4	53.4	4.9	4.8	4.9	2.3	2.3	2.4		
		mgCaCO <sub>3</sub> /L	851.0247	828.19233	838.57068	1106.33211	1108.40778	1108.40778	101.70783	99.63216	101.70783	47.74041	47.74041	49.81608		
Carbonatos (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	mgCaCO <sub>3</sub> /L	282.29112	261.53442	269.8371	170.20494	166.0536	170.20494	8.30268	8.30268	8.30268	4.15134	4.15134	4.15134			
Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mgCaCO <sub>3</sub> /L	568.73358	566.65791	568.73358	936.12717	942.35418	938.20284	93.40515	91.32948	93.40515	43.58907	43.58907	45.66474			
Metais	Prata (Ag) (mg/l)	2.121	2.111	2.131	2.271	2.221	2.221	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL			
	Alumínio (Al) (mg/l)	7.11	7.03	7.02	6.95	6.84	6.84	3.11	3.07	3.1	7.1	7.08	7.15			
	Arsénio (As) (mg/l)	1.89	1.87	1.87	1.93	1.91	1.89	1.23	1.23	1.23	1.97	1.97	2.01			
	Cádmio (Cd) (mg/l)	0.809	0.802	0.803	0.67	0.664	0.668	0.964	0.963	0.96	0.809	0.809	0.815			
	Cobalto (Co) (mg/l)	0.107	0.106	0.106	0.0975	0.0945	0.0943	0.499	0.499	0.498	0.232	0.232	0.234			
	Crômio (Cr) (mg/l)	0.121	0.119	0.119	0.111	0.109	0.11	0.175	0.175	0.175	0.217	0.217	0.22			
	Cobre (Cu) (mg/l)	0.375	0.325	0.343	0.321	0.305	0.305	0.172	0.172	0.173	0.313	0.314	0.34			
	Ferro (Fe) (mg/l)	0.7665	0.7395	0.7575	0.007	0.0032	0.0043	0.175	0.15	0.172	0.2315	0.2315	0.2425			
	Lítio (Li) (mg/l)	2.2151	2.2251	2.2351	2.3151	2.2851	2.2851	0.2791	0.2671	0.2701	1.7751	1.7751	1.8251			
	Manganês (Mn) (mg/l)	0.163	0.162	0.65	BDL	BDL	BDL	0.229	0.229	0.229	0.232	0.232	0.232			
	Níquel (Ni) (mg/l)	0.105	0.104	0.103	0.104	0.103	0.103	0.148	0.148	0.148	0.199	0.199	0.202			
	Chumbo (Pb) (mg/l)	1.23	1.22	1.22	1.13	1.13	1.12	0.642	0.634	0.637	1.2	1.2	1.23			
	Zinco (Zn) (mg/l)	32.7852	32.8852	33.2852	26.7852	26.5852	26.3852	17.4852	17.3852	17.3852	36.6852	36.7852	36.6852			

Parâmetros		Semana	Dia	Pontos de amostragem												
				Ponto 1 (Rio Revuboe-Downstream)			Ponto 2 (Rio Moatize)			Ponto 3 (Rio Revuboe-upstream)			Ponto 4 (Rio Zambeze-Kassuende)			
				1ª Medição (10:02)	2ª Medição (10:04)	3ª Medição (10:06)	1ª Medição (11:24)	2ª Medição (11:27)	3ª Medição (11:30)	1ª Medição (13:38)	2ª Medição (13:43)	3ª Medição (13:45)	1ª Medição (14:53)	2ª Medição (14:55)	3ª Medição (14:58)	
Parâmetros de campo	Temperatura (°C)	3	14-Oct	26.3	26.3	26.7	26.8	26.6	26.4	31	30.8	30.8	24.8	23.9	24	
	ORP (mV)			111.3mV	117.1	115.2	115.3	115.9mV	112.2	121.6	122.6	125.8	151	154.4	152.2	
	pH			8.04	7.98	7.93	8.03	8.01	8	8.23	8.2	8.2	7.79	7.74	7.73	
	EC (µS/cm)			249	247	247	630	634	635	220	208	222	137	140	139	
	DO			Percentual	125.40%	123.40%	122.90%	141.20%	138.60%	150.80%	126.50%	124.80%	123.70%	121.40%	121.00%	121.2%
				mg/L	9.82	9.78	9.72	10.92	10.81	11.78	9.28	9.19	9.11	9.97	10.04	10.06
	TSD (mg/l)			161	161	160	408	412	412	144	154	143	88	90	89	
