



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JULIO DE MESQUITA FILHO”

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS



Dissertação de Mestrado

Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente

ANÁLISE DE INFILTRAÇÃO DE CANAL DE DESVIO E CONTRIBUIÇÃO NA  
GERAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA EM PILHA DE REJEITO DE  
MINERAÇÃO DE URÂNIO

Matheus Mistrinel Pacine Feitoza do Nascimento

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro (SP)

2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Campus de Rio Claro

MATHEUS MISTRINEL PACINE FEITOZA DO NASCIMENTO

ANÁLISE DE INFILTRAÇÃO DE CANAL DE DESVIO E CONTRIBUIÇÃO NA  
GERAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA EM PILHA DE REJEITO DE  
MINERAÇÃO DE URÂNIO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto  
de Geociências e Ciências Exatas – Campus de  
Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista  
Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau  
de Mestre em Geociências e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro (SP)

2022

N244a

Nascimento, Matheus Mistrinel Pacine Feitoza do

Análise de infiltração de canal de desvio e contribuição na geração de drenagem ácida de mina em pilha de rejeito de mineração de urânio / Matheus Mistrinel Pacine Feitoza do Nascimento. -- Rio Claro, 2022  
94 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro  
Orientador: César Augusto Moreira

1. Mineração. 2. Drenagem ácida de mina. 3. Pilha de rejeito. 4.  
Eletrorresistividade. 5. Polarização Induzida. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp.  
Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados  
fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

MATHEUS MISTRINEL PACINE FEITOZA DO NASCIMENTO

ANÁLISE DE INFILTRAÇÃO DE CANAL DE DESVIO E CONTRIBUIÇÃO NA  
GERAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA EM PILHA DE REJEITO DE  
MINERAÇÃO DE URÂNIO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto  
de Geociências e Ciências Exatas – Campus de  
Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista  
Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau  
de Mestre em Geociências e Meio Ambiente

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. César Augusto Moreira  
IGCE / UNESP / Rio Claro (SP)

Prof. Dr. Elias Isler  
CCET / UFOB / Barreiras (BA)

Profa. Dra. Lívia Portes Innocenti Helene  
FATEC-JAHU / Jaú (SP)

Conceito: Aprovado

Rio Claro (SP), 13 de abril de 2022

## **Agradecimentos**

Agraço primeiramente aos meus pais, Reinaldo e Marli, por todo amor, carinho e fé que tiveram em mim e por mim nesta caminhada até aqui. Sem sombra de dúvidas eles são os principais responsáveis por todo este trabalho. Sem o apoio deles eu jamais teria chegado até aqui. Agradeço também aos meus familiares, a começar pelos meus irmãos Phelipe e Ghabriel que sempre depositaram muita esperança em mim. Agraço minha cunhada Mariane por engrandecer a vida de nossa família e junto ao meu irmão dar a luz que ilumina nossos dias nesses tempos tão difíceis, minha sobrinha e afilhada Luihza. Agradeço também a minha outra cunhada Júlia que em breve será parte oficial da família. Sem cada um de vocês eu jamais teria chegado a qualquer lugar. Vocês são o porto seguro que me leva a alçar voos mais altos. Sem vocês nada disso existiria.

Agradeço aos meus colegas de república que neste tempo de pandemia estiveram presentes em minha vida completando-a cada um à sua maneira. Ao André Ponce agradeço por todos estes anos de amizade, risadas, filmes e companheirismo. Ao Ruan Smaniotto agradeço pelas longas e proveitosas conversas que muitas vezes me ajudaram a ficar bem mesmo em meio às dificuldades. E ao Marcelo Colombini por sua amizade e carinho.

Viver neste tempo controverso não seria possível sem a presença de pessoas especiais. Agradeço então ao Matheus Maestrello, uma das pessoas que mais enriqueceu meus dias nestes últimos anos, com seu carinho e amizade. Agradeço à Bárbara Panegassi por tantas séries e momentos bons vividos, bem como a todos os meus outros amigos que de alguma forma fizeram parte desta jornada (Gustavo Job, Renan Ferraz, Matheus Ciotta, Otávio Sant'ana, Bruno Avelar, Rodrigo Esteves, Willian Otto, Suelen Portughesi, Mariana Miura, Amanda Molina, Paulo Henrique, Laura Tamaoka, Fernanda Buchi, Marcelo Sacchi, Ruan Smaniotto e tantos outros).

Agradeço às Indústrias Nucleares do Brasil (INB) por cederam o espaço e as informações necessárias para o trabalho. E por fim, mas não menos importante, agradeço ao meu orientador o Prof. Dr. César Augusto Moreira pela confiança e apoio dado ao longo desses anos de pesquisas e trabalhos em conjunto.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A todos o meu muito obrigado!

“Se você acha que educação é cara,  
experimente a ignorância.”

Robert Orben

## RESUMO

A drenagem ácida de mina (DAM) é um problema comum a muitas minerações em cujos depósitos ocorrem sulfetos como minerais de minério ou associados. Este processo natural decorre da oxidação de sulfetos minerais como a pirita e posterior interação com água, com a geração de sulfato e ácido sulfúrico. Na indústria mineral este problema é agravado como consequência do acúmulo e da maior exposição desses minerais reativos aos agentes atmosféricos. É neste contexto que está inserida a Mina Osamu Utsumi (MOU), a primeira a lavar e beneficiar minério de urânio no Brasil, administrada pelas Indústrias Nucleares do Brasil (INB). A mina está localizada no Maciço Alcalino de Poços de Caldas num contexto geológico caracterizado por rochas alcalinas como a nefelina-sienito, além de mineralizações uraníferas com altos teores de sulfetos. Durante sua operação foram movimentados milhões de toneladas de rejeitos que tiveram como destino final os bota-foras (BF) da mina, onde eram depositados o material proveniente do decapeamento e rochas com baixo teor de urânio. Atualmente a mina está num processo de descomissionamento, que compreende o período pós-encerramento das atividades no qual é preciso lidar com os passivos ambientais. A drenagem ácida de mina é o mais complexo dos passivos ambientais presentes na área. Os materiais foram lançados na área sob a forma de ponte de aterro, que promoveu o rearranjo das frações granulométricas em partículas mais grossas embaixo e as mais finas em cima. Este fato somado à heterogeneidade do material depositado permite que o BF-04 funcione como um sistema hidrogeológico permeável ao fluxo de água e oxigênio, ambos reativos aos sulfetos existentes. Um fator agravante é a presença do canal de desvio da antiga drenagem que fluía pelo vale (córrego da Consulta) e que foi posicionado na lateral NW do BF-04 em canal escavado diretamente em solo e rocha. Diante do exposto, esta pesquisa visa avaliar a influência da infiltração de águas do canal de desvio e a contribuição na geração de drenagem ácida de mina no interior do BF-04. Neste estudo são empregados os métodos geofísicos da Eletrorresistividade e da Polarização Induzida, obtidos de forma simultânea por meio de linhas de tomografia elétrica. Os modelos de inversão 2D realçam zonas de baixa resistividade ( $\sim 50 \Omega.m$ ) em semelhança com resultados obtidos em estudos anteriores em áreas de fluxo de DAM. Também foi possível identificar zonas de alta cargabilidade ( $\sim 10mV/V$ ) em zonas de fluxo de água proveniente do canal de desvio e no interior do BF-04. Tais evidências indicam a efetiva contribuição do canal de desvio na geração de DAM no interior do BF-04 e a necessidade de sua impermeabilização para redução deste passível ambiental

**Palavras-chave:** mineração; drenagem ácida de mina; pilha de rejeito; eletrorresistividade; polarização induzida.

## ABSTRACT

Acid mine drainage (AMD) is a problem common to many mines where sulfides occur in their deposits as ore or associated minerals. This natural process results from the oxidation of mineral sulfides such as pyrite and subsequent interaction with water, with the generation of sulfate and sulfuric acid. In the mineral industry this problem is aggravated as a consequence of the accumulation and greater exposure of these reactive minerals to atmospheric agents. This is where the Osamu Utsumi Mine (MOU), the first to mine and benefit uranium ore in Brazil, administered by the Indústrias Nucleares do Brasil (INB). The mine is located in the Alkaline Massif of Poços de Caldas in a geological context characterized by alkaline rocks such as nepheline-syenite in addition to uraniumiferous mineralizations with high sulfide contents. During its operation millions of tons of tailings were moved, which had as their final destination the waste rock piles (BF) of the mine where the material from the mine stripping and rocks with low uranium content were deposited. Currently the mine is in a process of decommissioning which comprises the post-closure period of activities in which environmental liabilities need to be dealt with. Acid mine drainage is the and the need for its waterproofing to reduce this environmental liability most complex of environmental liabilities present in the area. The materials were released in the area in the form of a landfill bridge, which promoted the rearrangement of the granulometric fractions in thicker particles underneath and the thinner ones on top. This fact added to the heterogeneity of the deposited material allows BF-04 to function as a hydrogeological system permeable to the flow of water and oxygen, both reactive to existing mineral sulfides. An aggravating factor is the presence of the bypass channel of the old drainage that flowed through the valley (Consulta stream) and that was positioned on the NW side of the BF-04 in a channel dug directly into soil and rock. In view of the above, this research aims to evaluate the influence of water infiltration of the diversion channel and the contribution to the generation of acid mine drainage inside the tailings. In this study, the geophysical methods of Electrical Resistivity (ER) and Induced Polarization (IP) are employed, obtained simultaneously by means of electrical tomography lines. The 2D inversion models highlight zones of low resistivity ( $\sim 50 \Omega.m$ ) in similarity to results obtained in previous studies in areas of AMD flow. It was also possible to identify high chargeability zones ( $\sim 10 mV/V$ ) in water flow zones from the bypass channel and inside the waste rock pile (BF-04). Such evidence indicates the effective contribution of the diversion channel in the generation of AMD inside the BF-04 and the need for its waterproofing to reduce this environmental liability.

**Key words:** mining, acid mine drainage; waste rock pile; DC resistivity, induced polarization.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Unidade de Tratamento de Minério – UTM Caldas com destaque para o BF-04 em vermelho e o canal de desvio córrego da Consulta na porção nordeste do complexo. ....	20
<b>Figura 2</b> - A) Efluente ácido saindo no sopé do BF-04. B Bacia de captação de drenagem ácida de mina. C) Maquinário utilizado para bombear os efluentes. D) Antiga bacia de captação de DAM.....	23
<b>Figura 3</b> - Área do BF-04 com destaque para o canal de desvio córrego da Consulta (linha azul) e possível infiltração indicada pelas setas branca. Bacia de captação de drenagem ácida (BNF) na porção inferior.....	24
<b>Figura 4</b> - Método de construção de pilha de rejeito chamado ponta de aterro (end-dumping). ....	24
<b>Figura 5</b> - Perfil conceitual do BF-04 e seu comportamento hidrogeológico. ....	25
<b>Figura 6</b> - Modelo Digital de Terreno das áreas da cava e do BF-04 e a antiga hidrografia local. ....	26
<b>Figura 7</b> - Mapa de isópacas do BF-04.....	27
<b>Figura 8</b> - O contato do canal de desvio com o BF-04 e o maciço rochoso (limite norte na pilha de rejeito).....	28
<b>Figura 9</b> - Represa que antecede o canal de desvio (esquerda) e sistema de drenagem pluvial do BF-04 (direita). ....	29
<b>Figura 10</b> - Localização dos pontos de medição de vazão. ....	29
<b>Figura 11</b> - Precipitação mensal na região da MOU no ano de 2019.....	33
<b>Figura 12</b> - Unidade de Tratamento de Minérios - Caldas com destaque em vermelho para o divisor de águas das bacias do Ribeirão das Antas (oeste) e Rio Verde (leste). ....	35
<b>Figura 13</b> - Modelo Digital de Terreno pré-operacional com destaque para hidrografia local antes da construção da MOU.....	36
<b>Figura 14</b> - Mapa potenciométrico de parte da área da cava da Mina Osamu Utsumi e do Bota-fora 04.....	38
<b>Figura 15</b> - Mapa geológico do Planalto de Poços de Caldas. ....	40
<b>Figura 16</b> - Mapa geológico com a disposição das principais litologias da cava da mina. ....	41
<b>Figura 17</b> - Perfil esquemático de uma chaminé em formato de cone e as mineralizações associadas. ....	43
<b>Figura 18</b> - Esquema de deposição tipo ponta de aterro (end-dumping).....	49
<b>Figura 19</b> - Arranjo das frações granulométricas segundo o método ponta de aterro.....	49

<b>Figura 20</b> - Relação entre a resistividade e a resistência. ....	53
<b>Figura 21</b> - Potencial no semi-espço.....	53
<b>Figura 22</b> - Diferença de potencial (ddp) medida por dois eletrodos posicionados em pontos diferentes. ....	54
<b>Figura 23</b> - Eletrodos posicionados segundo a configuração AMNB. ....	55
<b>Figura 24</b> - Polarização de eletrodo. As cargas se acumulam ao entorno das partículas de minerais metálicos que bloqueiam os poros da rocha quando a corrente é ligada. Quando desligada, as cargas tendem a voltar ao seu estado inicial o que ocasiona o decaimento da ...	57
<b>Figura 25</b> - Polarização de membrana. Em uma rocha com minerais de argila as cargas positivas e negativas são combinadas e formam uma dupla camada (figura da esquerda). Quando uma corrente é ligada os íons livres tendem a ir no sentido dos polos opostos, entretant .....	57
<b>Figura 26</b> - Tensão causada pela passagem de uma corrente elétrica e seu comportamento após encerrada a corrente.....	58
<b>Figura 27</b> - Técnica de tomografia elétrica segundo o arranjo Schlumberger. ....	60
<b>Figura 28</b> - Configurações tradicionais com quatro eletrodos. A) Schlumberger; B) Wenner; C) dipole-dipole.....	61
<b>Figura 29</b> - Mapa da área de estudo com a localização das linhas de tomografia elétrica. ....	62
<b>Figura 30</b> - Na imagem à direita o resistivímetro Terrameter. Na imagem à esquerda o eletrodo de cerâmica montado para a aquisição de dados. ....	63
<b>Figura 31</b> - Esquema das características e funcionamento do eletrodo de cerâmica.....	64
<b>Figura 32</b> - Modelos de inversão de resistividade referentes às linhas de 1 a 7. As linhas tracejadas em branco indicam zonas de elevada umidade e as setas brancas indicam o fluxo hidrogeológico.....	69
<b>Figura 33</b> - Modelos de inversão de resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 7. As linhas tracejadas em branco indicam zonas de elevada umidade e as setas brancas indicam o fluxo hidrogeológico.....	71
<b>Figura 34</b> - Modelos de inversão de cargabilidade referentes às linhas de 1 a 7. ....	73
<b>Figura 35</b> - Modelos de inversão de resistividade referentes às linhas de 8 a 14. As linhas tracejadas em branco indicam zonas de elevada umidade e as setas brancas indicam o fluxo hidrogeológico.....	75
<b>Figura 36</b> - Modelos de inversão de cargabilidade referentes às linhas de 8 a 14. ....	77
<b>Figura 37</b> - Modelos pseudo-3D de resistividade dispostos segundo a profundidade de -1 a -21 metros. ....	79
<b>Figura 38</b> - Modelos pseudo-3D de cargabilidade dispostos segundo a profundidade.....	81

<b>Figura 39</b> - Correção entre os modelos pseudo-3D de resistividade (esquerda) e cargabilidade (direita) e a indicação do fluxo hidrogeológico (seta preta). O tracejado preto indica uma zona de fraturamento NE-SW. ....	82
<b>Figura 40</b> - Proposta de impermeabilização para o canal de desvio Córrego da Consulta. ....	84

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Características das pilhas de rejeitos da MOU.....	22
<b>Tabela 2</b> - Resultados das medições das vazões do sistema BF-04.....	30
<b>Tabela 3</b> - Composição mineralógica do BF-04.....	31
<b>Tabela 4</b> - Dados obtidos nos piezômetros e BNF.....	32
<b>Tabela 5</b> - Principais minerais associados à formação de DAM.....	47

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

**AIEA** - Agência Internacional de Energia Atômica

**BF-04** - Bota- Fora 04

**BNF** - Bacia Nestor Figueiredo

**CBTN** - Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear

**CIPC** - Complexo Mineiro Industrial de Poços de Caldas

**CNEN** - Comissão Nacional de Energia Nuclear

**CNPq** - Conselho Nacional de Pesquisas

**DAM** - Drenagem Acida de Mina

**ER** - Eletrorresistividade

**INB** - Indústrias Nucleares do Brasil

**IP** - Polarização Induzida

**MDT** - Modelos Digitais de Terreno

**MOU** - Mina Osamu Utsumi

**NUCLEBRÁS** - Empresas Nucleares Brasileiras

**PRAD** - Plano de Recuperação de Áreas Degradadas

**RMS** - *Root-mean-squared*

**SEV** - Sondagem Elétrica Vertical

**TE** - Tomografia Elétrica

**UTM** - Unidade de Tratamento de Minério

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução.....</b>	<b>15</b>
<b>2. Objetivo.....</b>	<b>19</b>
<b>3. Área de estudo.....</b>	<b>20</b>
3.1 Localização.....	20
3.2 Mina Osamu Utsumi.....	21
3.3 Bota-Fora 4 e o Córrego da Consulta.....	23
3.3.1 Comportamento hidráulico e hidroquímico do BF-04.....	30
3.4 Clima e vegetação.....	32
3.5 Geomorfologia.....	33
3.6 Hidrografia.....	34
3.7 Hidrogeologia.....	36
3.8 Geologia.....	38
3.8.1 Geologia Regional.....	38
3.8.2 Geologia local.....	41
3.8.3 Metalogênese.....	42
<b>4. Fundamentação teórica.....</b>	<b>45</b>
4.1 Drenagem Ácida de Mina (DAM).....	45
4.2 Hidrogeologia em pilhas de rejeito.....	47
4.3 Descomissionamento e preservação ambiental.....	49
<b>5. Materiais e métodos.....</b>	<b>51</b>
5.1 Métodos Geométricos e meio ambiente.....	51
5.1.1 Método da Eletrorresistividade (ER).....	48
5.1.2 Método da Polarização Induzida (IP).....	56
5.2 Técnica de aquisição de dados.....	59
5.2.1 Arranjo de eletrodos.....	60
5.3 Aquisição dos dados.....	59
5.4 Processamento dos dados.....	64
<b>6. Resultados e discussões.....</b>	<b>66</b>
6.1 Modelagem 2D.....	66
6.2 Modelagem 3D.....	78
<b>7. Considerações finais.....</b>	<b>85</b>
<b>8. Referências bibliográficas.....</b>	<b>87</b>

## 1. Introdução

O desenvolvimento da política nuclear brasileira tem seu início na década de 1930 através de pesquisas teóricas sobre energia nuclear na Universidade de São Paulo (USP). Entretanto, foi só a partir de 1945, com o desenvolvimento do projeto *Manhatan* e o ataque nuclear em Hiroshima, que o país desenvolveu um interesse sistemático na energia (KURAMOTO; APPOLONI, 2000). Nesta época o Brasil fechava seu primeiro acordo nuclear que consistia na exportação de areia monazítica para os Estados Unidos. Em 1951, ocorre a criação do Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq) que visava o desenvolvimento de pesquisas de geração de energia nuclear e sua cadeia produtiva, além da produção científica em diversas áreas da ciência.

Neste sentido é que foi criada, em 1962, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), instituída como uma autarquia federal por meio da Lei nº 4.118/62 e alterada pela Lei 6.189/74, que constitui a CNEN como o órgão superior de orientação, planejamento, supervisão, fiscalização e de pesquisa científica para o exercício do monopólio dos minérios nucleares e seus concentrados. Ou seja, cabe à CNEN licenciar, autorizar, regulamentar, controlar e fiscalizar o ciclo do combustível nuclear por meio de normas e orientações.

Em 1982 que o país registra sua primeira experiência em enriquecimento isotópico de urânio utilizando ultracentrífugas inteiramente nacionais (KURAMOTO; APPOLINI, 2000). Por fim, em 2018 ocorre a consolidação das diretrizes sobre a política nuclear brasileira por meio do decreto do Presidente da República nº 9.600, cuja finalidade consiste na orientação do planejamento, ações e atividades nucleares e radioativas no país com vistas a soberania nacional, o desenvolvimento, a proteção da saúde humana e do meio ambiente (BRASIL, 2018).

É justamente a fim de proteger os interesses e a soberania nacional que a Constituição Federal, em seu art. 177, inciso V, diz que as atividades de pesquisa, lavra, enriquecimento, reprocessamento, industrialização e o comércio de minérios e minerais nucleares e seus derivados constituem monopólio da União (BRASIL, 2018). Essa grande preocupação acerca destes elementos, em especial do urânio, é justificada por sua toxicidade, uma vez que este oferece riscos à saúde humana e ao meio ambiente, mas também por sua ampla gama de usos como a radioterapia em medicina nuclear; na datação de rochas; na indústria militar, como já visto com as bombas atômicas; mas principalmente pela possibilidade de geração de energia.

As Indústrias Nucleares do Brasil (INB) por sua vez, local onde este trabalho foi desenvolvido, constitui uma sociedade de economia mista e controlada pela União, cuja responsabilidade é a execução do monopólio da União de que trata o art. 177, inciso V, da

Constituição Federal. Desta forma, a INB é a responsável pelas atividades industriais do ciclo do combustível nuclear, tais como as atividades de prospecção e pesquisa mineral, mineração, beneficiamento primário do urânio e sua comercialização. Antes da denominação INB, por meio do Decreto-Lei n° 2.464/88, a sociedade de economia mista era denominada Empresas Nucleares Brasileiras (NUCLEBRÁS), segundo a Lei 6.189/74, e antes ainda era a Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear (CBTN), constituída pela Lei n° 5.740/71.

A INB está hoje presente nos municípios de Resende (RJ), Buena (RJ), Caetité (BA), Caldas (MG) e São Paulo, além de sua sede no Rio de Janeiro e um escritório em Fortaleza (CE). Em muitas destas localidades a empresa desenvolve e já desenvolveu atividades minerárias ligadas ao setor nuclear.

A Mina Osamu Utsumi (MOU), localizada em Caldas (MG), é uma dessas localidades onde a INB desenvolvia atividades de lavra e beneficiamento de minério de urânio. Em 1995 a mina encerrou suas atividades, também devido a descoberta de novas jazidas de urânio em Caetité (BA). A unidade está em fase de descomissionamento desde então.

Descomissionar consiste na tomada de providências para a desativação de instalações nucleares ao fim da vida útil delas, com vistas a proteção da saúde dos trabalhadores e do meio ambiente (AIEA, 2006). Desta forma, ao fim da vida útil de um empreendimento minerário é preciso realizar ações que visem a mitigação dos impactos e passivos ambientais gerados pelo mesmo. No processo de descomissionamento da MOU, um dos principais passivos ambientais encontrados é a geração de drenagem ácida de mina (DAM), que ocorre tanto no reservatório da barragem de rejeitos quanto na cava e nas pilhas de rejeitos denominadas Bota-fora (BF). Foram gastos aproximadamente US\$ 1,2 milhão com corretivos de efluentes ácidos entre 1994 e 2001, com um volume de DAM tratado de 18 milhões de m<sup>3</sup> (CIPRIANI, 2002).

A drenagem ácida de mina consiste em um efluente de baixo pH (ácido) e de alto poder de solubilização de elementos químicos. O fenômeno ocorre quando esses minerais reativos são oxidados em contato com oxigênio e interagem com água, com conversão do sulfeto em sulfato com conseqüente formação de ácido sulfúrico. Uma vez formado esse efluente ácido, a percolação em contato com rochas pode promover a mobilização de elementos como ferro, manganês, alumínio e chumbo com conseqüente dispersão para o ambiente (NORDSTROM et al., 2015; MOYÉ et al., 2017; SKOUSEN et al. 2018). Este é o principal passivo ambiental que acomete as pilhas de rejeitos da Mina Osamu Utsumi, em especial o Bota-Fora 4, a pilha de descarte mais antiga da mina e o local onde este trabalho foi realizado.

Dentre as formas de investigação da ocorrência e geração de DAM possuem destaque as técnicas diretas, mediante a perfuração de poços, e as indiretas, por meio de métodos

geofísicos, em especial os geoeletricos. Uma vez que a primeira depreende grandes incentivos financeiros, visto que as pilhas de rejeito normalmente estão dispostas em grandes áreas e há a necessidade de uma grande malha amostral, a segunda é certamente mais interessante financeiramente.

A geofísica consiste no estudo do substrato terrestre por meio do contraste entre as propriedades físicas presentes nos materiais em subsuperfície. No estudo do impacto gerado por DAM, bem como na investigação de fluxos hidrogeológicos, têm destaque os métodos geoeletricos da Eletroresistividade (ER) e da Polarização Induzida (IP). A Eletroresistividade permite reconhecer zonas úmidas em subsuperfície que normalmente apresentam baixa resistividade em relação às porções mais secas como solos e rochas. A DAM possui uma assinatura geoeletrica de baixa resistividade. O método da Polarização Induzida permite o reconhecimento de zonas mineralizadas por sulfetos, caracterizadas por altos valores de cargabilidade.

Vários estudos provaram a eficácia destes métodos geoeletricos na identificação de zonas de mineralização de DAM e sulfureto (POISSON et al. 2009; ANTERRIEU et al. 2010; MARTÍN-CRESPO et al. 2018; MOREIRA et al. 2020; MARTÍNEZ-PAGUEN 2021). Outros estudos demonstraram a eficácia da utilização de ER no estudo da infiltração de água e monitorização de DAM no BF-04 (GREER et al. 2017; DIMECH et al. 2019; HESTER et al. 2019; TARGA et al. 2019).

Durante a operação da MOU foram produzidas cerca de 44,8 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos, material proveniente do processo de decapeamento da mina (retirada de solos e cobertura vegetal) e da porção da jazida mineral sem minério ou com teor de minério muito baixo, cujo aproveitamento é economicamente inviável (CIPRIANI, 2002). Essas rochas de baixo teor de minério alocadas nos BF possuem mineralizações de sulfetos e minerais reativos, como a pirita (FeS<sub>2</sub>), que estimulam a produção de drenagem ácida. A heterogeneidade dos materiais constituintes das pilhas facilita a entrada de oxigênio atmosférico, que oxida os sulfetos, e a infiltração de água, que completa a reação química.

Um fator agravante presente no BF-04 é a presença do canal de desvio do córrego da Consulta, que estabelece um contato direto com a pilha em sua porção mais ao norte. Antes da construção da MOU, o referido córrego tinha seu curso natural por onde hoje é o meio do BF-04, entretanto, para a construção da pilha o mesmo foi realocado, originando assim o canal de desvio. Durante a construção do canal não foram realizadas obras de impermeabilização e uma vez que o mesmo está em contato direto com a pilha, é possível que ocorra a infiltração das águas do córrego da Consulta para dentro do BF-04, o que poderia contribuir para a geração de

drenagem ácida de mina. Desta forma, este trabalho teve por intuito investigar possíveis zonas de infiltração do canal de desvio do córrego da Consulta no Bota-fora 4, a fim de avaliar a participação do canal na geração do efluente ácido. Além disso, com os dados geofísicos foi possível investigar possíveis zonas de geração de DAM.

## **2. Objetivos**

Este trabalho visa a identificação de zonas de infiltração de um canal de desvio em uma pilha de rejeito de uma mineração de urânio e a análise de suas relações com a geração de drenagem ácida de mina (DAM).

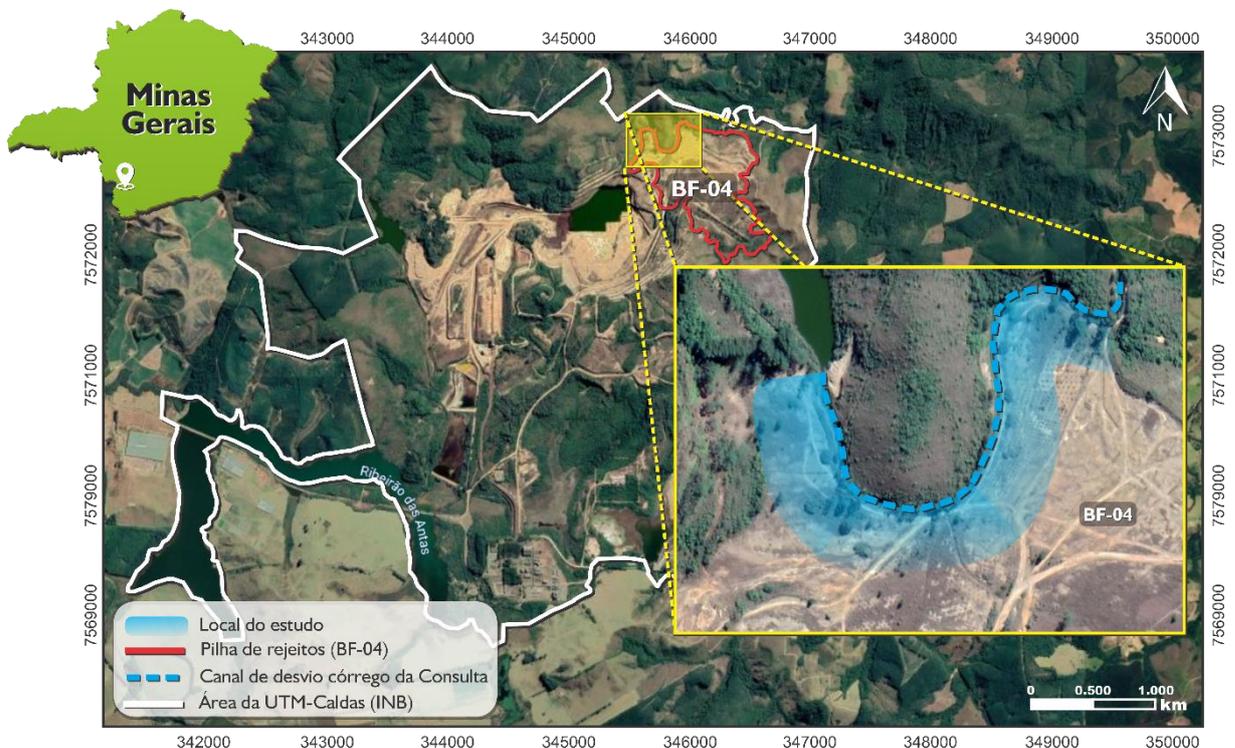
### 3. Área de estudo

#### 3.1 Localização

O estudo foi realizado nas dependências da Mina Osamu Utsumi, localizada no município de Caldas (MG), a cerca de 40 km do município de Poços de Caldas (MG) na região sudoeste do Estado de Minas Gerais. Para ter acesso à mina a partir de Poços de Caldas (MG), é preciso seguir pela BR146 em direção a sul e virar à esquerda na primeira rotatória. Após isso passe pela Chácara das Garças e siga em frente até chegar na Unidade de Tratamento de Minério – Caldas (UTM-Caldas).

O local escolhido foi o Bota-Fora 4 da mina, na porção em que o mesmo tem contato direto com o canal de desvio córrego da Consulta. Na Figura 1 estão indicados os limites da UTM-Caldas, as partes que compõem o complexo mineiro tais como a cava da MOU, os demais bota-foras, a bacia de rejeitos e a área industrial, com destaque para a porção nordeste da mina onde está inserida a área de estudos.

**Figura 1** - Unidade de Tratamento de Minério – UTM Caldas com destaque para o BF-04 em vermelho e o canal de desvio córrego da Consulta na porção nordeste do complexo.



Fonte: Adaptado de Alberti (2017).

### 3.2 Mina Osamu Utsumi

A Mina Osamu Utsumi (MOU) está inserida na Unidade de Tratamento de Minérios – Caldas (UTM-Caldas), pertencente às Indústrias Nucleares do Brasil e que conta com uma área de aproximadamente 15 km<sup>2</sup> (NASCIMENTO, 1998). Sua criação está atrelada à descoberta da jazida de urânio Campo do Cercado em 1970 no município de Caldas (MG) (CIPRIANI, 2002). Conhecido antigamente como Complexo Mineiro Industrial de Poços de Caldas, o CIPC foi o primeiro complexo a lavar e beneficiar o minério de urânio no Brasil, com operações iniciadas em 1982.

O processo de lavra na MOU consistia na retirada do minério em operação a céu aberto por meio de bancadas de aproximadamente 4 m de altura. O teor de corte utilizado era de 170 ppm de urânio solúvel, de forma que o resto do material que não atingisse esse valor era disposto em pilhas a céu aberto conhecidas por bota-fora, onde também eram dispostos outros materiais sem valor econômico como solos e rochas advindos da decapagem. As rochas com valor econômico eram então dispostas em pátios de estocagem para a alimentação do britador primário, que por sua vez reduzia a granulção do material a frações de 25 cm. Da britagem secundária o material passava por um moinho de barras que atuava na redução da granulometria para 1,168 mm, onde era feita também a adição de pirolusita e rochas fosfática com o intuito de oxidar a polpa ácida, com a primeira, e realizar a precipitação do zircônio com a segunda.

Posteriormente o minério era submetido a um tratamento químico. O minério era disposto em tanques com ácido sulfúrico a 70° C por 6 horas, com uma relação de 70 a 150 kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t de minério (CIPRIANI, 2002). Posteriormente a polpa era lavada com água a fim de recuperar o urânio dissolvido num processo de separação sólido-líquido. Na sequência ocorria o processo de clarificação com clorato de sódio para a retirada de lamas finas que ficaram após a passagem pelo filtro. O material então era colocado em uma bateria de misturadores-decantadores com solventes para realizar a extração do urânio, que depois era precipitado e concentrado em forma de *yellow cake* e guardados em tambores metálicos.

Esses processos de lavra e tratamento químico de urânio ocorreram até o ano de 1995, quando em decorrência da inviabilidade econômica da exploração local e a descoberta de novas jazidas de urânio em Caetité (BA), levaram ao fechamento definitivo da mina.

Foi estimado que apenas entre o período de 1977 e 1981, no período pré-decapagem da mina, tenham disso retirados 30 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos. A operação teria movimentado cerca de 94,5x10<sup>6</sup> toneladas de rochas, e apenas 2% desse montante teria disso enviado ao

processamento de minério e todo o restante foi depositado nos bota-foras. Na Tabela 1 constam algumas estimativas realizadas por Cipriani (2002).

**Tabela 1** - Características das pilhas de rejeitos da MOU.

Pilha	Volume (1.000 m <sup>3</sup> )	Massa (1.000 T)	Área (ha)	Origem predominante do material
BF-01	4.400	8.800	25,5	Decapagem
BF-03	9.800	19.600	20,5	Decapagem
<b>BF-04</b>	<b>12.400</b>	<b>24.800</b>	<b>56,9</b>	<b>Decapagem e triagem do corpo B</b>
BF-07	2.400	4.800	5,3	Decapagem
BF-08	15.000	30.000	64,4	Decapagem e triagem dos corpos A e E
BF-CM	560	1.200		Triagem do corpo E
Total	45.560	89.120	172,6	

Fonte: Cipriani (2002).

Quanto ao rejeito originado no tratamento químico do minério, as lamas do clarificador e o rejeito sólido da lixiviação eram enviados à estação de tratamento de rejeitos sólidos, na qual passavam por um tratamento de calcário e cal em tanques agitados que promovia a precipitação do material em forma de pirolusita. Os rejeitos líquidos da extração por solventes eram mandados para a estação de tratamentos líquidos e eram submetidos ao mesmo processo dos rejeitos sólidos. Todo o material resultante do tratamento era disposto na bacia de rejeitos (reservatório da barragem de rejeitos). No reservatório o material sólido decantava e o líquido fluía por um vertedouro para tanques de decantação onde recebiam adição de solução de cloreto de bário a fim de precipitar o rádio como Ba(Ra)SO<sub>4</sub>. Feito o tratamento, o líquido remanescente era então lançado no ribeirão Soberbo de volta ao ambiente.

A INB solicitou ainda uma licença para o tratamento químico da monazita em 1998 no mesmo ano que começaram a depositar na cava da mina uma lama conhecida como DUCA (Diuranato de Cálcio), material proveniente de neutralizações de águas com baixos teores de urânio. Em 2002 a empresa assina um termo de compromisso junto ao IBAMA com vistas ao licenciamento ambiental para os testes de processamento de monazita. Neste termo de compromisso é estabelecida a obrigação da INB-Caldas em definir medidas objetivas para lidar com os impactos ambientais gerados durante o funcionamento do complexo (NÓBREGA, 2007).

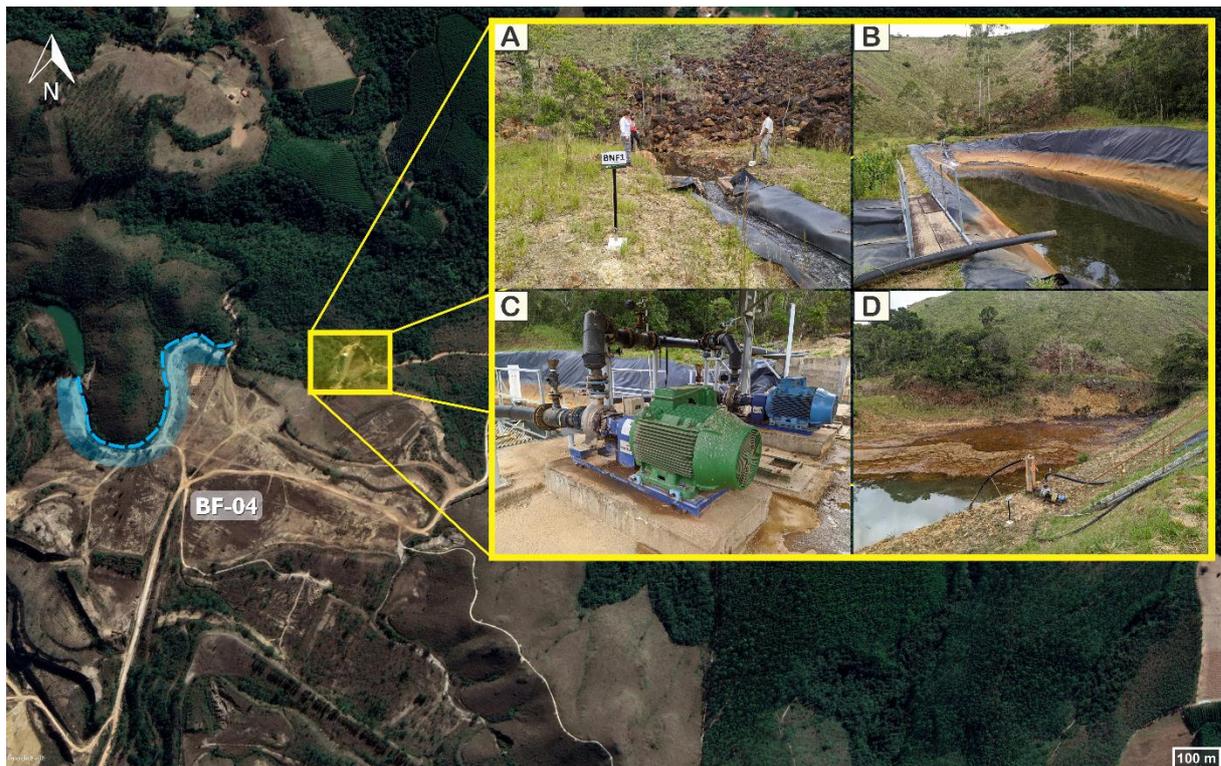
No final de 2004 é elaborado então um termo de referência que visava a elaboração de um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) para a UTM-Caldas pelo IBAMA com o auxílio da CNEN. É então em 2011 que a empresa contatada pela INB para a elaboração do

PRAD, a *Golder Associates*, entrega o relatório final ao IBAMA e a CNEN. O PRAD foi aprovado pelo IBAMA em 2012, mas até o começo de 2020 ainda estava aguardando um parecer da CNEN (INB, 2020).

É preciso destacar que dentre os diversos problemas ambientais que a INB-Caldas enfrenta hoje para o fechamento definitivo do complexo, a formação de DAM nas pilhas de rejeito, na cava e no reservatório de rejeitos é o mais grave deles.

Devido ao alto potencial de poluição ocasionado por esse efluentes a INB conta com um sistema de captação de drenagens ácidas, que coleta as águas de baixo pH da mina para que sejam tratadas antes de voltar ao meio ambiente. Da mesma forma, o BF-04 conta com um desses sistemas para a coleta e tratamento de efluente (Figura 2).

**Figura 2** - A) Efluente ácido saindo no sopé do BF-04. B) Bacia de captação de drenagem ácida de mina. C) Maquinário utilizado para bombear os efluentes. D) Antiga bacia de captação de DAM.

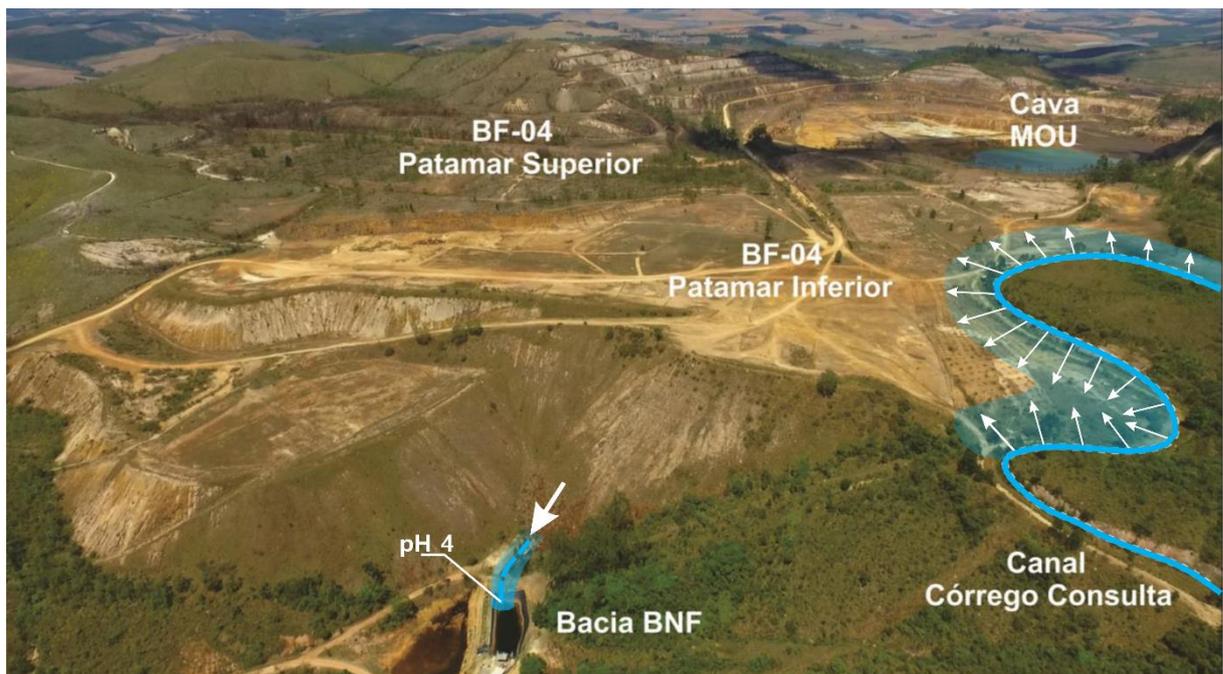


### 3.3 Bota-fora 04 e o Córrego da Consulta

O Bota-fora 04 (Figura 3) é uma pilha de descarte localizada na porção nordeste da Mina Osamu Utsumi constituída tanto pelo material do decapeamento quanto pela lavra do minério conhecido como “corpo B” (a porção sem valor econômico). Para Cipriani (2002) o BF-04 possui uma área de 56,9 ha que contém cerca de 12,4 milhões de m<sup>3</sup> de rejeito, além de contar

com uma altura de talude de 90 metros com uma inclinação de 70 graus. Para Alberti (2017), a pilha conta com uma área de 65,8 ha e um pouco mais de 14 milhões de m<sup>3</sup> de material de descarte. Ainda segundo Alberti (2017), a pilha é dividida em um patamar superior e outro inferior, o primeiro decorrente do decapeamento e o segundo da triagem do corpo de minério tipo B. Às margens do BF-04 foi instalado o canal de desvio do córrego da Consulta.

**Figura 3** - Área do BF-04 com destaque para o canal de desvio córrego da Consulta (linha azul) e possível infiltração indicada pelas setas branca. Bacia de captação de drenagem ácida (BNF) na porção inferior.



Fonte: Adaptado de Casagrande (2019).

O processo construtivo do BF-04 é conhecido como ponta de aterro (*end-dumping*), processo este que segundo Nunes (2014) consiste na deposição do rejeito por meio de basculamento na ponta de trabalho (crista), no qual o avanço do aterro segue o ângulo de repouso do material (Figura 4).

**Figura 4** - Método de construção de pilha de rejeito chamado ponta de aterro (*end-dumping*).

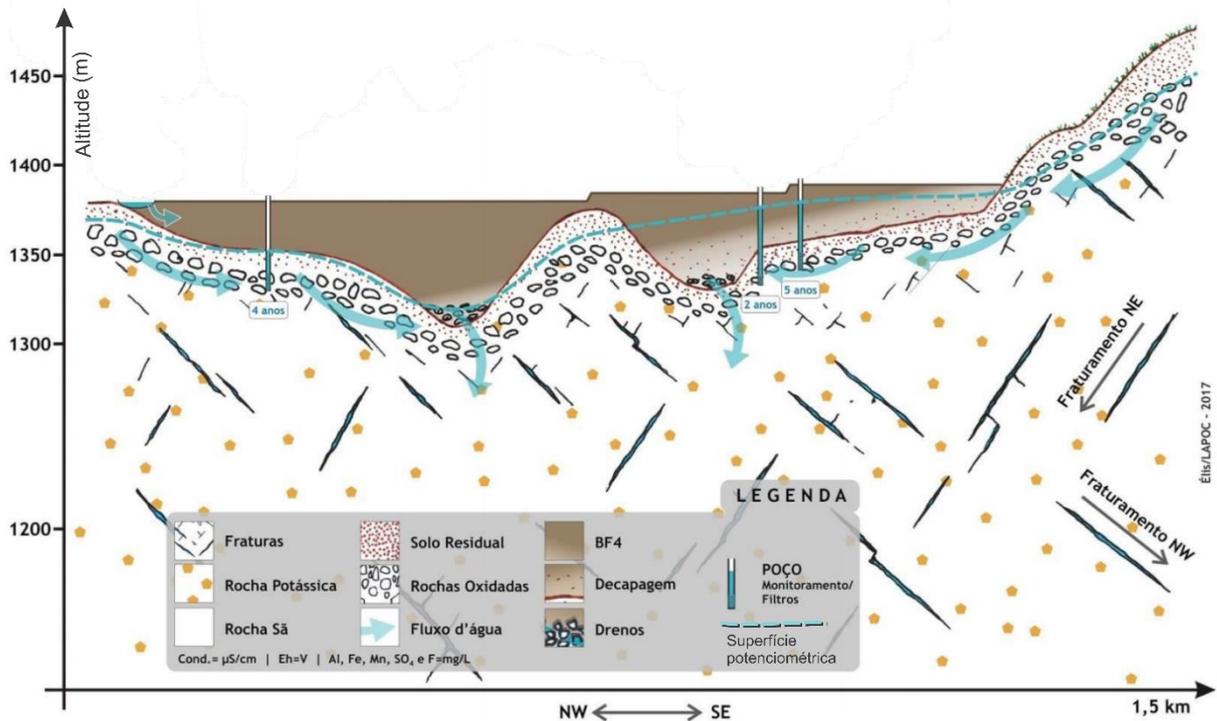


Fonte: Nunes (2014).

Neste tipo de deposição ocorre o rearranjo das frações granulométricas de forma que os sedimentos mais finos fiquem em cima e mais grossos embaixo. Essa configuração permite a entrada tanto de oxigênio quanto de fluídos como a água que contribuem para os processos de DAM. Desta forma, é possível entender que o BF-04 funciona como um sistema hidrogeológico, com capacidade de movimentação de fluxos hídricos em seu interior. Apesar de no seu processo construtivo ter sido empregada uma camada de argila para selar sua porção mais superficial, com o intuito de barrar infiltrações de água meteórica, o seu interior conta com uma grande porosidade decorrente da heterogeneidade do material ali alocado.

O BF-04 então é comparável a um aquífero poroso granular e está sujeito às mesmas propriedades hidráulicas que regem outros aquíferos de características semelhantes (Figura 5). O fluxo nele presente tende a ser condicionado pelas rochas do embasamento cristalino sotopostas a ele, que agem como um tapete drenante seguindo a topografia do antigo vale.

*Figura 5 - Perfil conceitual do BF-04 e seu comportamento hidrogeológico.*



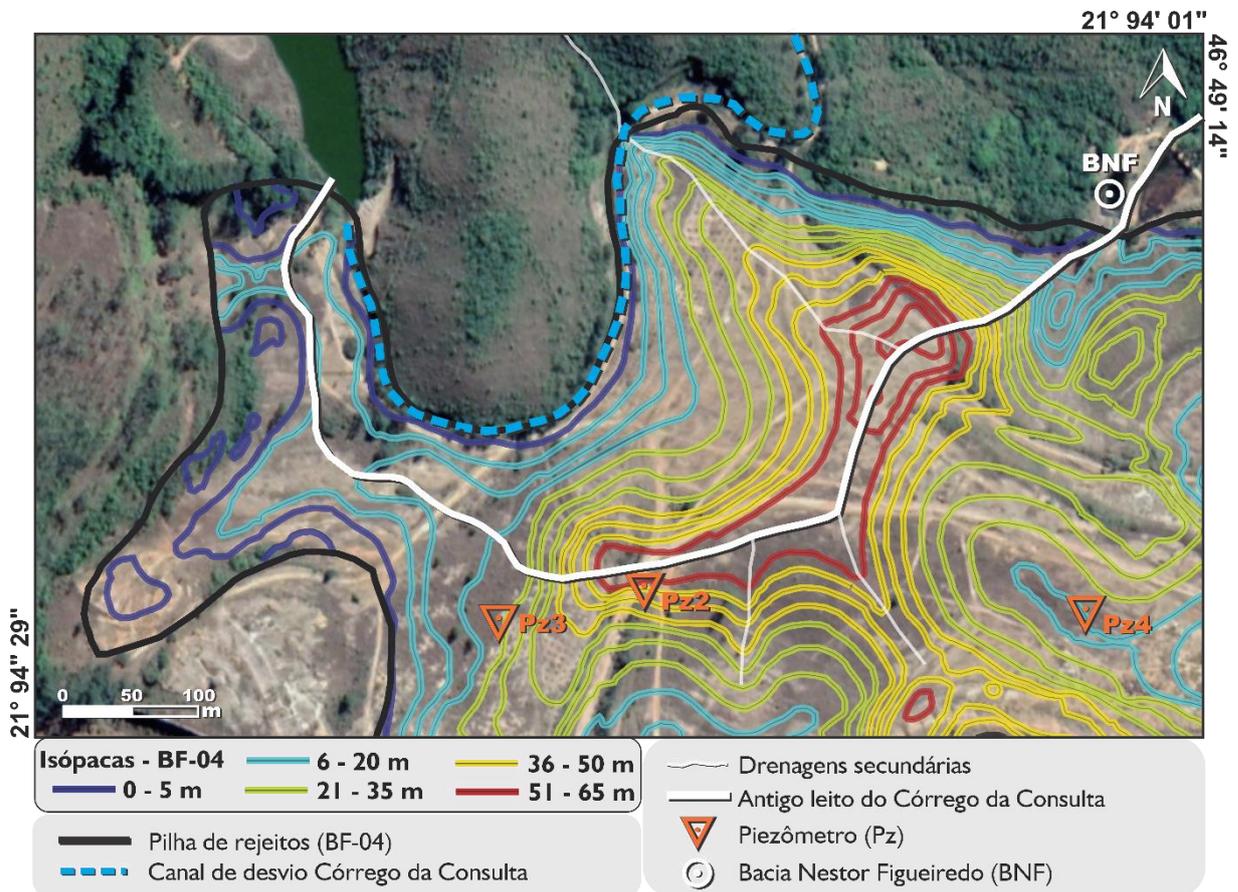
Fonte: Adaptado de Alberti (2017).

Segundo o IPT (1984) e Wiikman (1998) os estudos realizados na época demonstraram que tanto as pilhas como a fundação sobre a qual o rejeito seria colocado não apresentavam problemas geotécnicos relacionados a rupturas e instabilidades do aterro. Contudo, a história mostra que além de não terem sido feitas obras para preparar o terreno, os bota-foras BF-04 e o BF-08 foram construídos sobre os vales do córrego da Consulta e do córrego do Cercado,



segundo o autor alcançou de 30 a 35 metros aproximadamente em seu platô superior e de 60 a 65 metros em seu platô inferior. É interessante notar que a zona de maior espessura encontrada corresponde ao local onde percorria o antigo leito do córrego.

Figura 7 - Mapa de isópacas do BF-04



Fonte: Adaptado de Alberti (2017).

Através do Modelo de Terreno Digital pré-operacional do BF-04, foi possível delinear o antigo leito do córrego da Consulta. Para melhor visualização o antigo leito do córrego foi sobreposto ao mapa isópacas do BF-04.

Os piezômetros Pz2 e Pz3 estão ambos localizados na cota 1376 m e têm uma espessura de rejeito de 51 m e 19,5 m, respectivamente (Franklin, 2007). Estas espessuras correspondem às encontradas no mapa de isópacas. Contudo, no piezômetro Pz4 há uma diferença de aproximadamente 8 m entre o valor obtido no piezômetro e o obtido no mapa.

No começo do funcionamento da MOU os efluentes eram bombeados até um canal presente no BF-8 e posteriormente lançados no córrego do Cercado sem qualquer tratamento (CIPRIANI, 2002). A CNEN determinou que fossem construídas bacias de captação das águas dos bota-foras e da mina após a constatação deste problema, para que fosse feito o tratamento

de neutralização da acidez bem como retirar os metais pesados e radionuclídeos para posterior lançamento nos cursos d'água.

Mesmo com o tratamento de efluentes para lançamento nos cursos d'água, o canal de desvio do córrego Consulta continua em contato lateral com o BF-04, ausente de quaisquer sistemas de impermeabilização (Figura 8).

**Figura 8** - O contato do canal de desvio com o BF-04 e o maciço rochoso (limite norte na pilha de rejeito).



O canal de desvio córrego da Consulta constitui um trecho de 600 metros de comprimento com uma largura média de 2 metros. Seu trajeto é iniciado a partir de uma pequena represa de mesmo nome localizada no limite norte do BF-04. Neste trecho o canal é marcado por curvas bem marcadas e águas calmas, que fluem de oeste para leste. É importante ressaltar que existe um sistema de coleta de águas pluviais no BF-04 que despejam no canal (Figura 9).

**Figura 9** - Represa que antecede o canal de desvio (esquerda) e sistema de drenagem pluvial do BF-04 (direita).



O trabalho de Rodrigues (2001), realizado no canal de desvio do córrego da Consulta, apontou diferenças nos valores de vazão de diferentes trechos do canal. O estudo contempla desde a porção a montante da represa localizada na área (Bacia do Carlaile), até o local próximo à saída do canal (Figura 10). A coleta de dados ocorreu tanto no verão quanto no inverno. A fim de minimizar a contribuição das chuvas, que naturalmente é mais constante no verão, neste estudo foram considerados os dados coletados no inverno, que corresponde a um período mais seco.

**Figura 10** - Localização dos pontos de medição de vazão.



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2001).