Salinidade (PSU)	0.08			0.08	0.08	0.26	0.27	0.27	0.07	0.06	0.07	0.04	0.04	0.04		
Catiões principais	Cálcio (Ca <sup>2+</sup> ) (mg/l)			10.43	10.53	10.53	37.33	37.73	37.43	6.96	7.03	7.03	7.82	7.83	7.86	
	Potássio (K <sup>+</sup> ) (mg/l)			1.274	1.274	1.274	0.854	0.864	0.864	0.004	0.004	0.004	1.404	1.394	1.394	
	Sódio (Na <sup>+</sup> ) (mg/l)			11.033	10.933	10.933	46.533	46.633	46.433	6.113	6.183	6.253	4.833	4.763	4.783	
	Magnésio (Mg <sup>2+</sup> ) (mg/l)			5	5	5.02	23.3	23.3	23.3	3.5	3.52	3.53	2.97	2.98	2.97	
Aniões principais	Cloretos (Cl <sup>-</sup> )			volumes	0.7	0.7	0.6	17.7	17.8	17.7	0.4	0.4	0.5	0.2	0.2	0.3
				mg/L	10.444	10.444	8.703	321.319	323.144	321.319	5.222	5.222	6.962	1.741	1.741	3.481
	Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) (mg/l)	7.086	7.086	7.151	73.336	73.270	73.336	12.546	12.480	12.480	<0,04	<0,04	<0,04			
	Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg/l)	3.443	3.443	3.443	16.3	16.157	16.157	4.157	4.3	4.589	4.443	4.443	4.443			
	Alcalinidade P	volumes	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.2		
		mgCaCO3/L	10.378	8.303	8.303	8.303	6.227	8.303	8.303	6.227	6.227	4.151	2.076	4.151		
	Alcalinidade T	volumes	4.1	4	4.1	6.3	6.7	6.7	3.3	3.4	3.4	1.7	1.7	1.5		
		mgCaCO3/L	85.102	83.027	85.102	130.767	139.070	139.070	68.497	70.573	70.573	35.286	35.286	31.135		
Carbonatos (CO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mgCaCO3/L	20.757	16.605	16.605	16.605	12.454	16.605	16.605	12.454	12.454	8.303	4.151	8.303			
Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mgCaCO3/L	64.346	66.421	68.497	114.162	126.616	122.465	51.892	58.119	58.119	26.984	31.135	22.832			
Metais	Prata (Ag) (mg/l)	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL		
	Alumínio (Al) (mg/l)	0.85	0.83	0.78	3.09	3.1	3.1	0.897	0.799	0.422	0.59	0.65	0.63			
	Arsênio (As) (mg/l)	0.314	0.317	0.315	0.95	0.961	0.95	0.21	0.221	0.238	0.239	0.244	0.233			
	Cádmio (Cd) (mg/l)	0.177	0.178	0.178	0.478	0.477	0.478	0.15	0.15	0.15	0.142	0.142	0.142			
	Cobalto (Co) (mg/l)	0.127	0.127	0.127	0.172	0.172	0.172	0.12	0.121	0.121	0.121	0.122	0.122			
	Crômio (Cr) (mg/l)	0.134	0.136	0.136	0.169	0.169	0.171	0.129	0.129	0.129	0.13	0.13	0.13			
	Cobre (Cu) mg/L	0.0687	0.0769	0.0607	0.155	0.151	0.162	0.0585	0.058	0.0501	0.0543	0.054	0.0547			
	Ferro (Fe) (mg/l)	0.3865	0.3995	0.3885	0.2425	0.2425	0.2525	0.2665	0.2675	0.2685	0.6935	0.6915	0.6955			
	Lítio (Li) mg/L	0.2111	0.1991	0.1871	0.7151	0.7301	0.7211	0.1791	0.1801	0.1801	0.1811	0.1811	0.1811			
	Manganês (Mn) (mg/l)	0.231	0.232	0.232	0.233	0.233	0.233	0.223	0.223	0.223	0.238	0.238	0.238			
	Níquel (Ni) (mg/l)	0.0984	0.0998	0.0983	0.142	0.143	0.143	0.0921	0.0924	0.0924	0.121	0.121	0.121			
	Chumbo (Pb) (mg/l)	0.202	0.2	0.197	0.612	0.619	0.622	0.138	0.137	0.143	0.152	0.15	0.151			
	Zinco (Zn) (mg/l)	3.29	3.3	3.31	16.8	16.8	16.8	2.3	2.31	2.31	1.95	1.95	1.96			