**Tabela 2** - Resultados das medições das vazões do sistema BF-04.

Domínio	Ponto	Local de medição	Data	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Vazão (l/s)	Estação
Bacia do Carlaile	A	Montante da Bacia do Carlaile	mar/00	1,171×10 <sup>-4</sup>	0,117	Verão
	B	Montante da Bacia do Carlaile	mar/00	1,443×10 <sup>-4</sup>	0,144	Verão
	C	Entrada da Bacia do Carlaile	mar/00	1,591×10 <sup>-4</sup>	0,159	Verão
	P1	Entrada da Bacia do Carlaile	nov/99	5,501×10 <sup>-5</sup>	0,055	Inverno
Canal de desvio	P2	Entrada do canal de desvio	nov/99	5,029×10 <sup>-5</sup>	0,05	Inverno
	D	Canal de desvio - próximo à entrada do canal	mar/00	1,171×10 <sup>-4</sup>	0,117	Verão
	P3	Canal de desvio - depois da ponte	nov/99	4,438×10 <sup>-5</sup>	0,044	Inverno
	P4	Canal de desvio - limite ocidental do platô do BF-04	nov/99	4,438×10 <sup>-5</sup>	0,044	Inverno
	P5	Canal de desvio - próximo à saída do canal	nov/99	4,509×10 <sup>-5</sup>	0,045	Inverno
	E	Saída do canal de desvio	mar/00	1,210×10 <sup>-4</sup>	0,121	Verão
BNF	PE-4	Base do BF-04 - ponto 75	jul/98	1,8×10 <sup>-2</sup>	17,972	Inverno
	PE-4	Base do BF-04 - ponto 75	fev/99	2,0×10 <sup>-2</sup>	19,639	Verão
Desvio	De. 1	Água desviada 1 - BNF	fev/99	1,661×10 <sup>-3</sup>	1,661	Verão
BNF	De.2	Água desviada 2 - BNF	fev/99	3,14×10 <sup>-4</sup>	0,314	Verão

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2001).

Os dados apontaram a perda de água no Bacia do Carlaile entre os trechos P2 e P3. Entre os pontos P1 e P2, área que corresponde à bacia, houve uma perda de 0,005 l/s que pode estar associada ao escape de fluidos pelas fraturas embasamento. Entre os pontos P2 e P3, local que corresponde ao início do canal de desvio, a perda foi de aproximadamente 0,006 l/s.

Rodrigues (2001) aponta que o BF-04 possui diferentes áreas de recarga: as infiltrações basais ascendentes, ligadas a drenagens e nascentes soterradas; infiltrações descendentes da chuva, que segundo o autor seria a contribuição mais significativa; e as infiltrações laterais do canal de desvio. Contudo, esta última representaria um volume de água pequeno quando comparado às demais áreas de recarga.

### 3.3.1 Comportamento hidráulico e hidroquímica do BF-04

Os dados de condutividade hidráulica saturada (Ksat) do BF-04 indicam valores de 2,06×10<sup>-4</sup> a 1,04×10<sup>-3</sup> cm/s para o topo da pilha e 9,05×10<sup>-4</sup> cm/s para o talude, na porção 5 metros abaixo do topo. Contudo, não foram feitas medições da condutividade hidráulica saturada no meio ou no sopé do talude devido à granulação grosseira do material. Estes dados reforçam a ideia de segregação de tamanho de partícula em BF-04. A concentração de material grosseiro na porção inferior do BF-04 faz com que a base da pilha seja comparável a uma

camada de alta condutividade hidráulica, condicionando o movimento da água dentro da pilha. Entre a pilha e o embasamento rochoso existe uma camada de material de transição, composta de rochas desgastadas pelo tempo (Franklin 2007).

A porosidade média do BF-04 é de 45%, variando de 35% a 53%, e os valores médios de macroporosidade são cerca de 20% mais elevados no talude em comparação com o topo da pilha (Franklin 2007). A elevada porosidade da pilha e as correntes de vento vindas do vale aceleram o intemperismo dos minerais e contribuem para a formação da DAM (Alberti, 2017). A porosidade das rochas na região da mina Osamu Utsumi varia de 2% a 6% na zona redox e de 15% a 20% na zona de oxidação (Waber et al. 1991).

Os minerais mais abundantes identificados no BF-04 são feldspato potássico [KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>], caulinita [Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>], muscovita [KAl<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>], gibbsita [Al(OH)<sub>3</sub>] e goethita [FeO(OH)]. Há também a presença de minerais secundários, como a pirita, em concentrações próximas dos 2%. A composição química das rochas residuais apresenta uma predominância de Si, Al e K, o que corresponde à litologia da região, composta de rochas alcalinas.

**Tabela 3** - Composição mineralógica do BF-04.

Mineral	Concentração no BF-04 (%)	
	Franklin (2007)	Leite (2010)
Feldspato K (KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	<b>50</b>	<b>61.43</b>
Caulinita (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> )	<b>20</b>	<b>29.41</b>
Muscovita (KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> )	<b>20</b>	<b>1.09</b>
Pirita (FeS <sub>2</sub> )	<b>2</b>	-
Barita (BaSO <sub>4</sub> )	<b>2</b>	-
Goethita (FeO(OH))	<b>2</b>	<b>6.51</b>
Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	<b>1,5</b>	-
Magnetita (Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	<b>0,5</b>	-
Pirolusita (MnO <sub>2</sub> )	<b>0,17</b>	-
Gibbsita (Al(OH) <sub>3</sub> )	<b>1,25</b>	<b>1.56</b>
Fluorita (CaF <sub>2</sub> )	<b>0,42</b>	-
Uraninita (UO <sub>2</sub> )	<b>0,12</b>	-
Sílica (SiO <sub>2</sub> )	<b>0,4</b>	-

Outro fator interessante é a diferença entre as características hidroquímicas em diferentes pontos do BF-04. No piezômetro Pz3, os dados indicam pH baixo (3,5), alta concentração de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> (22.003 mg/L) e alta condutividade (9.853 µS/cm), características que correspondem a um ambiente influenciado pela DAM. No piezômetro Pz4, os valores indicam

pH 6,2, 16,4 mg/L de  $\text{SO}_4^{-2}$  e condutividade de 158  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Esta diferença entre os piezômetros Pz3 e Pz4 contribui para a ideia de que o BF-04 possui características heterogêneas, onde algumas áreas são mais susceptíveis à formação de DAM do que outras.

**Tabela 4** - Dados obtidos nos piezômetros e BNF.

	Cota (m)	Espessura da pilha (m)	pH	Cond. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\text{SO}_4^{-2}$ (mg/L)	Referência
Pz2	1376	51	-	-	-	Franklin (2007)
Pz3	1376	19,5	3,5	9.853	22.003	
Pz4	1378	24	6,2	158	16,4	
BNF	1320	-	4	1.297,3	944,3	Alberti (2017)

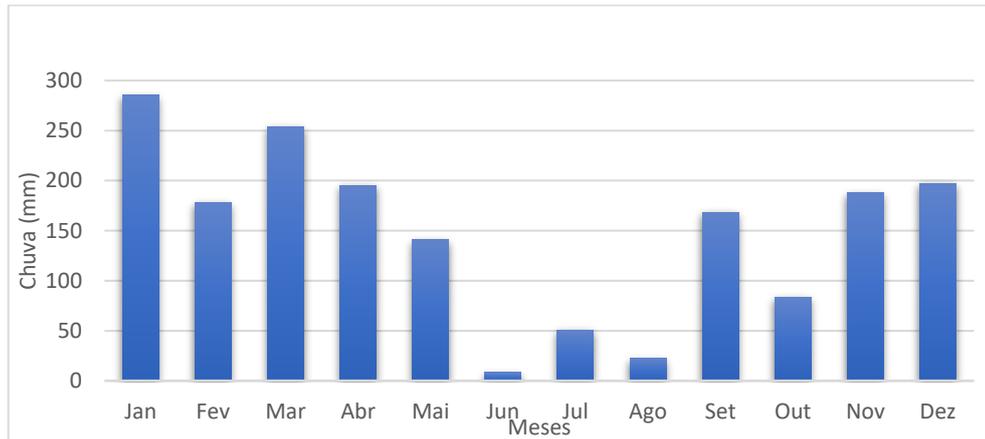
Na base do BF-04, existe uma bacia de captação de drenagem ácida (BNF) concebida para coletar o efluente ácido gerado no BF-04. A média histórica do fluxo da BNF indica que a captação de DAM ocorre tanto nos meses de chuva como nos meses secos, com o fluxo máximo em fevereiro (72  $\text{m}^3/\text{h}$ ) e o mínimo em outubro (55  $\text{m}^3/\text{h}$ ) (CASAGRANDE, 2019). O efluente capturado pela BNF é caracterizado por pH baixo (4), 944,3 mg/L de  $\text{SO}_4^{-2}$ , condutividade de 1.297,3  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e a presença de íons dissolvidos como o Si (12,37 mg/L), Al (130,00 mg/L), Fe (0,86 mg/L), Mn (71,20 mg/L), K (3,50 mg/L), Ca (77,28 mg/L), Mg (7,07 mg/L) e  $U_{\text{nat}}$  (140 Bq/L) (Alberti, 2017).

### 3.4 Clima e vegetação

O clima na região é classificado como Tropical de Altitude (Köppen-Geiger) possuindo assim duas estações bem definidas. A primeira estação é caracterizada por temperaturas mais brandas e elevada pluviosidade, que ocorre entre os meses de outubro a março. Na segunda, que contempla os meses de abril a setembro, predominam períodos de seca e baixas temperaturas. A altitude onde está instalado o complexo mineiro varia de 1.300 m a 1.600 m aproximadamente e a precipitação anual média é de 1.700 mm com a maior parte da precipitação ocorrendo dos meses de outubro a março (cerca de 82%) (FAGUNDES, 2005). Na Figura 11 é possível observar a precipitação mensal na região da MOU.

A vegetação predominante na região é a floresta pluvial de altitude, também conhecida como Floresta Atlântica (RIZZINI, 1979; MORAES, JIMÉNEZ-RUEDA, 2008). Localmente ocorrem campos de altitude formados por gramíneas rústicas tais como o capim “barba de bode”, além de vegetação arbórea e arbustiva (CIPRIANI, 2002).

**Figura 11** - Precipitação mensal na região da MOU no ano de 2019.



Fonte: SINDA – Estação 30975-MG-INB UTM PC01.

### 3.5 Geomorfologia

A área está inserida no contexto geomorfológico do Planalto de Poços de Caldas, uma estrutura circular com cerca de 35 km de diâmetro ocupando uma área de aproximadamente 800 km<sup>2</sup>, cuja altitude normalmente varia de 1.000 m a 1600 m em certas localidades. Seu platô central foi formado pelo intenso processo erosivo de uma antiga caldeira vulcânica formada a cerca de 80 Ma, e sua porção periférica é tida como resquícios do dique anelar da caldeira que na topografia desponta nas áreas norte, oeste e sul do planalto (HOLMES et al., 1992; MORAES & JIMÉNEZ-RUEDA, 2008).

As formas e relevos da região podem ser associadas à variedade litológica do local, uma vez que diferentes tipos de rochas estão propensos a processos erosivos diferentes. Holmes et al. (1992) sugere que os fluxos hídricos continuam os mesmos nos últimos 5 Ma no planalto.

Segundo Moraes & Jiménez-Rueda (2008) a região do planalto pode ser dividida ainda em dois grupos de paisagens: aluviais e planálticas. As paisagens aluviais são caracterizadas por planícies de inundação (unidades fisiográficas típicas) definidas por diques marginais, lagoas marginais, terraços fluviais e canais abandonados. A paisagem planáltica é constituída por taludes que limitam regiões relativamente planificadas ou homogêneas em relação à superfície. Essa última paisagem apresenta vestígios de unidades fisiográficas das planícies

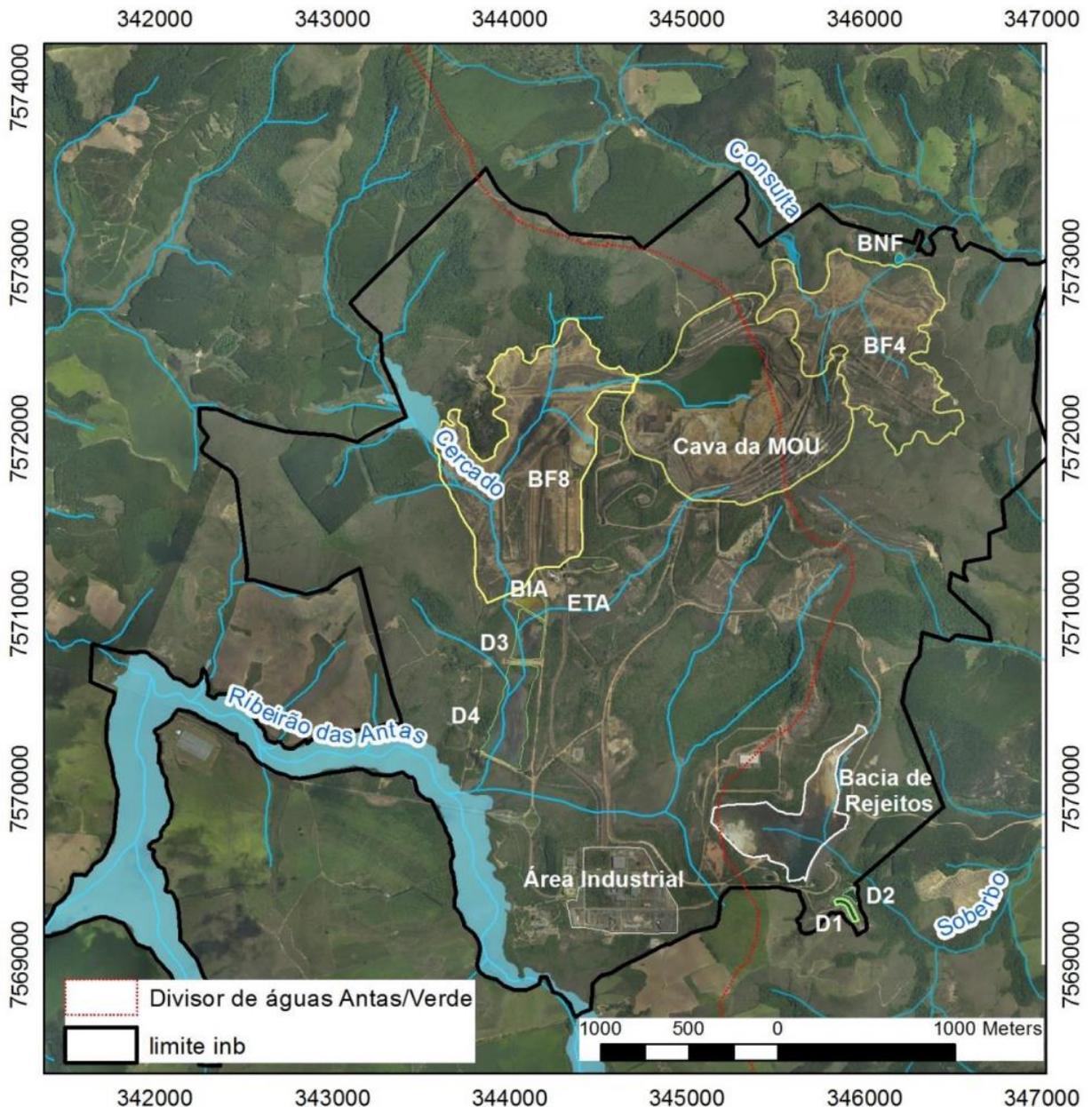
aluviais e dos colúvio-alúvios recentes soerguidos. Localmente ocorrem vales encaixados influenciados pelo sistema de fraturamento regional do Planalto de Poços de Caldas numa morfologia acidentada.

### 3.6 Hidrografia

A rede de drenagens que compõe a região do Planalto de Poços de Caldas consiste em dois grandes sistemas hidrológicos, o rio Verde e o rio das Antas, ambos pertencentes à bacia do rio Pardo, tributário do rio Grande. Localmente, a área da MOU é cortada, a nordeste, pelo divisor de águas que separa as bacias do Ribeirão das Antas (a oeste) e do rio Verde (a leste). As águas do Ribeirão das Antas fluem do reservatório da UTM-Caldas em sentido a Poços de Caldas com posterior represamento pela represa de Bortolan, uma área usada para geração de energia elétrica e lazer dos moradores locais (CIPRIANI, 2002). O córrego da Consulta desagua no ribeirão Soberbo que por sua vez é afluente do rio Verde. As águas deste último são utilizadas apenas para irrigação, pesca e pecuária, visto que não ocorre abastecimento doméstico em um raio de 20 km da MOU (CIPRIANI, 2002).

Na Figura 12 é possível observar a delimitação da área da Unidade de Tratamento de Minérios – Caldas bem como as subdivisões da mesma, com destaque para o divisor de águas destacado pelo traço de cor vermelha.

**Figura 12** - Unidade de Tratamento de Minérios - Caldas com destaque em vermelho para o divisor de águas das bacias do Ribeirão das Antas (oeste) e Rio Verde (leste).



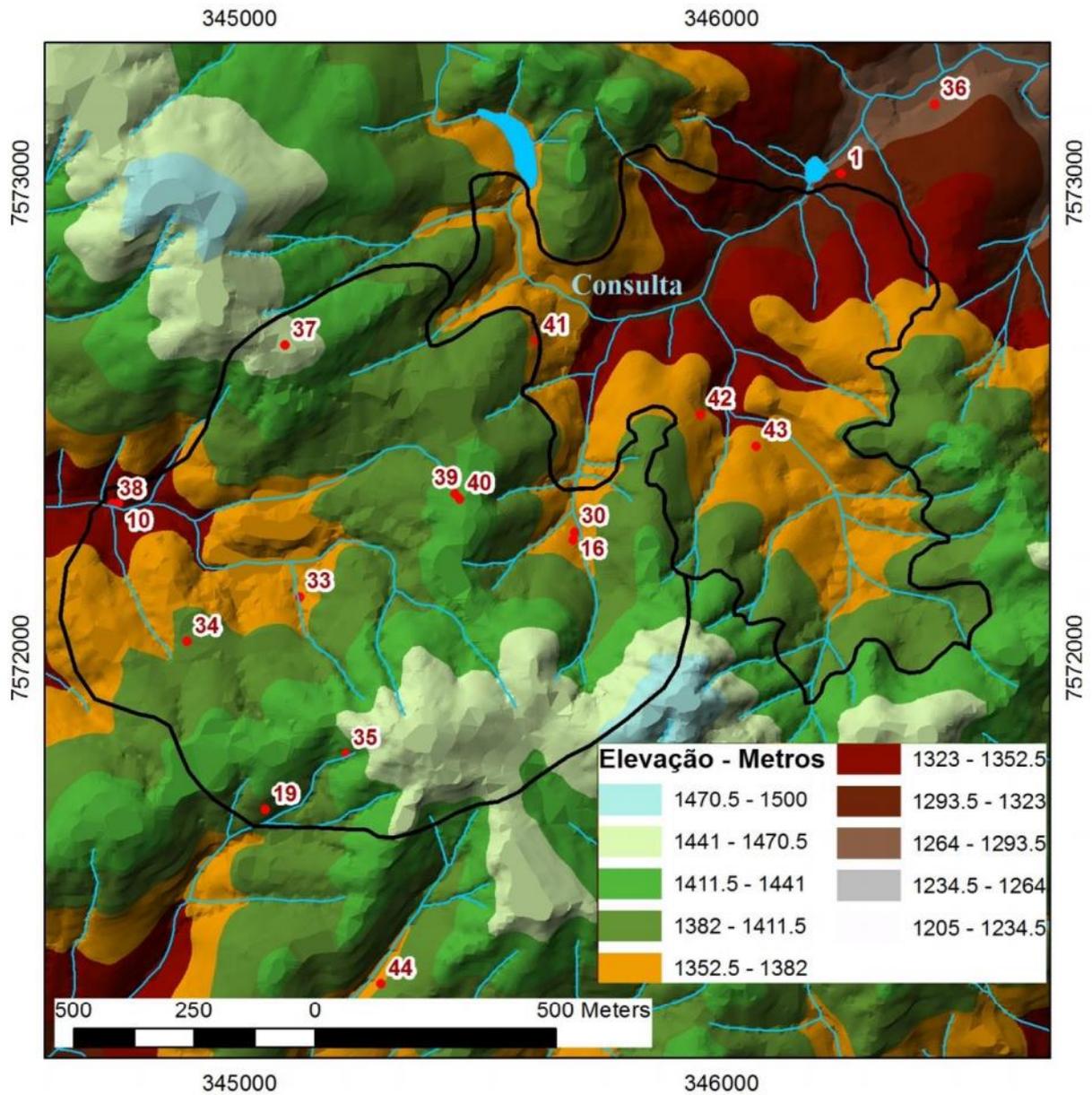
Fonte: Alberti (2017).

Um Modelo Digital do Terreno pré-operacional de Alberti (2017), elaborado por meio de uma mapa topográfico pré-operacional (1975) e um levantamento aerofotogramétrico (2010), permite a visualização dos vales das bacias hidrográficas do Ribeirão das Antas e do córrego da Consulta (Figura 13).

É interessante notar o posicionamento original (pré-construção da MOU) do córrego da Consulta, local onde hoje está a pilha de rejeito denominada Bota-fora 04. O curso natural do

córrego percorria por um vale onde hoje seria o centro do BF-04, com sentido sudoeste/nordeste.

**Figura 13** - Modelo Digital de Terreno pré-operacional com destaque para hidrografia local antes da construção da MOU.



Fonte: Alberti (2017).

### 3.7 Hidrogeologia

O Maciço Alcalino de Poços de Caldas está inserido na Província Escudo Oriental do Sudeste, unidade esta que contempla parte da Província Escudo Oriental juntamente com a Província Escudo Oriental do Nordeste (MENTE et al., 1981). Esta unidade é composta predominantemente por rochas cristalinas tais como migmatitos, granitos, gnaisses, xistos,

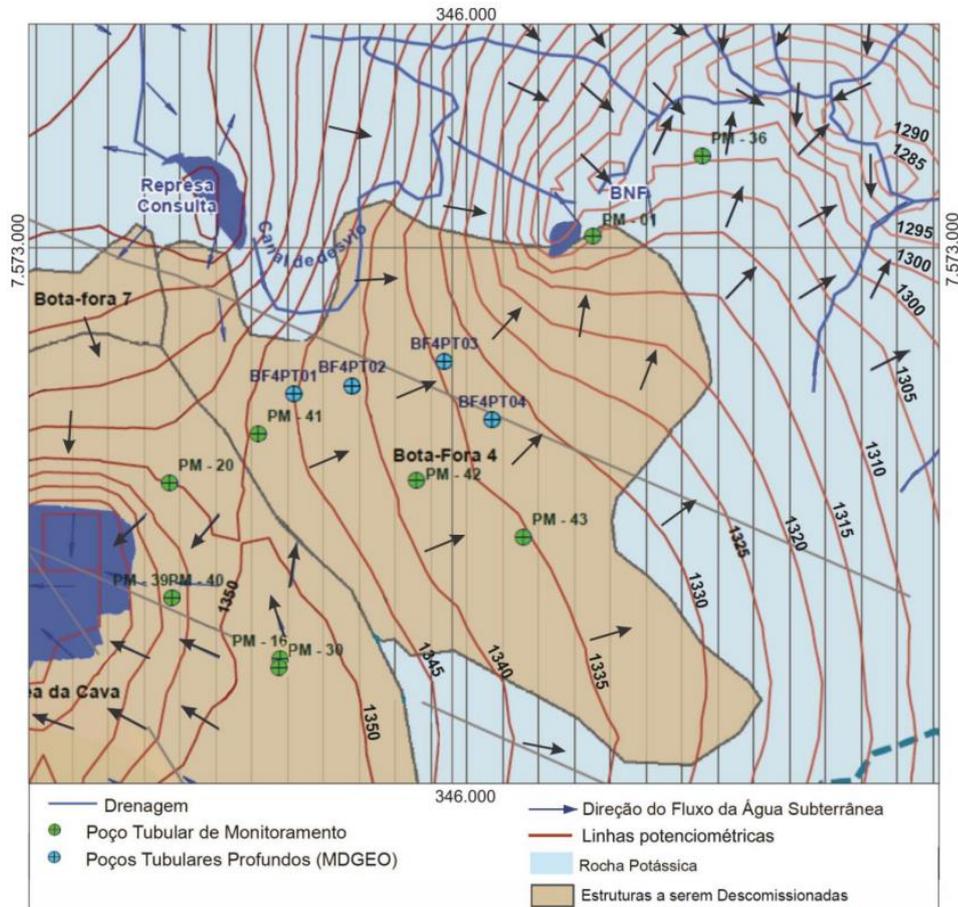
quartzitos, entre outros, e é caracterizada por um potencial hidrogeológico relativamente fraco (MENTE, 2009).

O tectonismo atuante no Maciço Alcalino de Poços de Caldas, no decorrer de toda a sua história, propiciou a formação de um sistema de falhas e fraturas profundas que permite a infiltração e percolação de água no maciço. A porosidade secundária presente nessas zonas de falhamentos contribuem ainda mais para a movimentação do fluxo hidrogeológico. Processos intempéricos posteriores permitiram a formação de um manto residual de alteração das rochas alcalinas, com ocorrência de aquíferos porosos (solos residuais) sobrepostos a aquíferos fraturados (rochas cristalinas).

Entretanto, Cruz e Peixoto (1991) afirmam que não existem na região aquíferos superficiais granulares de significativa importância. Eles ainda propõem a divisão das águas subterrâneas da região em três tipos, segundo suas origens: zona aquífera rasa; zona aquífera intermediária; e zona aquífera de circulação profunda (associada a fontes termais e famílias de fraturas E-W, N14 E e N50 E).

A Mina Osamu Utsumi está localizada no divisor de águas da bacia do Rio das Antas e da bacia do Rio Verde, com uma rede de drenagem influenciada por estruturas e litotipos presentes no maciço (FRAENKEL et al., 1985; GARDA, 1990). A operação da mina promoveu significativa alteração na paisagem local por meio da remoção de vales e interflúvios, alterações nos cursos d'água de drenagens locais, bem como o rebaixamento do nível freático (HOLMES et al., 1992). No mapa potenciométrico da região da mina é possível inferir o sentido do fluxo hidrogeológico na área da cava e no Bota-fora 04 (Figura 14). Nas pilhas de rejeito da mina a disposição e a composição do material alocado permite a infiltração e percolação de água por dentro da pilha num contexto de sistema aquífero poroso superficial sobreposto ao solo e as rochas fraturadas.

**Figura 14** - Mapa potenciométrico de parte da área da cava da Mina Osamu Utsumi e do Bota-fora 04.



Fonte: INB.

### 3.8 Geologia

#### 3.8.1 Geologia Regional

A Mina Osamu Utsumi está inserida no contexto geológico do Planalto de Poços de Caldas que constitui uma formação geológica caracterizada por grandes intrusões de magmas alcalinos na porção meridional do Escudo Atlântico, no contexto do Maciço Meridional de Guaxupé e próximo a borda nordeste da Bacia do Paraná (FRAENKEL, 1985; TEDESCHI et al., 2015) (Figura 15). O Planalto de Poços de Caldas é descrito por Costa *et al.* (2001) como uma estrutura circular dômica marcada por cristas e falhas abruptas, além de escarpas de falhas que afetam o embasamento cristalino. Também conhecido como Complexo Alcalino de Poços de Caldas, o planalto possui cerca de 35 km de diâmetro e está localizado geograficamente na fronteira entre os Estados de São Paulo e Minas Gerais.

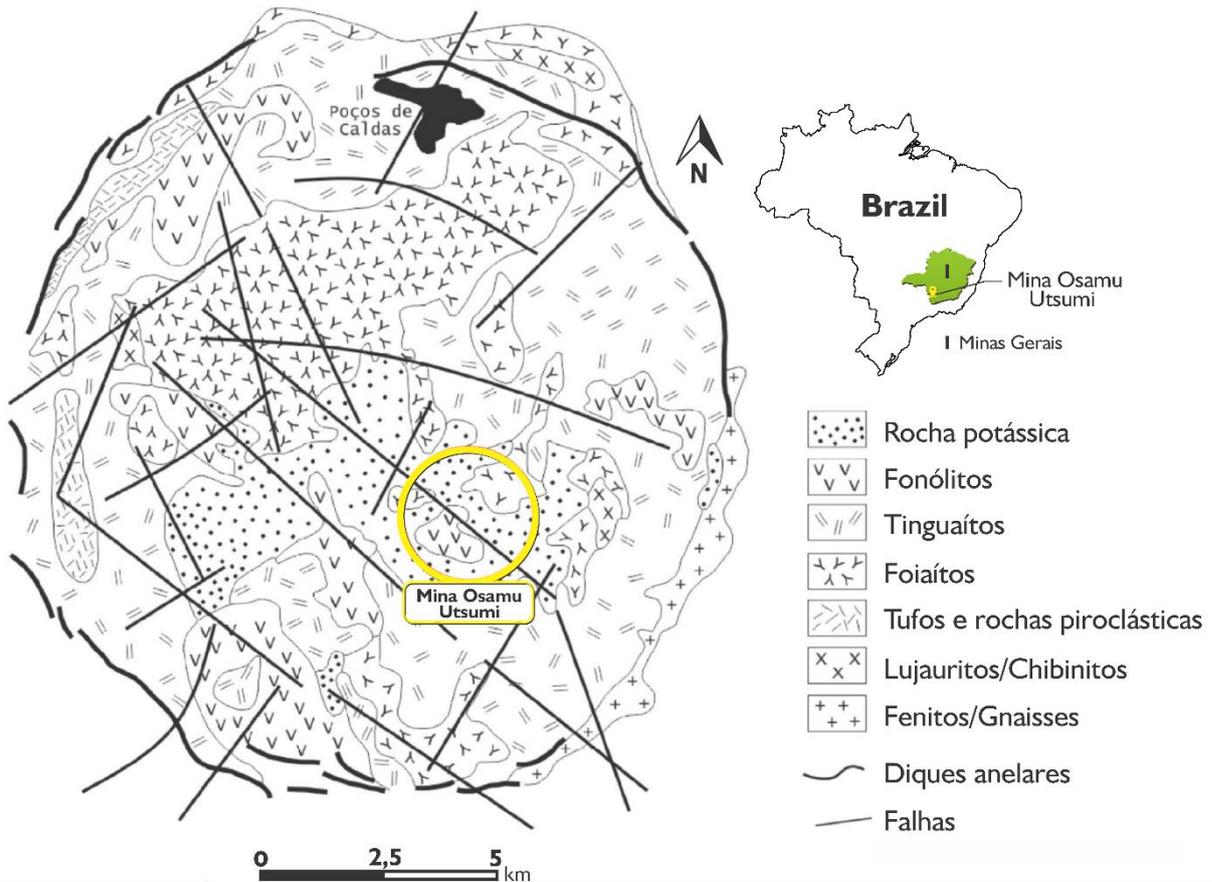
Na literatura são encontrados diversos modelos geológicos destinados a explicar a gênese e a evolução geológica do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, tais como: Ellert (1959); Almeida (1977); Ulbrich (1984); Fraenkel et al. (1985); Motoki (1988); Garda (1990); Schorscher e Shea (1992); Alves (2003). Dentre esses modelos, destaca-se o modelo proposto por Ellert (1959) conhecido por Modelo de Caldeira, que posteriormente foi apoiado pelos trabalhos de Garda (1990), Ulbrich (1984) e Fraenkel et al. (1985).

O Modelo de Caldeira propõe que a evolução geológica do maciço tenha começado com um levantamento possivelmente escalonado, marcado por falhas de blocos do embasamento cristalino, após a deposição de uma sequência sedimentar correspondente ao arenito Botucatu da Bacia do Paraná. Logo após ou ainda durante o soerguimento do embasamento é iniciada a atividade vulcânica que ocasionou a deposição de derrames de lavas ankaratríticas alternadas com camadas de brechas e tufos, segundo a alternância de fases explosivas e efusivas. Após o vulcanismo ocorre a subsidência da porção central do domo e formação da estrutura em caldeira, junto com a ascensão do magma nefelínico e a formação de tinguaiços, fonólitos e foiaços. Posteriormente são formados diques anelares, antecedidos por fendas circulares quase verticais e por fim ocorre a intrusão de foiaços (na porção norte cortando o dique anelar), lujaurito e chibinito.

Quanto a origem do Maciço Alcalino de Poços de Caldas alguns autores, como Almeida (1967) e Zalán e Oliveira (2005), sugerem que estaria relacionada com a abertura do Oceano Atlântico ou ainda com a fragmentação do supercontinente Gondwana e ativações na Placa Sul-Americana (ALMEIDA, 1986). Após o rifteamento (134-114 Ma) teria ocorrido um evento de soerguimento na crosta continental em decorrência da passagem da Placa Sul-Americana sobre uma anomalia térmica e geração de intenso magmatismo. Autores como Sadowski e Dias Neto (1981), defendem que essa anomalia térmica foi responsável pela formação de um conjunto de corpos alcalinos que se estende de Cabo Frio a Poços de Caldas (Alinhamento Sismo-Tectônico de Cabo Frio).

Por meio de dados geocronológicos Ulbrich et al (2002) chegaram a idades entre 89,3 a 54,2Ma para o maciço, ou seja, segundo os dados o processo magmático teria ocorrido num espaço de tempo de 35 Ma. Entretanto, os mesmos apontam que observações em contatos e estruturas levam a crer que esse intervalo de tempo é questionável, que o processo magmático teria ocorrido numa escala de tempo menor. Fonólitos, tinguaiços e nefelina sienitos teriam sido depositados em uma rápida sequência (1-2 Ma), por volta de 79 Ma.

Figura 15 - Mapa geológico do Planalto de Poços de Caldas.



Fonte: Adaptado de Fraenkel et al. (1985).

As rochas do maciço são reunidas em tufos, brechas e aglomerados (formado em grande parte por tinguaiços); rochas efusivas e hipoabissais (fonólitos e tinguaiços); e rochas plutônicas (foiaços) (FRAENKEL, 1985).

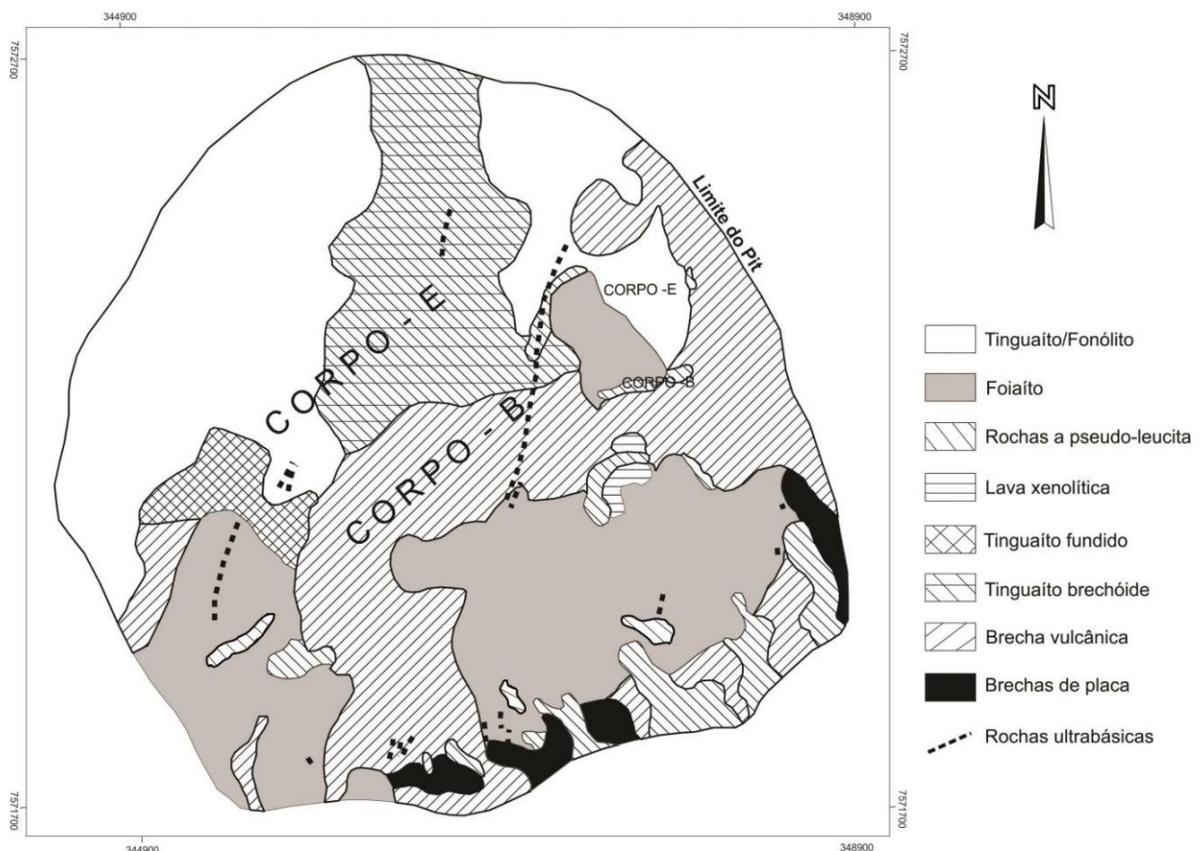
A maior parte das mineralizações presentes no Maciço Alcalino de Poços de Caldas são resultado de um intenso hidrotermalismo que originou depósitos de U, Th, K, entre outros. Essas mineralizações são estruturalmente controladas, relacionadas a estruturas circulares e falhamentos que geraram zonas de fraquezas por onde percolavam as soluções mineralizantes (ALMEIDA FILHO; PARADELLA, 1976 apud GARDA, 1990). Estes corpos estariam associados a uma chaminé de brechas presente no planalto (MAGNO JÚNIOR, 1985). Ocorreram deposições primárias e secundárias, mas de forma geral, as brechas apresentam maiores concentrações de urânio em comparação com os sienitos e fonólitos.

### 3.8.2 Geologia local

A geologia da Mina Osamu Utsumi, segundo Magno Júnior (1995) é caracterizada por uma baixa variedade petrográfica, constituída por nefelina sienitos, tinguaitos, fonólitos, foiaítos brechas e rochas ultrabásicas (Figura 16). Outros autores como Fraenkel et al. (1995) e Capovilla (2001) identificaram processos magmáticos superimpostos de alteração supérgena e hidrotermal. Franklin (2007) ainda atribui a geologia da MOU a atividades ígneas-policíclicas que juntos aos intensos processos metassomáticos e intempéricos originaram a assembleia litológica local e as mineralizações de urânio. A atividade hidrotermal local associada à formação das brechas resultou na alteração potássica e piritização dos sienitos e fonólitos e mineralizações disseminadas de pechblenda.

A geologia local é constituída por uma sequência vulcânica a subvulcânica de fonólitos e nefelina-sienitos intrudidos, além das brechas e *pipes* onde ocorrem as mineralizações de U-Th-Zr (WABER et al., 1991).

**Figura 16** - Mapa geológico com a disposição das principais litologias da cava da mina.



Fonte: Magno Júnior (1985).

O litotipo dominante na área são os nefelina-sienitos principalmente nas regiões oeste e sul da mina e são caracterizados por uma assembleia mineral constituída por Nefelina, K-feldspato e aegirina-augita, clinopiroxênios bem definidos além da baixa presença de pirita onde é frequentemente reconhecida a substituição da nefelina por ilita e caulinita. Outro litotipo comum é a variedade extrusiva do nefelina sienito denominada fonólito, que ocupa a porção norte da mina e ocorrem de diversas formas, tais como fonólitos inalterados sem pirita, alterados com poucos cristais de pirita e os muito alterados com bastante pirita (ALBERT, 2017). Ocorre ainda uma outra variedade textural de nefelina sienito, identificada na área como uma rocha leucocrática com claros sinais de alteração hidrotermal (MAGNO JÚNIOR, 1985; FRAENKEL et al., 1985).

As brechas vulcânicas são constituídas de fragmentos de fonólitos e nefelina-sienitos e ocorrem sob a forma de uma massa heterogênea de blocos cimentados e resultantes do material da última erupção. Essas brechas possuem altas concentrações de urânio quando comparadas com os outros litotipos da mina (CAPOLIVILLA, 2001). Rochas básicas presentes na área são encontradas sob a forma de diques lamprófilos de formato irregular. Eles variam de espessura e possuem trajetórias sinuosas, com direção e mergulho que não são regulares entre os diques. Esses diques constituem uma manifestação tardia (cortam todos os outros depósitos), estão intensamente alterados e formam horizontes superficiais de lateritas (MAGNO JÚNIOR, 1985; SCHORSCHER & SHEA, 1992).

Outro aspecto interessante da geologia da MOU é a presença de duas zonas de fraturamento principais de alta condutividade hidráulica, de grande percolação de água no maciço. Estas zonas são caracterizadas pelas atitudes N20E/80NW e N55W/75NE (TARGA et al., 2019). Outros estudos realizados na cava da MOU indicam um fraturamento preferencial de atitude N25E/55NW e outros menos expressivos com direção e mergulho N25E/40SE, N83W/55NE e N81E/85NW (MIYASAKI, 2014).

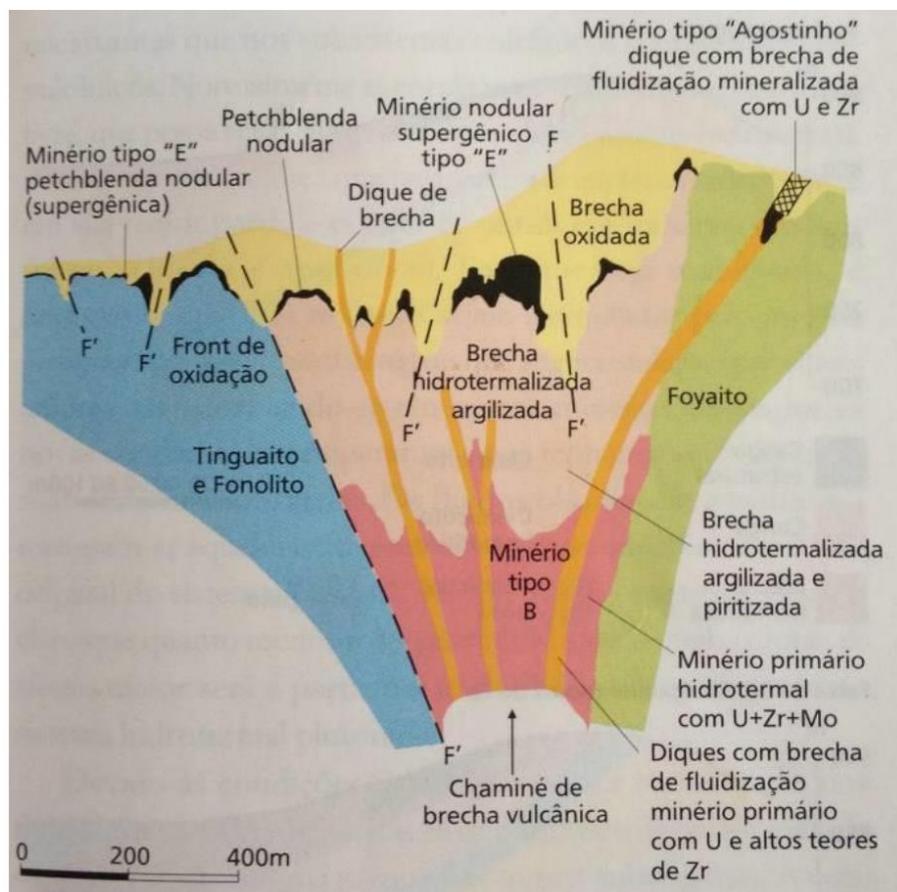
### 3.8.3 Metalogênese

As mineralizações da Mina Osamu Utsumi estão associadas a uma chaminé de brecha de formato cônico e seção horizontal ovalada, cujas dimensões em superfície é de cerca de 1.200 m x 600 m de comprimento (BIONDI, 1976). Essa chaminé foi preferencialmente preenchida por brechas tinguaiticas, que são cortadas por apófises e diques de fonólitos de tinguaitos.

Os corpos mineralizados possuem relação com as intrusões de tinguaitos e foiaítos em fonólitos encaixantes, que posteriormente passaram por processos hidrotermais pós-magmáticos. Após a intrusão dos foiaítos ocorreram eventos explosivos que causaram alterações nas rochas encaixantes que promoveu a formação de um grande pacote de brechas com diferentes padrões estruturais. A permeabilidade associada a estas rochas permitiu a percolação de fluídos hidrotermais e consequente mineralização de U-Th-Zr-ETR-F (MAGNO JÚNIOR, 1985; SCHORSCHER & SHEA, 1992; CAPOVILLA, 2001). Esse evento hidrotermal possivelmente tem uma idade limite mínima de 76 Ma pois os diques lamproíticos que transpassam as mineralizações foram datados com esta idade (SHEA, 1992; ULBRICH et al., 2002; FRANKLIN, 2007).

Durante o funcionamento da MOU foram lavrados três tipos principais de minérios, conhecidos por tipo “B”, tipo “brecha de fluidização” e o tipo “E” (BIONDI,1976) (Figura 17). O Minério tipo “B” constituía uma parte considerável das reservas, aproximadamente 60%. É classificado como disseminado, ocorria no interior do cone de brechas e sua gênese está ligada às alterações hidrotermais de brechas e lavas fonólicas/tinguaíticas.

**Figura 17** - Perfil esquemático de uma chaminé em formato de cone e as mineralizações associadas.



Fonte: Biondi (1976).

Dentre os minerais de interesse econômico ocorriam a uraninita, a molibdenita e o zircão. Os minerais remanescentes como os argilominerais e a pirita eram classificados como ganga. O minério tipo “brecha de fluidização” ocorria como diques que atravessavam toda a região da mina, com posicionamento preferencial na porção interior da chaminé de brecha. É caracterizada por fragmentos de diversos tipos de rochas que são cimentados por uma matriz de lava fonolítica e rocha pulverizada, com origem ligada a explosões e posterior percolação de gases sob forte pressão. Nesta rocha ocorrem mineralizações de uraninita, baddeleyita, zircão uranífero, pirita, galena, fluorita, esfalerita e molibdenita. Este tipo de depósito representava cerca de 10% das reservas (REYNOLDS, 1954; LORENZ et al., 1970; BURNHAN, 1985; LORENZ, 1985). Por fim, o minério tipo “E” representava os de origem supergênica. A ação da água meteórica, bem como a oxidação ocorrida em superfície atuavam no enriquecimento desses corpos mineralizados, uma vez que as rochas locais permitiam a percolação de fluídos meteóricos.

## 4. Fundamentação teórica

### 4.1 Drenagem Ácida de Mina (DAM)

A drenagem ácida de mina (DAM) é um termo atribuído ao percolado resultante da oxidação de sulfetos minerais pela exposição ao oxigênio e a água. Ela pode ocorrer sob a forma de fluxo ou de umidade presente nas pilhas de rejeito, barragens de rejeitos e rejeitos de carvão. Possui grande concentração de sólidos dissolvidos e em suspensão (como sulfato, ferro e outros metais) e pH geralmente menor que 4. A composição química dessas drenagens dependerá das rochas e minérios presentes nos locais em que ela ocorre (CASTRO; LOUREIRO, 2006). A velocidade das reações irá depender da quantidade de minerais reativos e da presença de bactérias que contribuem na formação da drenagem (GRAY, 1997).

A drenagem ácida é um fenômeno natural que ocorre há muito tempo no ambiente, uma vez que as mesmas rochas que são exploradas pelas atividades minerárias estão dispostas na natureza, muitas vezes próximas à superfície, o que permite a oxidação e interação dos minerais reativos com a água. Entretanto, as atividades de mineração intensificam este processo devido a exposição desses minerais na superfície, uma vez que aumentam a área de contato das rochas com o ar atmosférico por conta das atividades de lavra. Esses fatores aliados à maior percolação de água que ocorre no interior dos rejeitos promove a formação de quantidades de DAM muito superiores às aquelas encontradas naturalmente (SIMATE e NDLOVU, 2014).

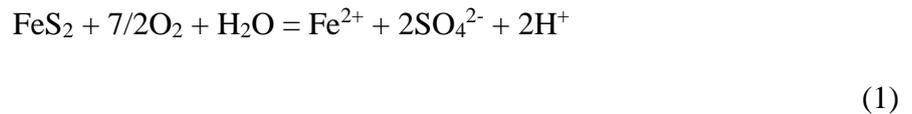
O processo de formação da DAM ocorre devido à exposição de minerais sulfetados, tais como a pirita, arsenopirita, calcopirita, entre outros, ao oxigênio e à água. Como resultado é produzido sulfato e ocorre a liberação de ácido sulfúrico, que é o responsável pelo rebaixamento do pH. Essa solução fica enriquecida em íons dissolvidos, uma vez que é capaz de lixiviar e mobilizar os elementos contidos nos minerais.

Os fatores que são determinantes na formação da DAM são o pH, a concentração de  $O_2$ , a temperatura, a área superficial do grão mineral, a atividade química do  $Fe^{3+}$ , a atividade bacteriológica e a energia de ativação química (AKCIL; KOLDAS, 2005). Outros fatores físicos como a permeabilidade e a porosidade das pilhas de disposição também influenciam na formação da drenagem, uma vez que pilhas com alta permeabilidade favorecem a entrada e oxigênio e água e, portanto, maiores taxas de reação.

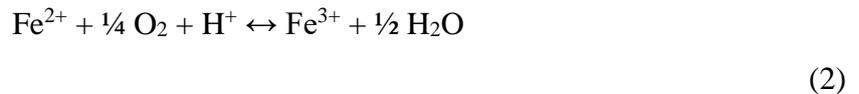
Outro fator importante na geração de drenagem ácida é a ação bacteriana, com papel significativo no processo de oxidação dos sulfetos visto que estão presentes nas pilhas de rejeito e contribuem para a aceleração da oxidação do  $Fe^{2+}$  em  $Fe^{3+}$  por processos metabólicos. Um

exemplo é a bactéria *Thiobacillus Ferrooxidans*, que costuma ocorrer em ambientes com pH inferior a 3,2 (KLEINMANN et al., 1981). A presença desses microrganismos é capaz de acelerar a formação do efluente ácido de 5 a 20 vezes (SENGUPTA, 1993).

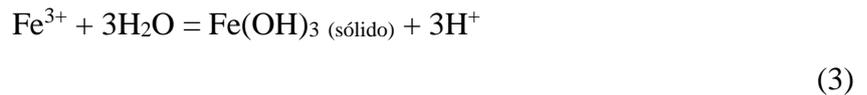
As principais reações químicas relacionadas à formação de DAM são descritas por Akcil e Koldas (2005). A primeira delas é caracterizada pela oxidação do mineral sulfetado para a forma iônica  $\text{Fe}^{2+}$ , íon sulfato e hidrogênio:



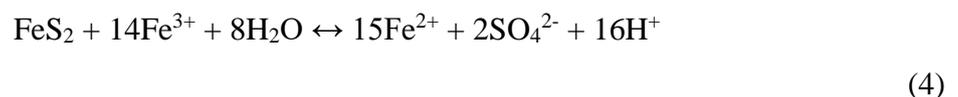
Os produtos resultantes da equação química, os íons  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{H}^+$ , promovem o aumento no total de sólidos dissolvidos, da condutividade e da acidez dos efluentes. A próxima etapa da reação, que consiste na oxidação do  $\text{Fe}^{2+}$  para  $\text{Fe}^{3+}$ , ocorrerá em ambientes com abundância de oxigênio, atividade bacteriana e pH adequados:



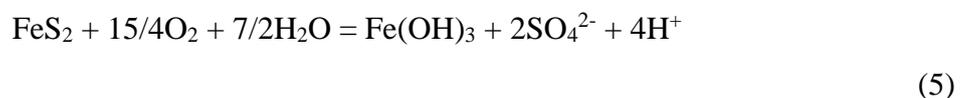
Posteriormente, quando atingido o pH de valores entre 2,3 e 3,5 o  $\text{Fe}^{3+}$  é precipitado sob a forma de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  e jarosita (um sulfato hidratado de ferro e potássio), o que promove a redução da concentração do íon férrico e a diminuição síncrona do pH.



O  $\text{Fe}^{3+}$  remanescente na solução, que não foi precipitado, estimula a oxidação do ferro ferroso o que contribui para a oxidação de mais minerais de pirita. Esta reação, associada ao ambiente ácido, pode ser entendida com uma reação auto catalítica (FANKLIN, 2007).



A geração de ácido que resulta na produção de ferro em solução que poderá ser precipitado como hidróxido, é exemplificado pela combinação das equações 1 e 3:



A disposição de rejeitos com sulfetos normalmente está ligada às minerações de carvão, ouro, cobre, zinco, urânio, chumbo e níquel, uma vez que a paragênese mineral associada a esses elementos é constituída por sulfetos (NÓBREGA, 2007). Na Tabela 2 estão descritos os principais minerais associados à formação de drenagem ácida de mina.

**Tabela 5** - Principais minerais associados à formação de DAM.

<i>Mineral</i>	<i>Composição química</i>
Arsenopirita	FeS <sub>2</sub> .FeAs
Bornita	CuFeS <sub>4</sub>
Calcocita	Cu <sub>2</sub> S
Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>
Covelita	CuS
Galena	PbS
Milerita	NiS
Molibdenita	MoS <sub>2</sub>
Pirita	FeS <sub>2</sub>
Marcassita	FeS <sub>2</sub>
Pirrotita	Fe <sub>11</sub> S <sub>12</sub>
Esfarelita	ZnS

Fonte: Fagundes (2005).

A gestão equivocada dos efluentes ácidos gerados pelo processo de DAM pode acarretar em graves problemas ambientais. Os impactos associados vão desde a esfera química, física, biológica, até a ecológica. Gray (1997) descreve algum desses efeitos: em relação ao meio químico pode ser observada um aumento da acidez dos corpos d'água bem como o incremento da concentração de metais solúveis; no meio físico pode ocorrer a modificação do substrato, alteração no padrão de sedimentação, adsorção de metais, diminuição da penetração da luz, entre outros; o meio biótico pode ser afetado pela falha no equilíbrio ácido-base nos organismos, aumento da toxicidade e alteração comportamental, respiratória e de reprodução dos organismos. Por fim, o meio ecológico é afetado pela modificação do habitat, perda de nichos e eliminação de espécies sensíveis.

#### 4.2 Hidrogeologia em pilhas de rejeito

A heterogeneidade dos materiais usualmente dispostos em pilhas de rejeito permite a infiltração e percolação de fluidos por dentro das mesmas. Desta forma, é comum que em algumas atividades mineiras ocorram problemas associados à interação dessas pilhas de

descarte com a água. O fluxo subterrâneo pode provocar zonas de *piping* e processos erosivos capazes de comprometer a estabilidade geotécnica das pilhas. Além disso, em algumas minerações a presença de minerais reativos expostos ao ar atmosférico pode ocasionar a formação de drenagem ácida de mina, uma vez em contato com água. São inúmeros os problemas decorrentes da má gestão de pilhas de rejeitos, o que faz delas elementos preocupantes no que diz respeito à geração de impactos ambientais, bem como no tocante ao fechamento de empreendimentos mineiros.

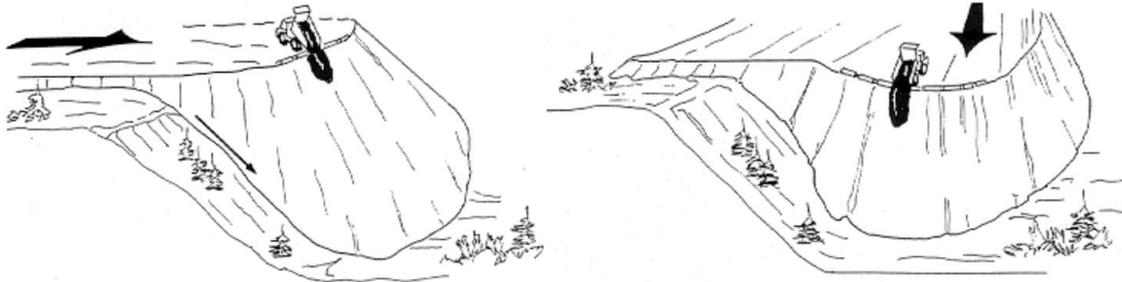
Os parâmetros hidráulicos que condicionam o comportamento do fluxo hidrogeológico são a condutividade hidráulica, que pode ser entendida como a taxa referente ao movimento de águas através de rochas porosas e solos (usado também na determinação da capacidade de drenagem do solo); a transmissividade, que nada mais é que o produto da condutividade hidráulica pela espessura vertical saturada do aquífero ( $T = K.b$ ), ou seja, a taxa de escoamento da água por uma seção vertical do aquífero; e o coeficiente de armazenamento, que é a quantidade total de água armazenada no meio, incluindo a componente pressão. Esses parâmetros permitem a caracterização do ambiente hidrogeológico (KAZAKIS et al., 2016).

Dentre os fatores que condicionam o comportamento hidrogeológico nas pilhas, o método de construção tem papel extremamente importante. Atualmente existem três métodos principais para a disposição do rejeito: o método por correia, o método por camadas e o método por bancadas (NUNES, 2014). No método por correias o material é transportado e depositado com o auxílio de uma correia transportadora, desta forma, o lançamento do rejeito é feito de forma mais eficiente com um equipamento (*spreader*) para a formação das pilhas por bancos (SAMARCO, 2010). No método por camadas são utilizados caminhões para o transporte do rejeito. O material é disposto numa plataforma aberta por basculamento por meio de pilhas de formato cônico, que posteriormente serão nivelados por um trator para a formação de camadas de espessura uniforme para a criação de espaço para uma nova deposição. Esse procedimento se repete até que a altura final da pilha seja alcançada. Por fim, no método de construção por bancadas, também conhecido como “ponta de aterro”, também são utilizados caminhões para o transporte do material, mas diferentemente do método anterior, o material é basculado na ponta da plataforma de trabalho (também conhecida como “crista”) e o avanço do aterro segue o ângulo de repouso do material (Figura 18). Este último método foi o utilizado para a construção do Bota-fora 4 na Mina Osamu Utsumi.

No método de ponta de aterro a distribuição granulométrica do material ao longo da pilha é em função da gravidade, que age na seleção das partículas com a disposição dos

fragmentos grossos na base e os mais finos no topo e favorece a entrada e percolação de ar atmosférico e água dentro da pilha.

**Figura 18** - Esquema de deposição tipo ponta de aterro (*end-dumping*).

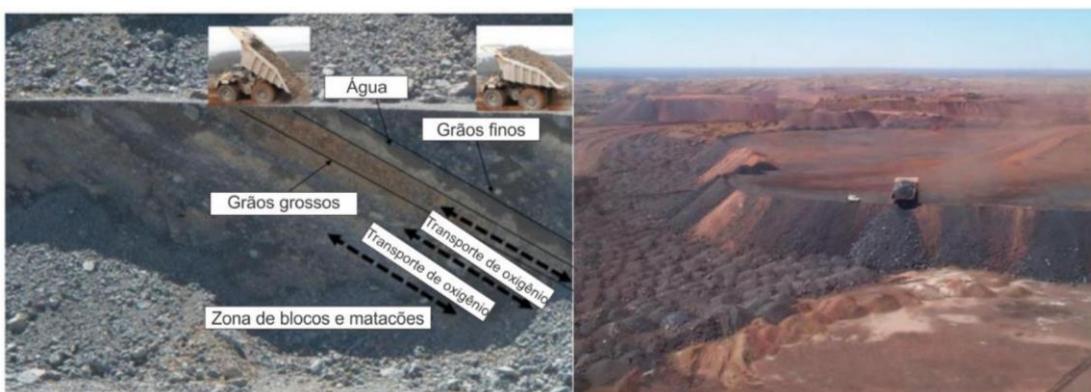


Fonte: Oliveira Filho (2010).

Uma vez que o rejeito é depositado a partir do topo do talude, ocorre também a criação de estratificações inclinadas (Figura 19). Outro fator importante é a constante movimentação de caminhões e maquinários pesados sobre a pilha que acabam por promover a compactação superficial do material de descarte.

Essa compactação superficial age como uma barreira capilar que ao mesmo tempo dificulta a infiltração de fluídos na pilha e promove o aumento da capacidade de retenção de água na mesma, fatores que contribuem ao aumento do grau de saturação (FALA et al., 2005; DAWOOD; AUBERTIN, 2009; AMOS et al., 2015).

**Figura 19** - Arranjo das frações granulométricas segundo o método ponta de aterro.



Fonte: Pearce et al. (2016).

#### 4.3 Descomissionamento e preservação ambiental

A origem do termo descomissionamento advém de uma exigência legal utilizada para instalações nucleares (LIMA, 2002). Posteriormente o termo passou a contemplar as atividades

ligadas à indústria do urânio e por fim passou a abranger as atividades minerárias (LIMA; WATHERN, 1999). Na indústria nuclear o termo descomissionamento faz contraposição ao comissionamento, ao passo que este último significa a autorização para funcionamento. Amplamente empregado na mineração, o termo faz referência ao conjunto de atividades necessárias para minimizar, mitigar, anular os diversos impactos ambientais causados por empreendimentos mineiros. Ele tem por objetivo devolver à sociedade a área explorada de forma que ali possam ser destinados novos usos produtivos ao local (LUZ; DAMASCENO, 1996). Este processo usualmente compreende o período entre o encerramento das atividades e o fechamento definitivo da mina.

Em termos jurídicos, a Constituição Federal de 1988 determina que a recuperação dos danos ambientais originados pelas atividades mineiras é de responsabilidade de quem explorar os bens minerais. Essa recuperação faz referência à reabilitação do local de forma a torna-lo produtivo novamente para outras finalidades. No caso das minerações de urânio no Brasil, como estas são monopólio do Estado, a responsabilidade fiscalizatória é da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), que atua junto ao Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA) na fiscalização das etapas para o encerramento das atividades. Esse período de desativação das atividades consiste no mais crítico dos empreendimentos, uma vez que não há interesse econômico envolvido (TEIXEIRA E MACHADO, 2012).

## 5. Materiais e métodos

### 5.1 Métodos Geométricos e meio ambiente

Os usos da geofísica são diversos e contemplam áreas como a pesquisa e prospecção mineral, geotecnia, monitoramento de barragens, estudo de águas subterrâneas, estudo de contaminantes entre outros. Esta versatilidade é devido às características não invasivas dos métodos usualmente empregados. Além de possuírem um baixo custo operacional, são métodos versáteis capazes de abranger uma grande malha amostral, muitas vezes com riqueza de detalhes.

Dentre os métodos geofísicos, os métodos geométricos constituem um importante instrumento para estudos de cunho ambiental, tais como poluição por hidrocarbonetos, vazamento de combustíveis em postos de gasolina e afins, o estudo de necrochorume associado a cemitérios, poluição do solo por fertilizantes como a vinhaça, formação de drenagem ácida de mina em ambientes de mineração dentre muito outros (PORCIÚNCULA, 2016).

Dentre os principais métodos geométricos estão presentes a Eletroresistividade (ER), a Polarização Induzida (IP) e o Potencial Espontâneo (SP). A escolha do método a ser empregado dependerá das propriedades físico-químicas do objeto de estudo, das características geológicas do meio estudado, do tamanho da área da pesquisa entre outros fatores. Cada material terá uma resposta e sensibilidade diferente aos parâmetros físicos utilizados pelos métodos.

Devido a isto, para este trabalho foram escolhidos os métodos da Eletroresistividade (ER) para medidas de resistividade elétrica e da Polarização Induzida (IP) para medidas de cargabilidade. Estudos como Power et al. (2018), Casagrande (2019) e Targa (2020) demonstraram a efetividade da utilização da Eletroresistividade na caracterização de fluxos hidrogeológicos em meio poroso e na identificação de efluentes ácidos salinos relacionados à formação de DAM. Nestes estudos houve também a utilização do método da Polarização Induzida no levantamento de zonas mineralizadas com sulfetos disseminados. Os métodos e técnicas utilizados, bem como o processo de aquisição de dados e o processamento dos mesmos são explicados a seguir.

#### 5.1.1 Método da Eletroresistividade (ER)

A Eletroresistividade (ER) é um método geométrico baseado na mensuração da *resistividade elétrica* ( $\rho$ ) (em ohms-metro), um parâmetro físico presente nos diferentes tipos

de materiais e que pode ser traduzida como a dificuldade que um corpo oferece à passagem de uma corrente elétrica. Cada material possuirá um valor específico de resistividade, o que permite o contraste de propriedades no qual a geofísica se baseia. Essa quantificação é feita por meio da diferença de potencial (ddp), para isto é feito um aterramento galvânico e posteriormente é injetada uma corrente elétrica no solo em superfície (KEAREY, 2002). A diferença entre os valores de ddp de cada material, uma vez dispostos nos modelos de inversão 2D, permite a distinção entre as estruturas e materiais em subsuperfície.

Segundo a Lei de Ohm, a resistência elétrica também pode ser entendida como a razão entre a *diferença de potencial* ( $V$ ) e a *corrente elétrica* ( $I$ ):

$$R(\Omega) = \frac{V (V)}{I (A)} \quad (6)$$

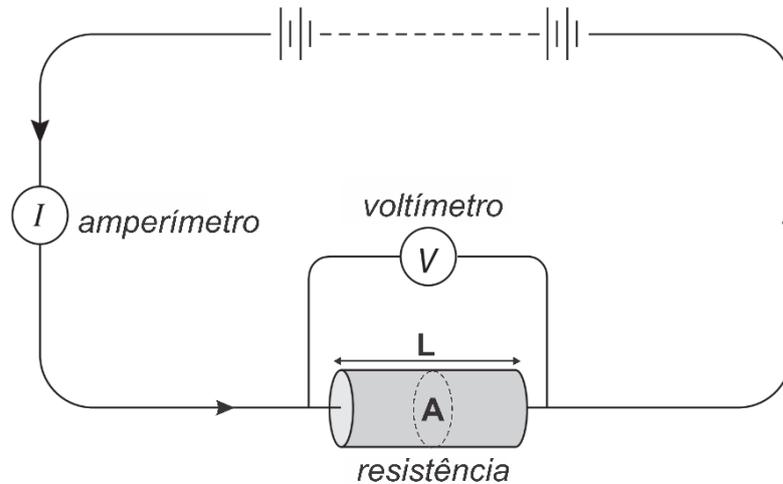
A resistência será proporcional ao comprimento do corpo ( $L$ ) e inversamente proporcional à área ( $A$ ) do mesmo, ou seja, irá variar de acordo com o formato e o tipo de material (Figura 20). A resistividade elétrica verdadeira ( $\rho$ ) é a constante que relaciona a proporcionalidade na equação:

$$R (\Omega) = \rho \frac{L (m)}{A (m^2)} \quad (7)$$

A resistividade elétrica é obtida a partir da combinação entre as duas primeiras equações, ou seja, através do produto entre a resistência ( $\Omega$ ) e a distância ( $m$ ). A unidade de medida no sistema internacional é tida como ohm-metro ( $\Omega.m$ ).

$$\rho (\Omega. m) = \frac{V (V) A (m^2)}{I (A) L (m)} \quad (8)$$

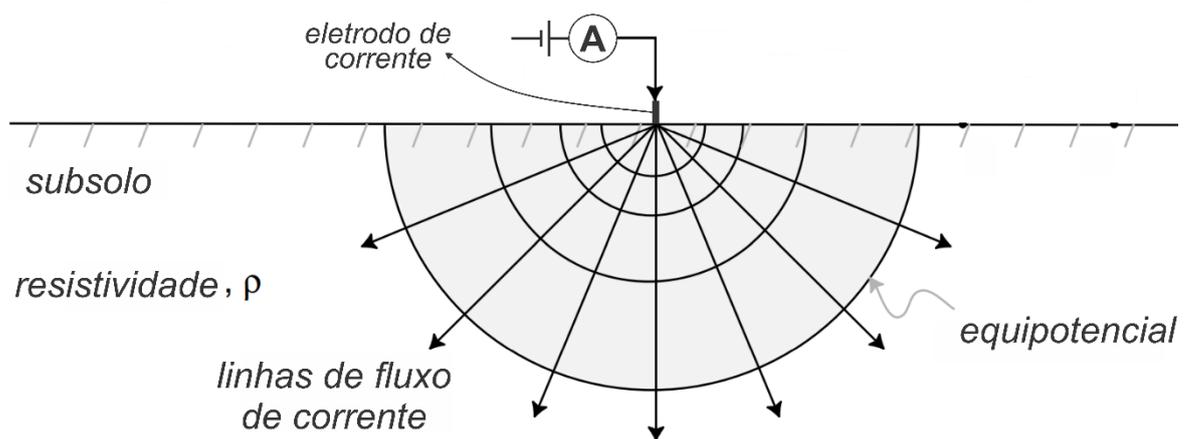
**Figura 20** - Relação entre a resistividade e a resistência.



Fonte: adaptado de Musset & Khan (2000).

Entretanto, em ambientes geológicos a corrente não irá percorrer apenas um único caminho, como na figura anterior. Ao assumir que o solo possui uma resistividade uniforme e conectar uma bateria no solo por meio de cabos e eletrodos, o substrato irá conduzir a corrente elétrica produzida pela bateria, uma vez que o mesmo não é um isolante perfeito (Figura 21).

**Figura 21** - Potencial no semi-espço.



Fonte: Adaptado de Everett (2013).

Ao aplicar a Lei de Ohm no semi-espço é obtido:

$$R = \frac{\rho \cdot r}{2\pi \cdot r^2} = \frac{\rho}{2\pi \cdot r} \quad (9)$$

E ao substituir  $V = R.I$  é obtido:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (10)$$

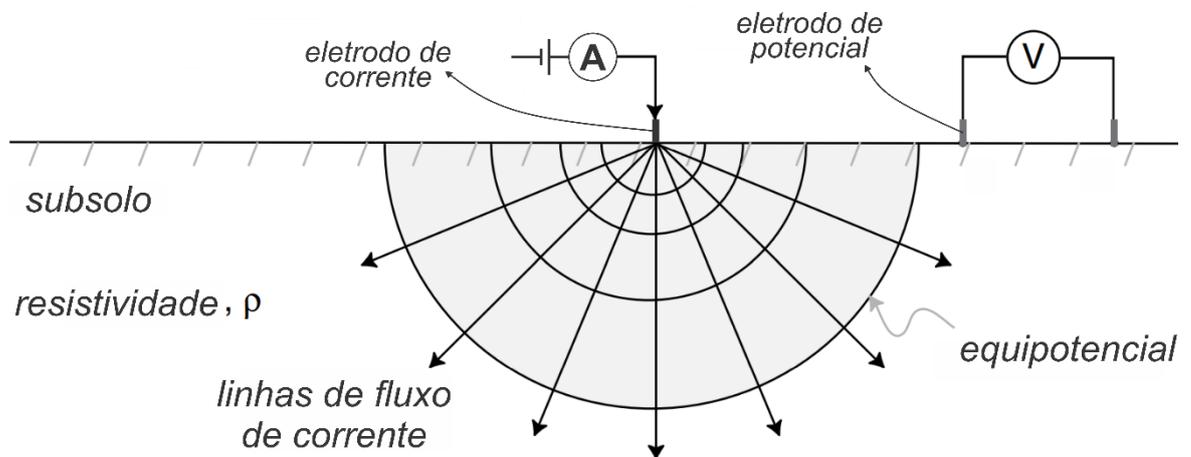
Portanto, ao considerar que o subsolo possui uma resistividade constante é possível mensurar a resistividade presente:

$$\rho = \frac{2\pi r V}{I} \quad (11)$$

Onde:  $\rho$  = resistividade;  $r$  = distância entre o local em que ocorre a medição do potencial e o eletrodo de corrente; e  $V$  = o potencial elétrico de determinado ponto.

Contudo, ao realizar uma pesquisa, apenas uma única medida de potencial elétrico não seria o suficiente para obter informações confiáveis do subsolo. Desta forma, para medida da diferença de potencial (*ddp*) é preciso inserir ao menos dois eletrodos, como na Figura 22, dispostos distantes entre si e da fonte elétrica (MILSON, 2003). É possível mensurar a intensidade de corrente ( $I$ ) ao conectar um eletrodo de corrente a uma bateria. Ao conectar dois eletrodos a um voltímetro, um próximo à corrente e outro distante, é possível medir a diferença de potencial entre os dois.

**Figura 22** - Diferença de potencial (*ddp*) medida por dois eletrodos posicionados em pontos diferentes.

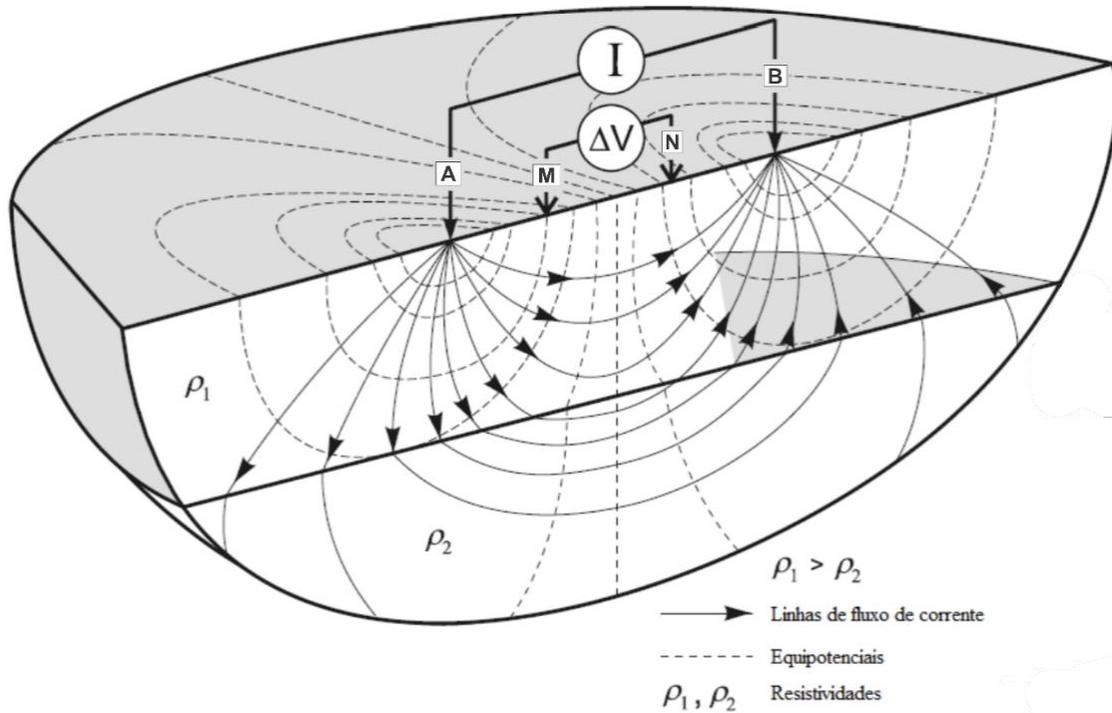


Fonte: Adaptado de Everett (2013).

No entanto, é comum que na prática seja utilizado um sistema com quatro eletrodos, dois eletrodos com a função de injeção de corrente elétrica no subsolo (eletrodos de corrente) e

outros dois que fazem a leitura da diferença de potencial (eletrodos de aquisição). Este sistema é conhecido como AMNB, representado na Figura 23.

**Figura 23** - Eletrodos posicionados segundo a configuração AMNB.



Fonte: Seidel e Lange (2007).

### *Resistividade aparente*

A resistividade de um meio isotrópico e homogêneo pode ser definida através da última equação apresentada, contudo, a realidade do subsolo difere desta apresentada. O substrato, via de regra, apresenta características heterogêneas pois é normalmente composto por materiais de características físicas e químicas diferentes. Justamente essa distinção entre as características que baseia os estudos geofísicos, uma vez que em decorrência do contraste entre as propriedades é possível inferir diversas estruturas e materiais presentes no subsolo.

O termo resistividade aparente pode ser entendido como a resistividade elétrica presente em um meio homogêneo, que ao ser substituída em um meio heterogêneo, ocasionaria reações elétricas idênticas àquelas encontradas com o mesmo posicionamento dos eletrodos. Em outras palavras, é a resistividade média de um conjunto de rochas e solo, a resistividade que o subsolo teria se fosse homogêneo. Ela traduz apenas as propriedades médias do local por onde a corrente elétrica fluiu, desta forma, não representa a resistividade verdadeira.

A resistividade aparente pode ser representada pela seguinte fórmula:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (11)$$

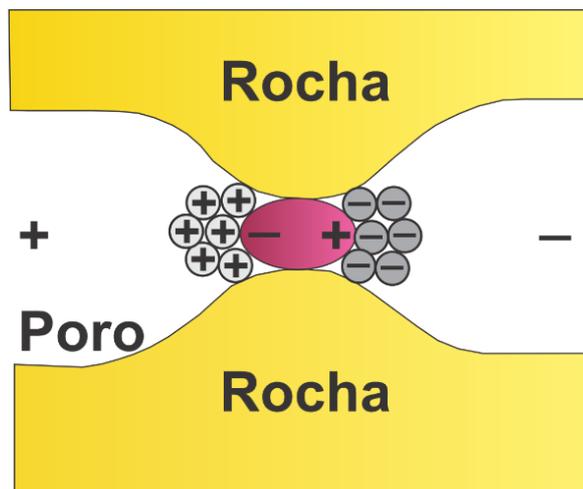
### 5.1.2 Método da Polarização Induzida (IP)

A Polarização Induzida (IP) pode ser entendida como um fenômeno elétrico observado em materiais naturais estimulado por uma corrente elétrica que tem uma resposta retardada à voltagem (SUMNER, 1976). Em outras palavras, quando uma corrente elétrica é injetada no subsolo ocorre a concentração de carga nos diversos materiais presentes no meio e quando esta corrente é interrompida a carga em questão tende a retornar para sua posição original de equilíbrio. Entretanto, o campo elétrico gerado não desaparece imediatamente e por alguns segundos uma porção da voltagem inicial fica conservada no meio e depois dissipada gradualmente. Esta relação é conhecida por Polarização Induzida ou residual. Este fenômeno costuma ocorrer em rochas que possuem minerais metálicos disseminados, ou ainda, em minerais em que ocorrem trocas iônicas (TELFORD, 1990).

Quando ocorrem minerais metálicos associados, a diferença entre as condutividades eletrônica e eletrolítica originam o fenômeno da polarização de eletrodo (Figura 24). Neste tipo de polarização em que o fluxo da corrente é parcialmente eletrolítico e parcialmente eletrônico, ocorre uma reação química entre a solução e o mineral. São as partículas minerais metálicas que bloqueiam os poros neste tipo fenômeno, desta forma, ocorre um acúmulo de íons no eletrólito em cada uma das faces com sinais opostos. Quando a corrente é interrompida a voltagem externa mantém o acúmulo de íons por um tempo, que voltam gradualmente às suas posições de equilíbrio originais. Os minerais condutores eletrônicos, tal como a grande parcela dos sulfetos, apresentam polarização de eletrodo.

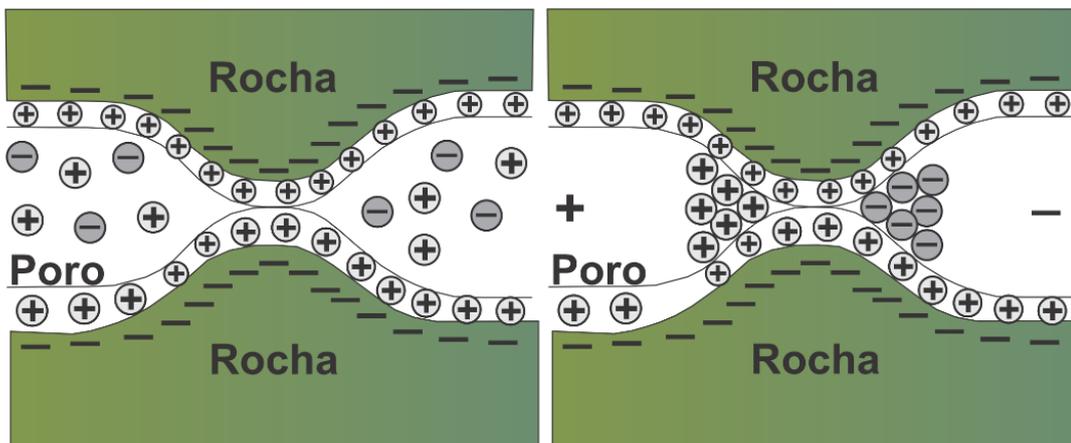
Quando não ocorre a presença de minerais metálicos (ou ocorrem em pouca quantidade), normalmente ocorre a polarização de membrana (Figura 25). Neste tipo de polarização, característico de rochas carentes de substâncias metálicas, predomina a condução eletrolítica, que é o único meio de condução quando a frequência é baixa e os metais não estão presentes. Grande parte dos minerais (argilas especialmente) possuem uma rede de cargas negativas.

**Figura 24** - Polarização de eletrodo. As cargas se acumulam ao entorno das partículas de minerais metálicos que bloqueiam os poros da rocha quando a corrente é ligada. Quando desligada, as cargas tendem a voltar ao seu estado inicial o que ocasiona o decaimento da



Fonte: Adaptado de Telford et al. (1990).

**Figura 25** - Polarização de membrana. Em uma rocha com minerais de argila as cargas positivas e negativas são combinadas e formam uma dupla camada (figura da esquerda). Quando uma corrente é ligada os íons livres tendem a ir no sentido dos polos opostos, entretant



Fonte: Adaptado de Telford et al. (1990).

Isso faz com que as cargas positivas sejam atraídas e as negativas repelidas, o que promove a concentração de cargas positivas. Com a passagem de uma corrente elétrica contínua os íons negativos tendem a concentrar de um lado e os cátions formam uma nuvem difusa do outro (também conhecida como camada dupla). Este arranjo polarizado dos íons dificulta a passagem da corrente e quando a corrente é interrompida, os íons retornam gradualmente às suas posições de equilíbrio naturais.

A Polarização Induzida pode ser medida de duas formas, pelo domínio tempo ou pelo domínio frequência. No domínio tempo o decaimento da voltagem é descrito como uma curva

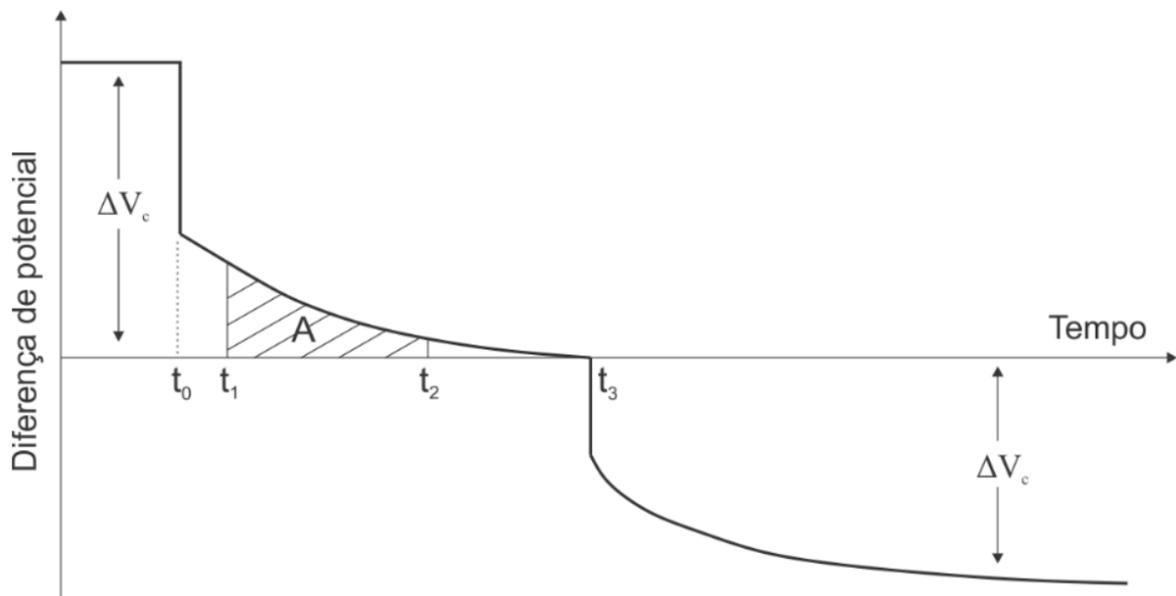
em função do tempo. No domínio frequência a medição com o auxílio da resistividade aparente, por meio de duas ou mais frequências baixas (normalmente abaixo de 10 Hz).

No domínio tempo, utilizado neste trabalho, a medição consiste em observar o decaimento temporal da tensão gerada por uma corrente elétrica contínua após o desligamento da mesma (Figura 26). Quando encerrada a corrente, a voltagem gerada não decai instantaneamente a zero, mas sim possui uma queda brusca logo após o desligamento seguido de um decaimento gradual. Desta forma, uma maneira de medir a polarização induzida neste caso é verificar a razão entre a voltagem primária ( $V_{\text{primária}}$ ), quando a mesma já atingiu seu máximo está estabilizada, com a voltagem residual ( $V_{\text{residual}}$ ) após o encerramento da corrente elétrica, antes está decaia ao nível de ruído. O parâmetro associado é a Polarizabilidade Aparente  $P_a$  (REYNOLDS, 1997).

$$P_a (\%) = \frac{V_{\text{residual}}}{V_{\text{primária}}} 100 \quad (12)$$

Uma vez que  $V_{\text{residual}}$  possui uma grandeza muito inferior a  $V_{\text{primária}}$ , a razão entre as duas deve ser expressa como milivolt (mV) por volt (V), ou ainda, como na equação mostrada, em porcentagem.

**Figura 26** - Tensão causada pela passagem de uma corrente elétrica e seu comportamento após encerrada a corrente.



Fonte: Kearey et al. (2002)

O parâmetro normalmente empregado no IP domínio tempo é a cargabilidade (M), que é definida através da análise da curva de descarga segundo um intervalo de tempo, como mostra a equação a seguir (TELFORD et al., 1990).

$$M = \frac{1}{V_0 (t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad \left( \frac{mV}{V} \right) \quad (13)$$

No domínio frequência a medição é utilizada como princípio a alteração da resistividade aparente com a frequência. Neste método são utilizadas pelo menos duas frequências diferentes menores que 10 Hz (HALLOF, 1964). Isto ocorre, pois, ao utilizar frequências altas a voltagem transiente aumenta de forma muito rápida, o que resulta numa voltagem residual muito baixa. Com frequências baixas o tempo para aumento da voltagem transiente é maior, de forma a aumentar a voltagem residual.

## 5.2 Técnicas de aquisição de dados

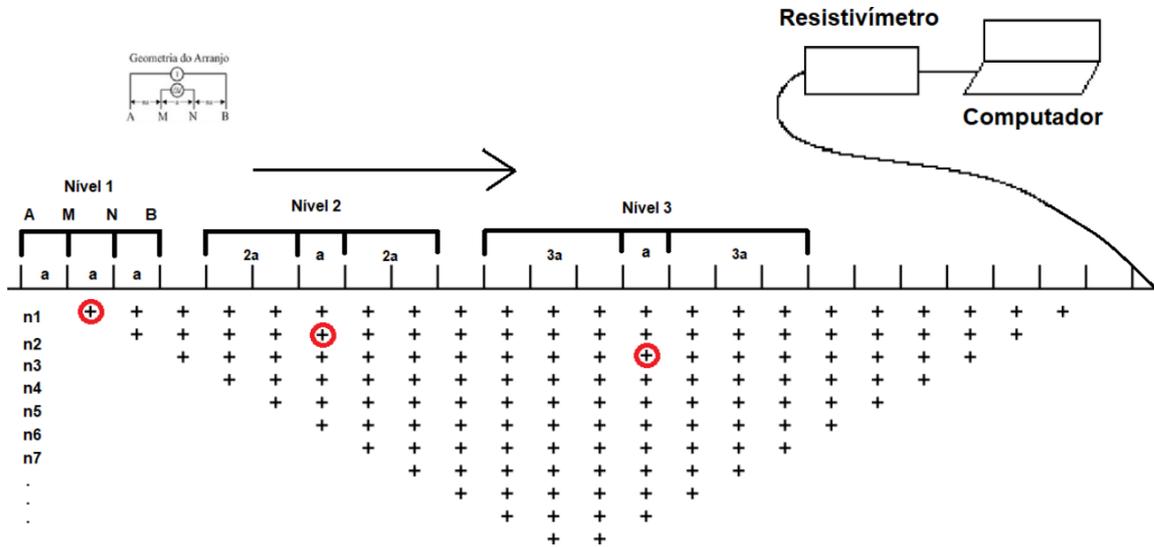
As técnicas atualmente mais utilizadas para a aquisição de dados de Eletrorresistividade e Polarização Induzida é a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) (Vertical Electrical Sounding - VES) e a Tomografia Elétrica (TE) (Electrical Resistivity Tomography – ERT). A escolha de uma ou de outra normalmente depende dos objetivos estabelecidos para a pesquisa bem como das características geológicas presentes no meio.

Para a pesquisa de zonas de contaminação e estudos hidrogeológicos por meio de dados de resistividade e cargabilidade, a Tomografia Elétrica possui um destaque especial, uma vez que permite a interpretação dos dados obtidos segundo uma variação lateral. Esta técnica também pode ser chamada de Imageamento Elétrico (IE) ou Caminhamento Elétrico (CE). Ela é uma técnica utilizada para estudos geofísicos de pouca profundidade que requerem uma variação dos parâmetros tanto lateral quanto vertical.

Esta técnica permite a utilização de diversos arranjos tais como polo-dipolo, dipolo-dipolo, gradiente, Wenner e Schlumberger, este último utilizado neste trabalho (Figura 27). Nela, a direção da linha de aquisição tem que permanecer a mesma durante o levantamento e o centro do arranjo irá variar lateralmente (KEAREY et al., 2002). No levantamento, vários eletrodos são colocados ao longo de um caminho retilíneo e conectados ao equipamento

(resistivímetro) por cabos. Então, o equipamento realiza várias configurações de quatro eletrodos para realizar as medidas.

**Figura 27** - Técnica de tomografia elétrica segundo o arranjo Schlumberger.



Fonte: Geotomo (2003).

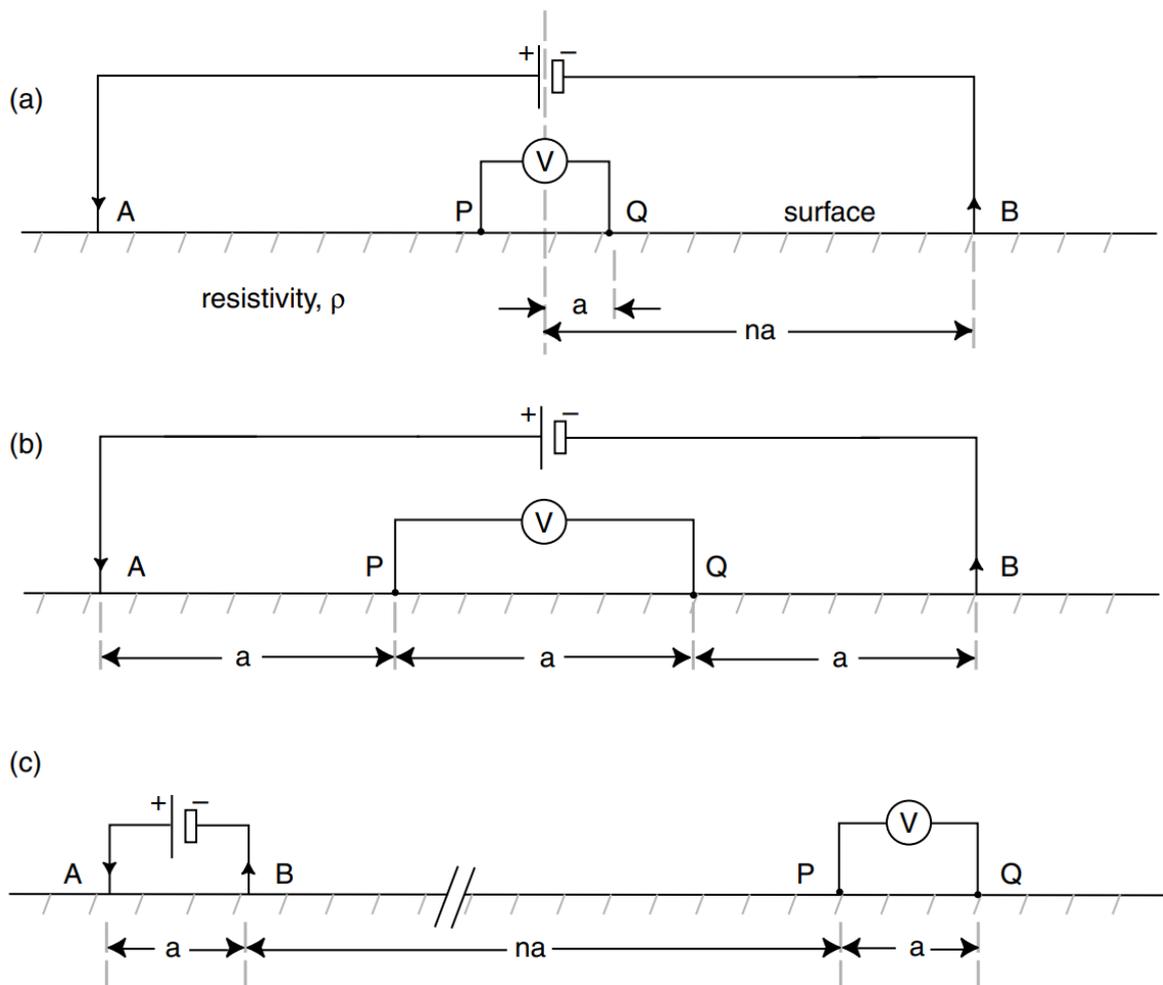
O processamento dos dados obtidos em campo resulta em um modelo de inversão, que nada mais é que um perfil bidimensional (2D) que reúne os valores dos parâmetros analisados (no caso deste trabalho a resistividade e a cargabilidade) segundo uma variação lateral e de profundidade real. Por fim, a geometria dos eletrodos utilizados em campo terá influência nos valores de resistividade e cargabilidade aparentes.

### 5.2.1 Arranjo de eletrodos

O arranjo pode ser definido como a configuração em que os eletrodos de corrente e os eletrodos de potencial são posicionados nos ensaios geoeletricos (EVERETT, 2013). Ou seja, a geometria em que os eletrodos são dispostos em superfície. Cada um dos arranjos possuirá vantagens e desvantagens, bem como peculiaridades próprias. No Brasil, os mais utilizados são Wenner, Dipolo-Dipolo e Schlumberger, este último utilizado neste trabalho. É interessante ressaltar que a escolha do arranjo irá depender das características do trabalho, tais quais o espaço em que será realizado o levantamento, o detalhe de informações, a profundidade e a magnitude da pesquisa. Ainda, o fator geométrico (K) dos eletrodos irá influenciar diretamente nos resultados obtidos.

O arranjo Schlumberger é caracterizado por uma configuração tetraédrica disposta de forma simétrica e alinhada a um ponto central (MUSSET; KHAN, 2000) (Figura 28). Nela, os eletrodos A e B, de corrente, são posicionados na porção externa do arranjo, enquanto que os eletrodos M e N, de potencial, são dispostos na parte interna. Neste arranjo, os eletrodos A e B colocados a uma distância  $a$  um do outro, enquanto que os eletrodos M e N ficam a uma distância  $b$ . Para aumentar a profundidade de aquisição é necessário aumentar a distância  $a$  ao mesmo tempo que se preserva a distância  $b$  entre os eletrodos de potencial.

**Figura 28** - Configurações tradicionais com quatro eletrodos. A) Schlumberger; B) Wenner; C) dipole-dipole.



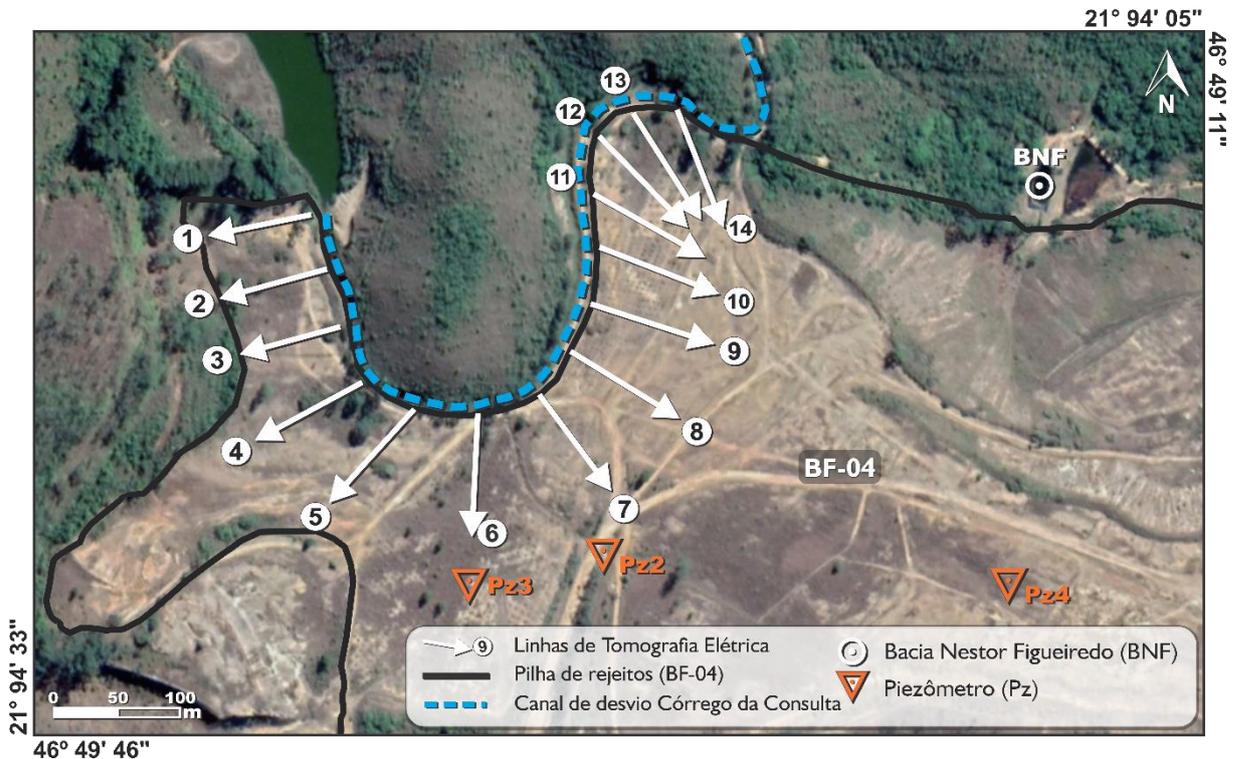
Fonte: Everett (2013).

Uma das vantagens do arranjo Schlumberger é facilidade na operação, uma vez que apenas os eletrodos A e B são deslocados. Além disso, os dados obtidos possuem menos interferência de ruídos originados por fontes artificiais são menos susceptíveis a interpretações errôneas decorrentes de terrenos não homogêneos, uma vez que os parâmetros físicos medidos apresentam leituras menos sujeitas a variações laterais e à irregularidade topográfica.

### 5.3 Aquisição dos dados

A aquisição dos dados geoeletricos foi realizada nos primeiros dias de março de 2021, próximo ao final do período chuvoso na região da Mina Osamu Utsumi. Foram montadas 14 linhas de aquisição dispostas de tal forma a cobrir toda a área em que o canal de desvio córrego da Consulta interage diretamente com a pilha de rejeito (Figura 29). As linhas foram posicionadas de forma radial ao curso do canal.

**Figura 29** - Mapa da área de estudo com a localização das linhas de tomografia elétrica.



As três primeiras linhas tiveram um comprimento de 80 metros, em decorrência da limitação de espaço entre os maciços rochosos, com uma resolução em profundidade de cerca de 16 metros. As demais foram montadas com aproximadamente 100 metros de comprimento e alcançaram valores de cerca de 20 metros de profundidade. Esses valores de profundidades foram pensados de forma a contemplar na pesquisa tanto a porção de rejeito, que apresenta pouca espessura próximo ao início da linha, ou seja, próxima ao canal de desvio, quanto o maciço rochoso sotoposto à pilha.

Os eletrodos contaram com um espaçamento de aproximadamente 5 metros entre si. Foram escolhidos os do tipo cerâmica não-polarizável e solução de sulfato de cobre. Os parâmetros físicos medidos, resistividade e cargabilidade, seguiram a técnica de tomografia elétrica dispostos segundo o arranjo Schlumberger.

O processo manual de montagem das linhas consistiu em estender os cabos de aquisição segundo o comprimento pré-estabelecido, abrir pequenos buracos com uma enxada para colocar os eletrodos, prender os eletrodos ao cabo por meio de garras metálicas, preencher os mesmos com a solução de sulfato de cobre, molhar o entorno dos eletrodos com água, a fim de facilitar o contato entre o eletrodo e o solo e por fim fazer a leitura com o auxílio do equipamento.

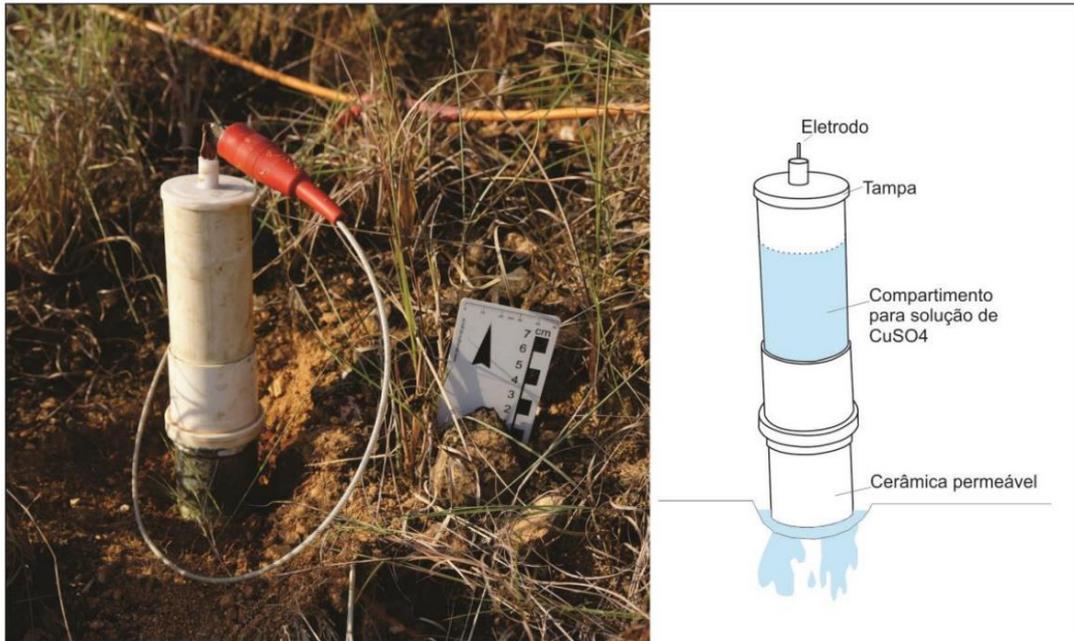
O equipamento em questão foi um resistivímetro *Terrameter LS* da ABEM de fabricação sueca (Figura 30). Por meio dele é possível fazer aquisições automáticas, segundo prévia configuração, e o mesmo conta com uma potência de 250 W, resolução de 1  $\mu\text{V}$  e uma corrente máxima de 2,5 A. Para o funcionamento do equipamento foi acoplada uma bateria ao mesmo.

**Figura 30** - Na imagem à direita o resistivímetro Terrameter. Na imagem à esquerda o eletrodo de cerâmica montado para a aquisição de dados.



Os eletrodos utilizados são constituídos de material do tipo PVC em formato de tubo e com uma base de cerâmica permeável, de forma a permitir a passagem do sulfato de cobre, que é colocado em seu interior, para o solo (Figura 31). O sulfato de cobre é utilizado para o levantamento dos dados de IP. Sua interação com o eletrodo de cobre presente no interior do tubo de PVC faz com que não ocorra polarização do eletrodo e que, devido a vazão da solução para o solo, a capacidade de transmissão de corrente seja aumentada, mesmo em ambientes de alta resistividade.

**Figura 31** - Esquema das características e funcionamento do eletrodo de cerâmica.



Fonte: Casagrande (2019).

#### 5.4 Processamento dos dados

A etapa seguinte à aquisição de dados é o tratamento e processamento dos mesmos, a fim de que sejam obtidos modelos cujos valores representam o mais precisamente possível a realidade do substrato. Com a técnica de tomografia elétrica foram coletados dados de resistividade e de cargabilidade dispostos até então como pseudoseções, ou seja, traduzem de forma aproximada as estruturas e características do meio. Através do processamento esses dados são transformados em seções cujos valores representam com mais fidedignidade as particularidades do subsolo. Para isto, são utilizadas técnicas matemáticas e tratamentos estatísticos, por meio de *softwares* específicos, a fim de minimizar os valores extremos e eliminar os dados anômalos. Uma dessas técnicas é conhecida como Modelo de Inversão.

Os softwares utilizados para o processamento dos dados foram o Res2Dinv (2D) versão 3.53 (Geotomo *Software*) e o Oasis Montaj (Geosoft). O primeiro para os modelos de inversão 2D e o segundo para os modelos 3D.

Os modelos de inversão são dispostos em seções cujos valores dos parâmetros medidos são dispostos conforme as variáveis profundidade e distância e convertidos segundo uma escala gráfica em razão logarítmica (MOREIRA et al., 2016). No processo de inversão os dados obtidos são ajustados por meio de parâmetros geométricos tal qual o espaçamento dos eletrodos e o arranjo escolhido. Ocorre então a suavização dos dados por meio do modelo matemático do

mínimos quadrados a fim de reduzir as diferenças entre os valores medidos em campo e os calculados pelo *software*.

No processamento ocorre a divisão do substrato em blocos retangulares (modelo de blocos) segundo um modelo bidimensional teórico criado automaticamente pelo *software*. O tamanho dos blocos e a disposição dos mesmos é feita pelo próprio programa a partir da distribuição de pontos de dados como guia aproximado (LOKE, 2001). É a partir desse modelo de blocos que a resistividade aparente e a cargabilidade são calculados, por meio da comparação entre os valores medidos e os modelados. Os parâmetros associados aos blocos são ajustados iterativamente de forma que o valor aparente calculado seja concordante aos medidos no campo (TARGA, 2019). O produto final são os modelos de inversão segundo o parâmetro definido em formato de pseudoseções. O erro medido quadrático (*Root-mean-squared* – RMS) é o erro decorrente da iteração dos dados (GEOTOMO, 2003).

Para os modelos 3D o processamento utiliza o método da krigagem. Para isto, os dados são carregados na plataforma *Oasis Montaj* (*Geosoft*) por meio de planilhas para a krigagem. Posteriormente ocorre a suavização dos valores centrais em relação às extremidades por meio da mínima curvatura. Então, são estabelecidos diferentes blocos através de critérios estatísticos e da malha amostral escolhida, para cada ponto do modelo 3D final, o que possibilita a criação de mapas de profundidade.

## 6. Resultados e discussões

### 6.1 Modelagem 2D

O processamento dos dados geofísicos resultou em 28 modelos de inversão: 14 seções de resistividade elétrica e 14 seções de cargabilidade, utilizadas para o reconhecimento de contrastes de propriedades físicas no interior da pilha de rejeito. A profundidade máxima alcançada foi de aproximadamente 15,9 metros nas três primeiras seções e cerca de 19,8 metros nas demais, o suficiente para abranger a espessura da pilha de rejeito no local de estudo, bem como porções do embasamento cristalino formado por rochas alcalinas, uma vez que as linhas de aquisição geofísica foram dispostas próximas ao maciço rochoso que limita a porção norte do Bota-fora 04, próximo ao canal de desvio córrego da Consulta, onde a espessura da pilha é menor.

Algumas limitações encontradas durante a investigação são dignas de nota: a baixa resolução nas extremidades das linhas Tomografia Elétrica limitou algumas interpretações; a resolução obtida com o espaçamento de 5 metros entre os eletrodos não permite a identificação de estruturas menores, tais como pequenos fluxos hidrogeológicos e pequenas rochas mineralizadas com sulfetos; a heterogeneidade do material depositado no BF-04 torna difícil a identificação dos limites entre o BF-04 e o embasamento cristalino; e finalmente, a falta de dados diretos, tais como piezômetros e poços de monitoramento, próximos a algumas das linhas de aquisição de dados para apoiar o modelo geofísico proposto.

Devido à falta de dados diretos, o trabalho de Casagrande (2020) foi utilizado como referência para a interpretação dos valores de resistividade. O autor fez uma investigação geofísica que cobre quase todo o nível inferior de BF-04 utilizando Eletrorresistividade e Polarização Induzida. Neste trabalho, o modelo de inversão de resistividade número 3 intercepta o piezômetro Pz3 anteriormente descrito.

O autor correlaciona os dados químicos do piezômetro Pz3, caracterizado por pH 3,5, 22.003 mg/L de  $\text{SO}_4^{-2}$  e condutividade de 9.853  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Franklin, 2007), com uma zona de baixa resistividade localizada nas proximidades do Pz3 no modelo de inversão. De acordo com o autor, a baixa resistividade pode ser um indicador de baixo pH e a elevada salinidade da água próxima ao Pz3.

Trabalhos como Power et al. (2018) associam anomalias de baixa resistividade com efluentes de alta salinidade. No contexto de BF-04, as anomalias de baixa resistividade podem

representar áreas sob influência de DAM. É importante salientar a proximidade entre a linha 6 apresentada neste trabalho e o Pz3, localizados a apenas 30 metros de distância um do outro.

Contudo, os valores de resistividade encontrados por Casagrande (2020) variaram de  $< 10,0 \Omega.m$  a  $> 12.000 \Omega.m$ , enquanto os encontrados neste trabalho variaram de  $< 50,0 \Omega.m$  a  $> 1.000 \Omega.m$ . Apesar da proximidade entre algumas linhas, a comparação entre as duas obras é limitada devido à diferença de resolução entre os modelos geofísicos, uma vez que o outro autor utilizou um arranjo com um espaçamento de 10 m, atingindo maiores profundidades.

As anomalias de resistividade de maior interesse para o trabalho são aquelas com valores inferiores a  $100 \Omega.m$ , que indicam possíveis zonas de infiltração e percolação de água, ou seja, zonas saturadas. Dentre essas anomalias, ocorrem aquelas com valores abaixo de  $50 \Omega.m$ .

Os valores de cargabilidade variaram entre  $< 0,500 \text{ mV/V}$  e  $> 10,1 \text{ mV/V}$ , este último o de maior relevância para o trabalho, uma vez que indica a presença de sulfetos disseminados. Outros trabalhos realizados em contextos parecidos indicam valores de cargabilidade semelhantes aos encontrados neste trabalho e até inferiores.

No trabalho de Casagrande (2019), realizado também no Bota-fora 04, foram encontrados valores da ordem de  $< 0,500 \text{ mV/V}$  a  $> 10,1 \text{ mV/V}$ . No de Targa (2020), trabalho realizado no Bota-fora 08, os valores variaram de  $< 0,10 \text{ mV/V}$  a  $> 5,0 \text{ mV/V}$ , este último associado a presença de sulfetos disseminados. É importante ressaltar a existência de uma relação diretamente proporcional entre a concentração de minerais sulfetados e os valores de cargabilidade (MOREIRA et. al, 2016; GURIN et. al, 2013; HUPFER et. al, 2016).

Para a análise e a correlação dos dados obtidos nos modelos de inversão com o meio físico da área de estudos, é necessário destacar que o canal de desvio córrego da Consulta fica situado no início de cada linha de tomografia elétrica, assim como a espessura da pilha de rejeito aumenta sentido leste/nordeste. Os modelos de inversão foram agrupados em conjuntos de 7 seções para a interpretação.

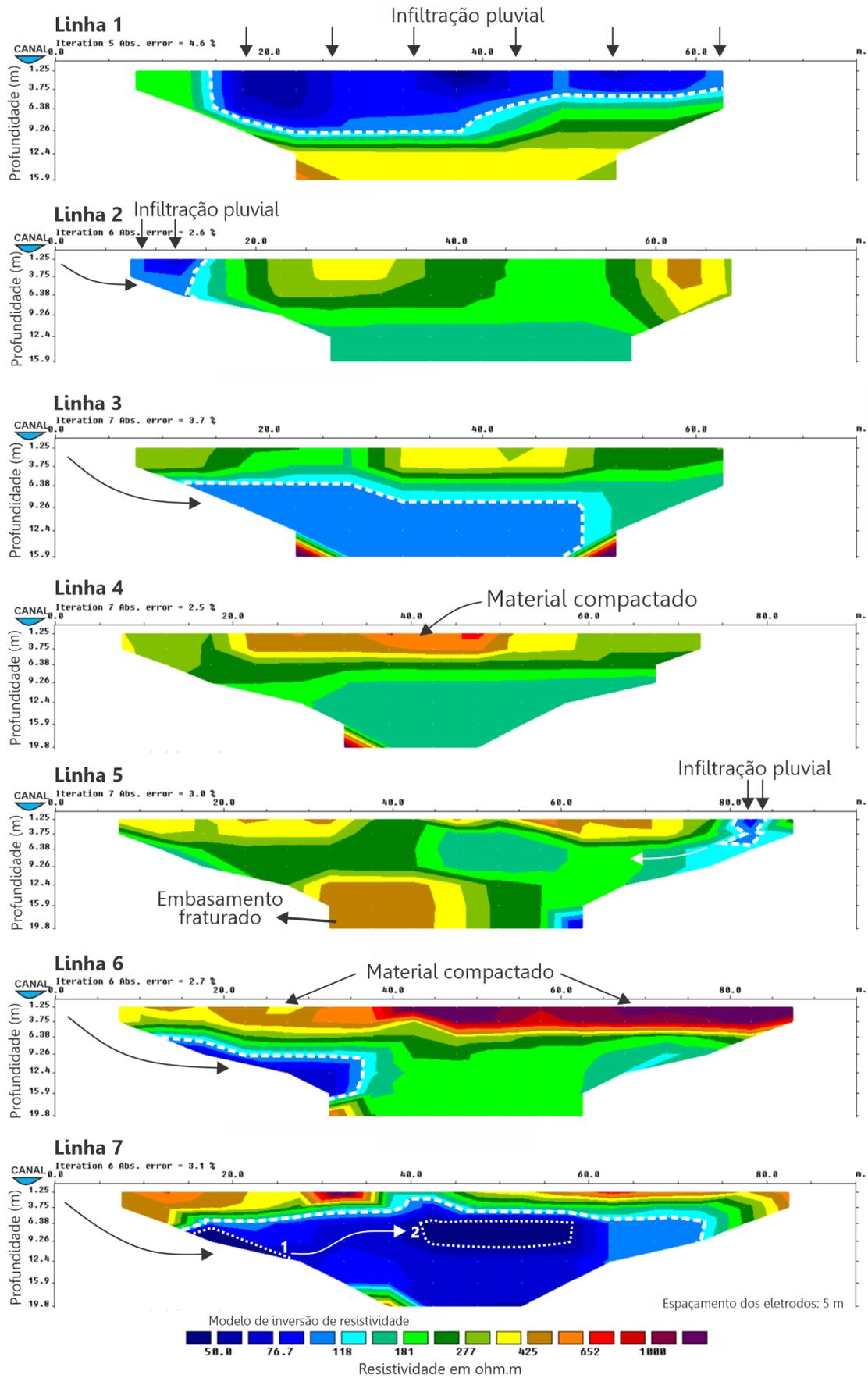
O primeiro conjunto de seções corresponde aos modelos de inversão de resistividade referente às linhas de 1 a 7 (Figura 32). A Linha 1 está localizada na porção noroeste do Bota-fora 04, próxima à represa que dá origem ao canal de desvio córrego da Consulta, logo no início do mesmo, onde ocorre o primeiro encontro do canal com a pilha de rejeito. Nela foram encontradas anomalias de baixa resistividade, da ordem de  $< 100 \Omega.m$ , que atingem até cerca de 10 metros de profundidade com uma extensão lateral de mais de 50 m, com início nos 15 metros a partir da origem da linha. Essa anomalia foi interpretada como o resultado de um processo de infiltração pluvial, uma vez que os campos de aquisição de dados ocorreram no início de março, no período chuvoso.

Outro possível agente contribuinte para a saturação do meio na área da Linha 1 é a Bacia do Carlaile que antecede o canal de desvio. Devido à sua proximidade com o local da aquisição de dados, é possível que parte da água represada seja infiltrada, por meio de fraturas, nas áreas adjacentes ao reservatório. É importante ressaltar que a Linha 1 está posicionada próxima a borda do BF-04, local onde o rejeito possui pouca espessura. Este fato sugere que grande parte da zona de concentração de umidade no local ( $<100 \Omega.m$ ) ocorre no material de transição entre a pilha e o embasamento.

Ainda neste modelo de inversão de resistividade é interessante notar que as porções mais profundas apresentam maior resistividade ( $150 - 540 \Omega.m$ ), o que pode indicar um embasamento cristalino menos faturado. As porções em verde claro remetem à forma do fundo de um vale, o que de fato pode uma ocorrer visto que a linha está localizada na porção baixa entre dois maciços.

A Linha 2 também está posicionada entre dois altos rochosos. Nela, é possível observar uma área de baixa resistividade ( $<100 \Omega.m$ ) próxima a origem da linha (10 m a partir da origem) que pode ser interpretada tanto como infiltração de água meteórica, visto a superficialidade dessa zona, quanto da própria ação de infiltração do canal de desvio, localizado próximo ao ponto 0 m da seção. Novamente, devido a pouca espessura de rejeito no local, em detrimento a proximidade com o maciço rochoso, e aos baixos valores de resistividade encontrados abaixo de 11 m de profundidade ( $\sim 150 \Omega.m$ ), é possível que algumas das rochas do embasamento possuam fraturas pelas quais pode ocorrer a percolação de fluidos.

**Figura 32** - Modelos de inversão de resistividade referentes às linhas de 1 a 7. As linhas tracejadas em branco indicam zonas de elevada umidade e as setas brancas indicam o fluxo hidrogeológico.



As porções superficiais mais resistivas (277 – 540  $\Omega$ .m), localizadas a 30 m e a 62 m a partir da origem, foram interpretadas como áreas onde houve uma maior compactação do material. O mesmo ocorre com as linhas de 3 a 7, cuja espessura do suposto material compactado pode variar de 2 a 5 metros. Devido à heterogeneidade do material seria difícil distinguir entre o rejeito e o embasamento cristalino, principalmente em áreas onde este último é muito fraturado.

A Linha 3 é a última localizada entre os dois maciços. Ela apresentou significativa porção de baixa resistividade ( $\sim 100 \Omega$ .m) em profundidade (abaixo dos 6 m), com início nos 10 m a partir da origem até os 50 m. A porção de baixa resistividade sugere a presença de umidade no material, cuja origem pode estar tanto relacionada com infiltrações do canal de desvio naquele ponto, quanto por infiltrações ocorridas nas áreas das linhas 1 e 2 e posteriormente propagadas no material em decorrência da porosidade do material, do fraturamento das rochas ou da topografia do embasamento associada ao fundo do vale.

A Linha 4 não apresentou zonas de resistividade menores que 100  $\Omega$ .m, interpretadas neste trabalho como possíveis locais de concentração de umidade.

O modelo de inversão de resistividade referente à Linha 5 apresentou uma zona de baixa resistividade ( $< 100 \Omega$ .m), 82 metros distante da origem da linha. Essa zona pode estar associada a ação de infiltração de água meteórica, cuja propagação ocorreria para dentro da pilha de rejeito. A 18 metros de profundidade e 60 metros a partir da origem é possível observar uma outra zona úmida, possivelmente conectada com a porção de baixa resistividade superficial. Ocorre ainda, em profundidade, uma área de resistividade próxima a 425  $\Omega$ .m interpretada, a partir do mapa de isópacas de Alberti (2017) como uma porção do maciço rochoso levemente fraturada.

A Linha 6, localizada na porção convexa do canal de desvio, em relação à pilha de rejeito, apresentou significativa anomalia de baixa resistividade em sua área próxima ao córrego da Consulta. Esta anomalia, que ocorre em profundidade (a partir dos 6 metros), é caracterizada por valores de  $< 100 \Omega$ .m a um pouco mais de 50  $\Omega$ .m e possivelmente está associada à infiltração de umidade do córrego da Consulta na pilha de rejeito.

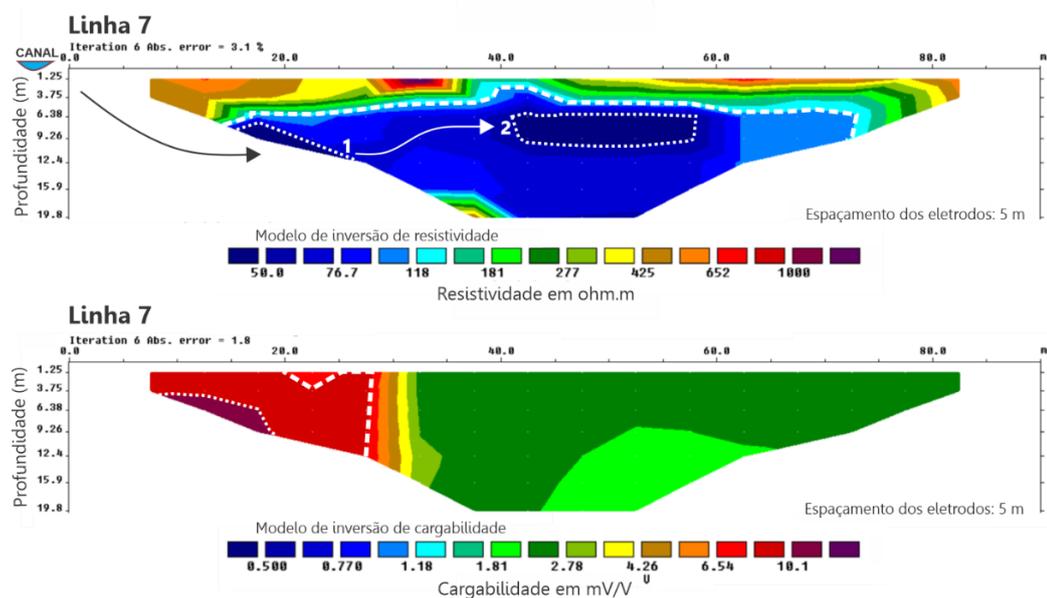
A seção referente à Linha 7 apresenta significativas porções de baixa resistividade ( $< 100 \Omega$ .m) compreendidas entre as distâncias 12 m e 72 m com relação à origem, a uma profundidade abaixo de 3,75 metros (Figura 32). Através dessas porções, ocorrem duas anomalias de baixa resistividade ( $< 50 \Omega$ .m), a primeira, a 20 m da origem e a uma profundidade de aproximadamente 9 m, e a segunda, a 50 metros a partir da origem e a cerca de 8 metros de profundidade. Somada a essas anomalias, na seção de cargabilidade é possível observar uma

anomalia de alta cargabilidade, caracterizada por um núcleo com valores acima de 10,1 mV/V cercada por áreas cuja cargabilidade se aproxima dos 10,1 mV/V. Esta anomalia está localizada na seção a partir dos 7 m de distância da origem até cerca de 38 m, e alcança desde a porção superior do perfil até 12 metros de profundidade.

A baixa resistividade pode indicar zonas de acumulação de água, veios ou filões de sulfetos, ou ainda zonas de mineralização com sulfetos disseminados, enquanto que zonas de alta cargabilidade são indicativos da presença de sulfetos disseminados (PAES et al., 2018). Com base nessas afirmações, é interessante notar que a primeira anomalia de baixa resistividade descrita ( $< 50 \Omega.m$ ), à esquerda na seção, coincide com a anomalia de alta cargabilidade ( $> 10,1$  mV/V). Essa combinação de parâmetros físicos é indicativa da presença de mineralizações de sulfetos disseminados em rochas porosas, ou ainda, sem a silicificação que é natural das rochas do local, o que conferiria alta resistividade para o material. Devido à baixa resistividade das áreas adjacentes, é possível que os sulfetos em questão estejam em contato direto com o meio saturado.

Em contra partida, a segunda anomalia de baixa resistividade encontrada na seção ocorre em um contexto de média cargabilidade (1,81 mV/V – 2,78 mV/V), correspondente a zonas de baixa concentração de sulfetos. Neste caso, a referida anomalia de baixa resistividade pode ser entendida como uma zona saturada, de elevada salinidade, possivelmente resultante da interação entre os sulfetos descritos na seção com o meio saturado. Essas são potenciais áreas geradoras de drenagem ácida de mina. É importante ressaltar que a topografia original do terreno apresenta áreas mais elevadas à esquerda com aprofundamento do terreno para a direita.

**Figura 33** - Modelos de inversão de resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 7. As linhas tracejadas em branco indicam zonas de elevada umidade e as setas brancas indicam o fluxo hidrogeológico.



Assim como as seções de resistividade, os modelos de inversão de cargabilidade foram separados em dois conjuntos de dados, o primeiro referente às linhas de 1 a 7 (Figura 34), e o segundo referente às linhas de 8 a 14.

As seções de cargabilidade referentes às linhas de 1 a 5 foram interpretadas como baixa a moderada concentração de sulfetos no material, com uma tendência, via de regra, de valores crescentes em direção à origem das linhas (ponto 0 metros). Esse aumento de valores pode estar atrelado à presença do maciço rochoso situado a norte do córrego da Consulta. As porções do Bota-fora 04 próximas ao canal de desvio apresentam pequena espessura de rejeito em virtude da topografia do embasamento cristalino.

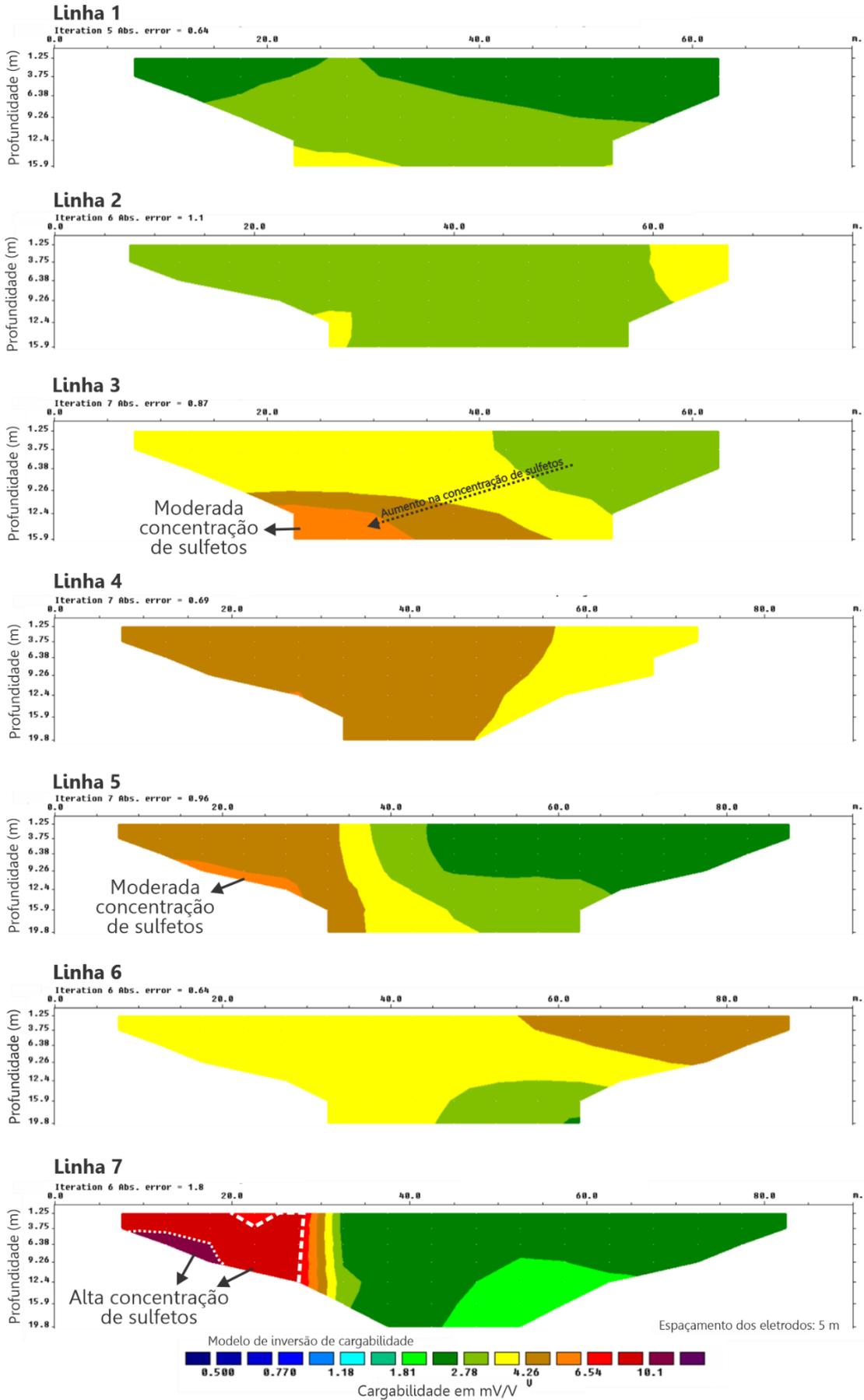
As seções 1 e 2 apresentaram semelhanças quanto aos valores de cargabilidade, que variaram de aproximadamente 2,78 mV/V a 4,26 mV/V, valores estes relativamente baixos para indicar a presença significativa de sulfetos. Nas linhas 3, 4 e 5 os valores de cargabilidade alcançaram 6,54 mV/V e sugerem uma moderada concentração de sulfetos disseminados. Nas três linhas, essas áreas anômalas de moderada cargabilidade são encontradas entre as distâncias 20 e 25 metros a uma profundidade de aproximadamente 12 metros, próximas ao canal de desvio.

Na linha 3 a zona interpretada como de moderada concentração de sulfetos coincide com a porção da seção de resistividade, da mesma linha, onde são encontrados valores próximos a 100  $\Omega$ .m, que indicam zonas úmidas, e valores próximos a 1000  $\Omega$ .m, associados às porções do embasamento cristalino pouco fraturado. Esta área, interpretada como moderada concentração de sulfetos, pode ser resultado da longa interação, através de anos, dos minerais sulfetos com efluentes lixiviantes que acabariam por acarretar na diminuição da concentração de sulfetos.

Diferentemente das outras seções, o modelo de inversão de cargabilidade da Linha 6 não apresentou uma tendência crescente nos valores em direção à origem. Nele é possível observar uma leve diminuição dos valores segundo a profundidade e uma porção de moderada cargabilidade a partir dos 55 metros e com valores um pouco acima de 4,26 mV/V. Esta última pode ser resultante da presença de sulfetos disseminados no rejeito.

O conjunto de dados de resistividade referente às linhas de 8 a 14 é caracterizado por significativas porções de baixa resistividade ( $< 100 \Omega$ .m) indicativas da presença de zonas saturadas em subsuperfície (Figura 35). Algumas destas zonas estão associadas a anomalias de baixa resistividade ( $< 50 \Omega$ .m), as quais são interpretadas neste trabalho como efluentes de alta salinidade decorrentes da formação de drenagem ácida de mina.

Figura 34 - Modelos de inversão de cargabilidade referentes às linhas de 1 a 7.



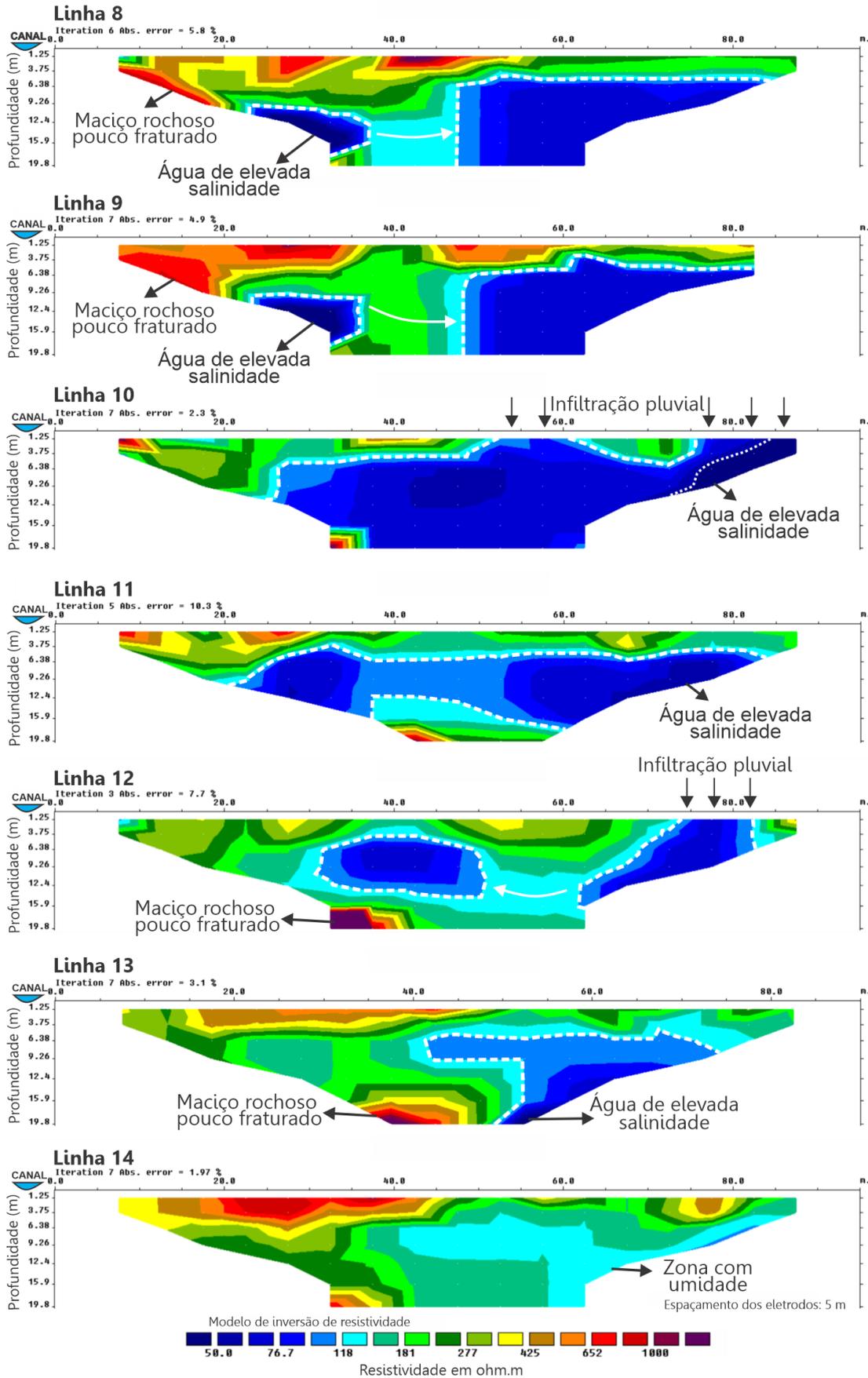
As linhas 8 e 9 apresentam grande semelhança entre si. Nelas é possível observar duas áreas de baixa resistividade, a primeira, à esquerda, é mais restrita quando comparada com a segunda. Essas áreas nas duas seções possuem formas e localização extremamente parecidas, o que sugere que uma seja continuidade da outra. Entre as áreas ocorre uma zona de média resistividade (118  $\Omega$ .m a 181  $\Omega$ .m), que pode ser resultante da passagem de umidade de uma área para a outra por meio de poros presente no material. Neste caso, a topografia do local e aos mapas potenciométricos de Albert (2017) sugerem que essa passagem ocorre da esquerda para direita (indicado pela seta branca), sentido este no qual ocorre o aprofundamento do vale.

A linha 10, assim como a linha 7, apresentou significativa porção de baixa resistividade (< 100  $\Omega$ .m) em subsuperfície, cuja profundidade alcançou desde as zonas mais superficiais da seção até cerca de 20 metros de profundidade, com destaque para duas zonas anômalas de baixa resistividade. A primeira está localizada a 9 metros de profundidade e a uma distância de 42 a 57 metros a partir da origem da linha, e a segunda contempla desde a zona mais superficial até cerca de 10 metros de profundidade. Esta segunda possivelmente possui contribuição das águas pluviais, enquanto que a primeira pode estar associada ao prolongamento de fraturas ou áreas úmidas presentes no BF-04.

Quanto às seções de resistividade referentes às linhas 11, 12 e 13, todas apresentaram grande similaridade. São caracterizadas pela presença de porções com núcleos cuja resistividade varia de < 50  $\Omega$ .m, como é o caso da seção 13, a aproximadamente 76,7  $\Omega$ .m, como ocorre nas demais seções. As porções anômalas de baixa resistividade das linhas 11 e 12 estão possivelmente conectadas pelo prolongamento de fraturas NE-SW. Na linha 13 a zona anômala ocorre entre os 50 e 55 metros a partir da origem e a uma profundidade próxima aos 19 metros. Nas 3 linhas é possível observar uma zona de alta resistividade (~ 652  $\Omega$ .m a > 1000  $\Omega$ .m) estabelecida a uma profundidade de aproximadamente 19 metros, a cerca de 35 metros da origem, interpretada como uma porção maciço rochoso pouco fraturado.

A linha 14, por sua vez, não apresentou porções saturadas, apenas uma tendência do aumento da umidade em direção ao vale (da esquerda para a direita na seção). Esta foi a última linha de tomografia elétrica realizada no trabalho e sua localização marca o final do contato entre o canal de desvio córrego da Consulta e o BF-04.

**Figura 35** - Modelos de inversão de resistividade referentes às linhas de 8 a 14. As linhas tracejadas em branco indicam zonas de elevada umidade e as setas brancas indicam o fluxo hidrogeológico.



As seções de cargabilidade de 8 a 14 apresentaram, de um modo geral, baixos valores de cargabilidade, interpretados como baixa quantidade de sulfetos no material (Figura 34). As linhas seguiram o padrão das seções anteriores de aumento de valores em direção ao córrego da Consulta, localizado no ponto 0 metros da seção.

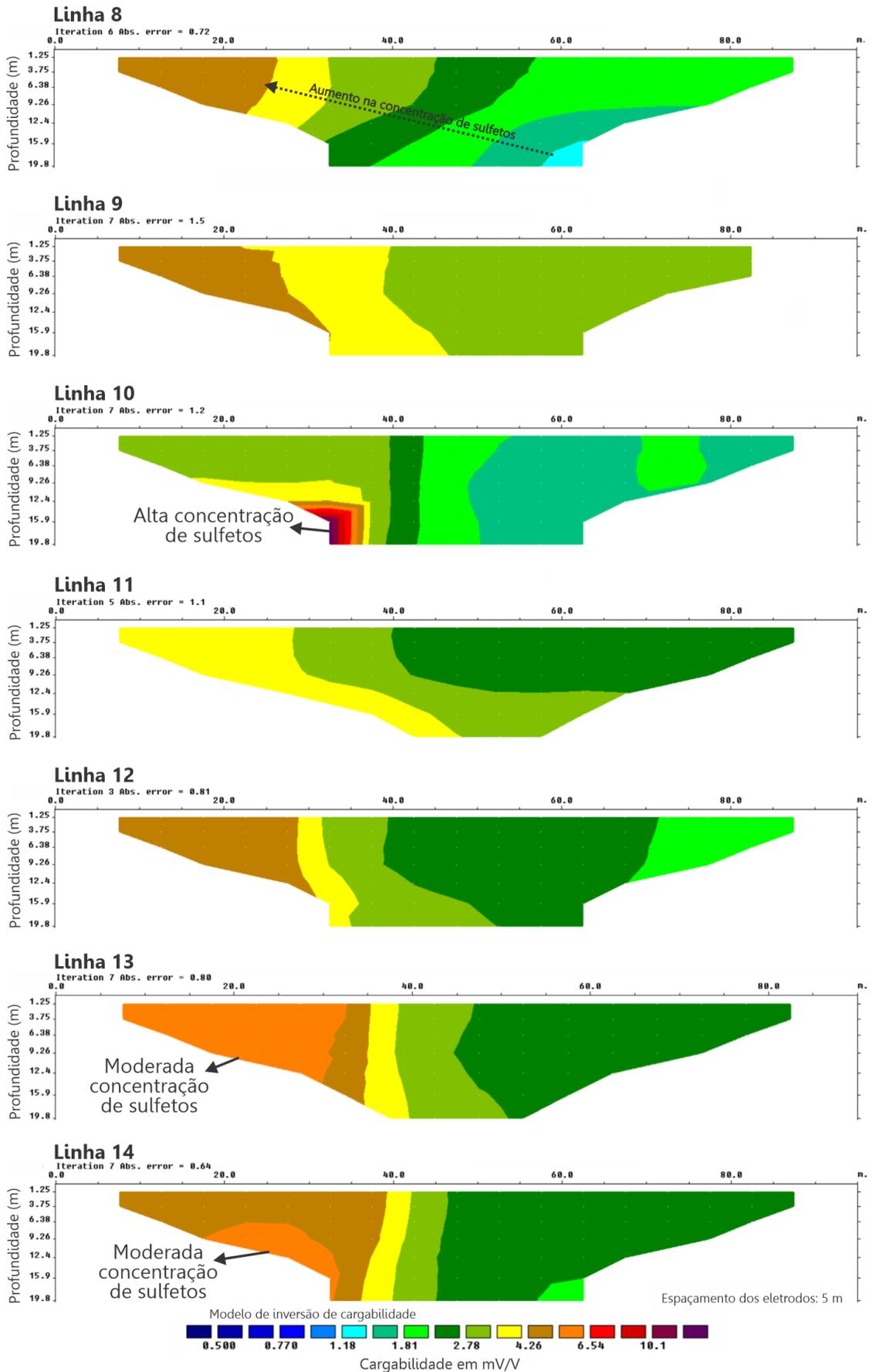
A cargabilidade nas linhas 8, 9, 11 e 12 variou de 1,18 mV/V a pouco mais de 4,26 mV/V. Dentre esses valores, o menor foi observado na linha 8 a uma distância de 60 metros a partir da origem e profundidade de aproximadamente 19 metros. Este foi o ponto de menor cargabilidade obtido no levantamento geofísico e conseqüentemente o ponto com a menor presença de sulfetos disseminados. Nas seções 8, 9 e 12 as áreas de maior cargabilidade ficam compreendidas até a distância de 30 metros.

A seção de número 10, assim como a 7, alcançou valores elevados de cargabilidade, da ordem de  $> 10,1$  mV/V. Esta anomalia de alta cargabilidade, que indica grande concentração de sulfetos, está localizada a cerca de 15 metros de profundidade na distância de 30 metros no perfil. Quando confrontada com a seção de resistividade da mesma linha, é possível observar que parte da anomalia de alta cargabilidade está situada em uma zona saturada cujo valor de resistividade fica em torno dos  $76,7 \Omega.m$ , e outra parte está contida numa pequena zona de alta resistividade, ou seja, ainda associada à rocha não alterada. Esta é uma zona de alta susceptibilidade para a formação de drenagem ácida de mina, assim como ocorre na linha 7.

As linhas 13 e 14 apresentaram significativas porções de moderada cargabilidade ( $\sim 6,54$  mV/V), o que indicaria a presença, ainda que em concentração mediana, de sulfetos disseminados. Na linha 13, esta zona fica situada até a distância de 32 metros na seção, a uma profundidade de até 12 metros. Ainda que os valores de cargabilidade não sejam tão altos, esta é uma área grande se comparada às demais. A linha 14, por sua vez, apresenta uma área de cargabilidade menor que se assemelha àquela encontrada na linha 3.

É interessante notar que em grande parte das seções ocorre uma mudança nos valores de cargabilidade normalmente por volta dos 40 metros, quase sempre indicados pelos valores entre  $\sim 2,78$  mV/V e  $< 4,26$  mV/V. Este fato pode estar associado à forma do maciço rochoso.

Figura 36 - Modelos de inversão de cargabilidade referentes às linhas de 8 a 14.



## 6.2 Modelagem 3D

Os modelos pseudo-3D foram obtidos a partir da interpolação dos dados contidos nos modelos de inversão de resistividade e cargabilidade. Para isto, foram utilizados os dados das 14 linhas de tomografia elétrica que resultaram em dois modelos pseudo-3D, um para resistividade e outro para a cargabilidade. Para cada parâmetro físico foram criados 11 níveis de visualização, que começa em 1 metro de profundidade e chega até 21 metros, cada nível distante 2 metros um do outro. Esta forma de visualização em subsuperfície facilitou a caracterização de fluxos hidrogeológicos que ocorrem no local, bem como a descrição de estruturas que podem servir como condicionantes para a percolação e acúmulo de umidade.

É importante ressaltar que a interpolação de dados, uma vez que as seções 2D são trapezoidais, acaba por extrapolar valores aproximados de resistividade e cargabilidade nas áreas fora dos modelos de inversão, em especial nas porções laterais mais profundas.

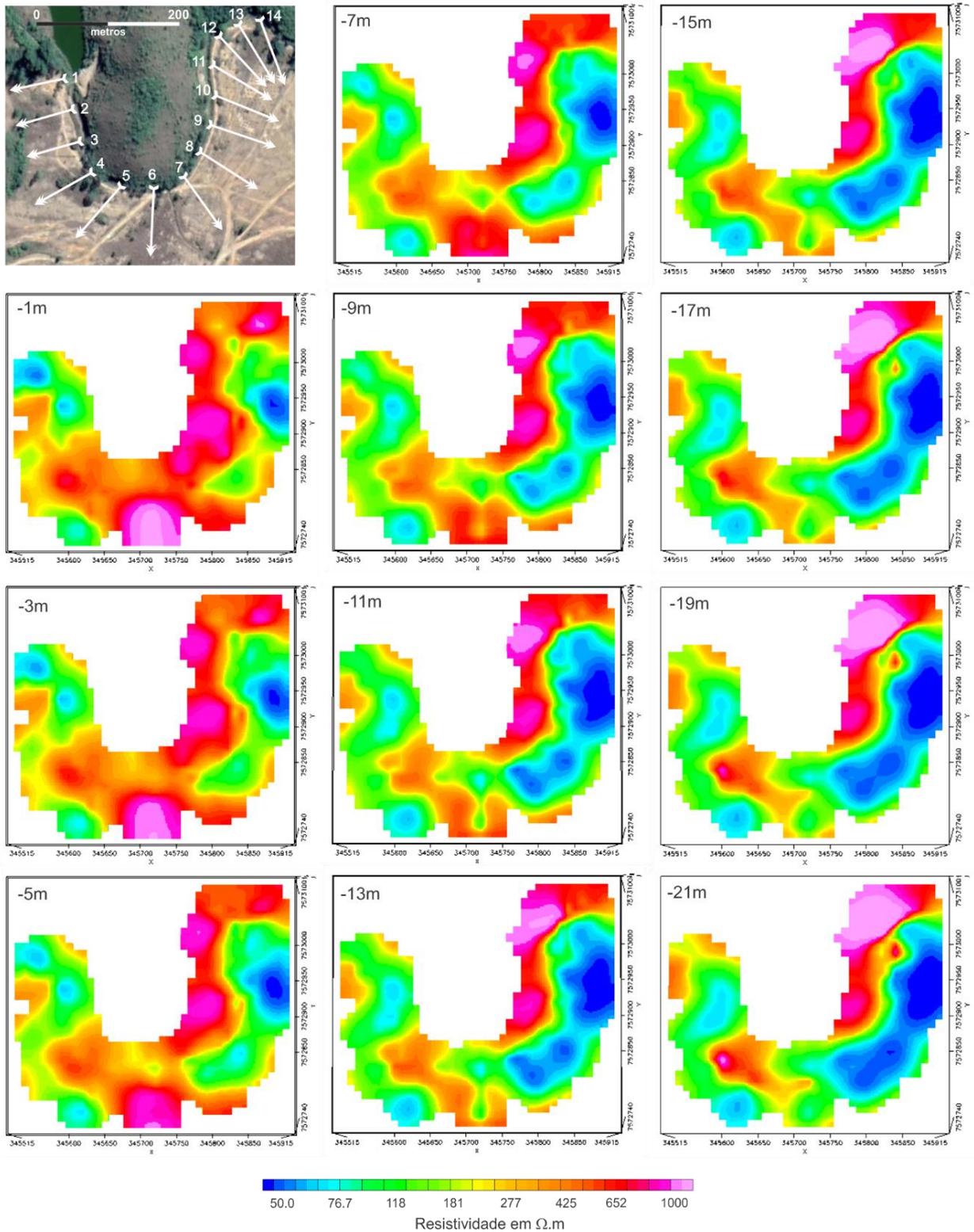
Através do modelo pseudo-3D de resistividade foi possível notar uma tendência de aumento da umidade conforme o aumento da profundidade (Figura 37). As áreas superficiais (-1 a -5 metros) foram aquelas mais resistivas, o que possivelmente está atrelado à compactação do material e à presença do maciço rochoso, que também confere alta resistividade. Esta compactação muitas vezes serve como uma barreira local à infiltração de água meteórica na pilha. As porções superficiais menos resistivas ( $< 100 \Omega.m$ ) podem estar atreladas à infiltração pluvial ou ainda ao processo de capilaridade de zonas úmidas profundas. Estas áreas estão situadas ao oeste, próxima à represa do córrego da Consulta, e ao leste, sentido a bacia de captação BNF.

É interessante notar que essa zona pouco resistiva ao noroeste possui uma ligação direta com canal de desvio córrego da Consulta, em especial, nos seus primeiros metros dentro da pilha de rejeito. Esta é possivelmente uma área onde ocorre a infiltração das águas do canal de desvio para dentro do BF-04. Essa zona se estende aos demais níveis de visualização e fica cada vez mais evidente.

A partir dos 5 metros de profundidade é possível observar que a zona de baixa resistividade localizada a noroeste do modelo é conectada a outras áreas de resistividade similar que resulta em uma grande área de acúmulo de umidade que aparenta formar um caminho preferencial que percorre de norte a sul (de acordo com os mapas topográficos e potenciométricos da área). Conforme a profundidade aumenta o fluxo se torna cada vez mais evidente. Outro ponto interessante é a área circular de baixa resistividade posicionada na porção sudoeste do modelo, na porção ao sul do fluxo hidrogeológico descrito. Esta parece ser uma

área de acúmulo de umidade possivelmente condicionada pela forma do embasamento cristalino local, indicado pela área de moderada a alta resistividade e formato ligeiramente circular, adjacente à área circular pouco resistiva.

Figura 37 - Modelos pseudo-3D de resistividade dispostos segundo a profundidade de -1 a -21 metros.



O modelo pseudo-3D de resistividade indicou uma segunda possível zona de infiltração do canal de desvio no BF-04. Esta zona de baixa resistividade está localizada na porção central do modelo, próxima ao início da Linha 6, e fica mais presente a partir dos 9 metros de profundidade. Assim como a primeira possível área de infiltração, esta também tem uma tendência do aumento da área úmida conforme o aumento da profundidade.

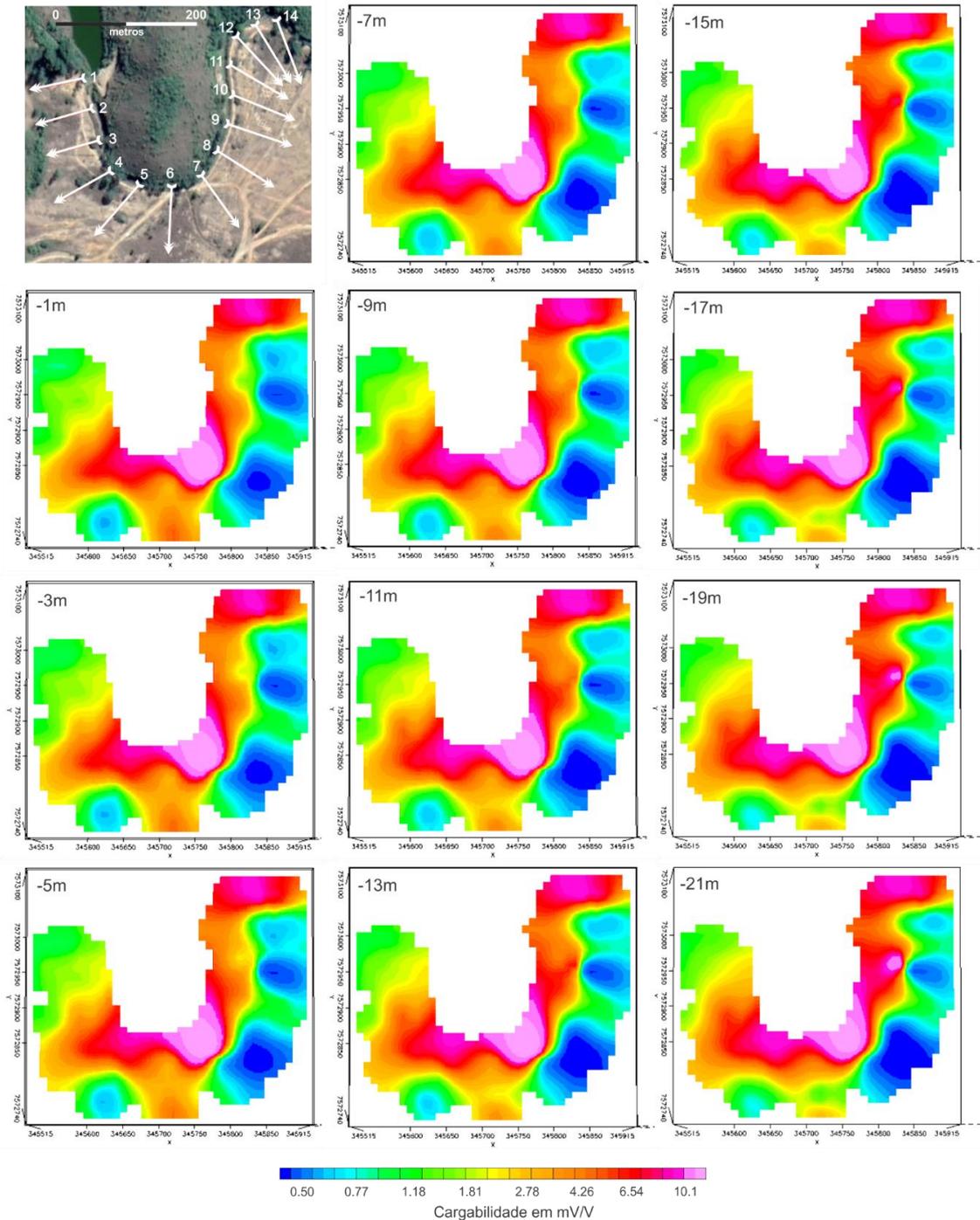
Outra importante área indicada pelos dados de resistividade é a porção leste do modelo, caracterizada por uma grande área de baixa resistividade ( $< 100 \Omega.m$ ) com núcleos anômalos de resistividade ainda menor ( $< 50 \Omega.m$ ). Esta área pode ser resultante de diferentes contribuições. Logo em sua porção mais superficial já podem observadas zonas cuja resistividade é menor que  $100 \Omega.m$ , um indicativo de áreas saturadas possivelmente originadas pela infiltração de água meteórica. Em profundidade, mais especificamente a 9 metros de distância da superfície, ocorre a conexão da segunda possível zona de infiltração do canal de desvio com essa área. A topografia local certamente possui influência na concentração desses fluidos, uma vez que neste local o vale afunda sentido sudeste. Outro fator que corrobora com essa concentração e permite o contraste das propriedades no local é a presença do maciço rochoso cristalino pouco fraturado indicado pelas porções de alta resistividade na porção nordeste do modelo.

O modelo pseudo-3D de cargabilidade indica que a maior parte das áreas enriquecidas em sulfetos, de moderada a alta cargabilidade, estão inseridas próximas ao maciço rochoso cristalino localizado a norte da área (Figura 38). Dentre os resultados obtidos podem ser destacados aqueles encontrados no início na Linha 7. Esta área alcançou valores de cargabilidade superiores a  $10 \text{ mV/V}$  que indica alta concentração de sulfetos em relação às demais. Quando comparada com o modelo pseudo-3D de resistividade, é possível notar que algumas áreas de alta cargabilidade estão posicionadas junto à algumas áreas de baixa resistividade, o que sugere a presença de sulfetos em meio saturado. Por outro lado, também ocorrem áreas de alta cargabilidade junto a zonas de alta resistividade, que são indicativos da presença de sulfetos em rochas pouco fraturadas.

Os valores de cargabilidade moderados a altos estão em contraste com zonas de baixa cargabilidade e este contraste possivelmente marca a presença do maciço rochoso. Isto pode ocorrer uma vez que as rochas do maciço estão silicificadas e preservam os sulfetos em seu interior. O material disposto na pilha de rejeito está sujeito a uma ação intempélica maior, oxidação e lixiviação de seus minerais. Por fim, é interessante notar que grande parte das anomalias de baixa resistividade encontradas estão diretamente relacionadas às anomalias de baixa cargabilidade, dispostas em áreas muito próximas ou muitas vezes sobrepostas. A baixa

cargabilidade destas áreas é um forte indicativo de que ali, atualmente, não ocorre a formação de drenagem ácida de mina, uma vez que não há ou existem poucos sulfetos presentes. Estas provavelmente são áreas onde o fluxo hidrogeológico atua há muito tempo o que faz com que os minerais ali presentes já não sejam tão reativos à formação de drenagem ácida de mina.

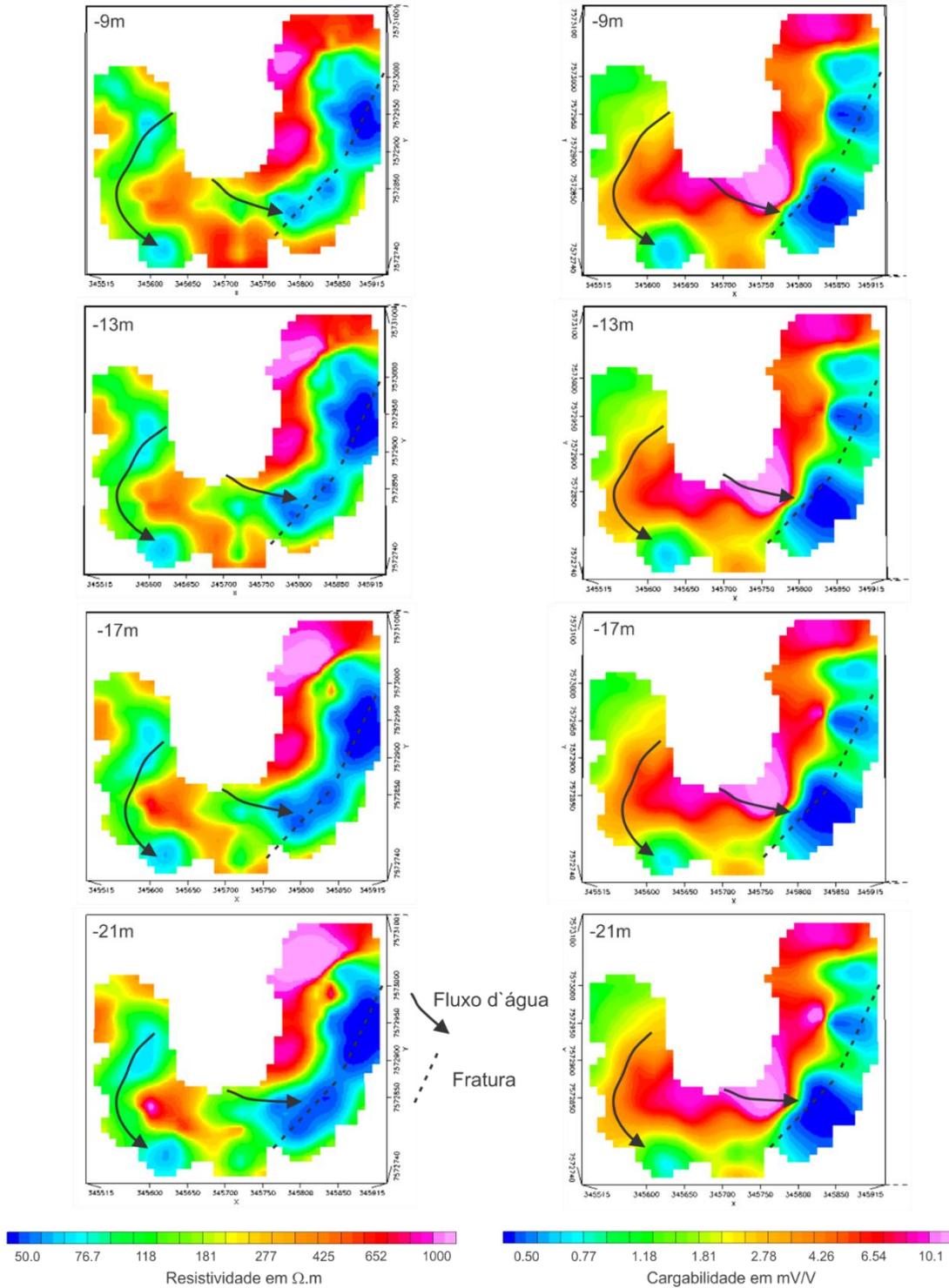
**Figura 38** - Modelos pseudo-3D de cargabilidade dispostos segundo a profundidade.



Na Figura 39 estão indicadas as duas possíveis zonas de infiltração do canal de desvio córrego da Consulta no Bota-fora 04, bem como o fluxo hidrogeológico resultante desta reação,

indicado pelas setas pretas. O tracejado em preto marca uma zona de fraturamento que condiciona a atuação do fluxo.

**Figura 39** - Correção entre os modelos pseudo-3D de resistividade (esquerda) e cargabilidade (direita) e a indicação do fluxo hidrogeológico (seta preta). O tracejado preto indica uma zona de fraturamento NE-SW.



Através da imagem é possível observar mais precisamente a interação entre os mapas pseudo-3D de resistividade, à esquerda, e os de cargabilidade, à direita. Os dois fluxos hidrogeológicos descritos certamente possuem alguma contribuição do canal de desvio córrego

da Consulta, que atua na injeção de águas na pilha de rejeito. Posteriormente a água infiltra por entre os poros do material da pilha, bem como por meio de fraturas das rochas do embasamento cristalino.

O primeiro fluxo, posicionado a oeste no mapa, possivelmente tem três contribuições distintas: a água meteórica, que infiltra superficialmente; a água da represa do córrego da Consulta, localizada a poucos metros do local; e as águas do canal de desvio de mesmo nome, especialmente na porção inicial do mesmo. Felizmente o curso do fluxo subterrâneo em questão não intercepta, segundo o mapa pseudo-3D, quantidades consideráveis de sulfetos, apenas porções de moderada a baixa cargabilidade.

O segundo fluxo hidrogeológico é originado na porção convexa do canal de desvio e cruza porções significativas de sulfetos, indicados pela alta cargabilidade do local, e posteriormente segue por fraturas de sentido NE-SW. Nesta área ocorre um contraste de parâmetros físicos muito interessante, tanto para os mapas pseudo-3D de resistividade quanto para os de cargabilidade, caracterizado por áreas de mudanças abruptas nos valores dos parâmetros físicos estudados. Isto está possivelmente atrelado às duas estruturas ali presentes, ao maciço rochoso, que confere alta resistividade e alta cargabilidade, e à descontinuidade NE-SW, que condiciona o fluxo hidrogeológico o que faz com que a resistividade seja baixa. A baixa cargabilidade do local pode estar atrelada a inatividade do material, visto que por ser um caminho preferencial da passagem de água, os antigos minerais sulfetados ali presentes provavelmente já passaram pelas reações químicas de formação de drenagem ácida de mina e hoje estão inertes.

Tanto os modelos de inversão 2D quanto os mapas pseudo-3D de profundidade de resistividade indicaram zonas de infiltração do canal de desvio córrego da Consulta para dentro do BF-04. Somado a isto, a bacia de captação de drenagem ácida (BNF) realiza a coleta do efluente ácido gerado no BF-04 durante todo o ano, inclusive nos períodos de seca, o que indica que uma parcela considerável do aporte hídrico que contribui para a geração de DAM na pilha de rejeitos tem relação com o canal de desvio. Logo, a realização de obras de impermeabilização nos trechos do canal onde ocorre infiltração certamente contribuiria para a diminuição do volume de DAM captado pela BNF, o que resultaria tanto na redução dos dispêndios que a INB possui com a captação e tratamento do efluente quanto na diminuição, a longo prazo, dos impactos ambientais causados pela DAM. A Figura 40 sugere uma proposta de impermeabilização.

**Figura 40** - Proposta de impermeabilização para o canal de desvio Córrego da Consulta.



Além disso, é recomendado também a realização de estudos que visem a caracterização da influência do antigo leito do córrego da Consulta na propagação de zonas de umidade no Bota-fora 04, uma vez que os resultados dos modelos pseudo-3D de profundidade apontaram significativa concentração de umidade associada à antiga drenagem.

## 7. Considerações finais

Os resultados alcançados com a pesquisa permitiram a interpretação de possíveis zonas de infiltração, zonas de acumulação de umidade, possíveis zonas de geração de drenagem ácida de mina, possíveis áreas com altas concentrações de sulfetos. Os métodos geofísicos escolhidos mostraram ser eficientes no estudo de tais estruturas.

A Eletrorresistividade (ER) indicou a presença de zonas úmidas em profundidade ( $< 100 \Omega.m$ ) e anomalias de baixa resistividade ( $< 50 \Omega.m$ ) interpretadas como efluentes de elevada salinidade. As zonas de alta resistividade ( $\sim 1000 \Omega.m$ ) foram relacionadas a porções do maciço rochoso pouco fraturado e a fragmentos de rochas silicificadas dispostas no rejeito. Com o método da Polarização Induzida (IP) foram identificadas possíveis zonas de alta concentração de sulfetos ( $\sim 10.0 \text{ mV/V}$ ), as quais foram associadas em grande parte à presença do maciço rochoso e por vezes ao rejeito disposto na pilha.

Nos modelos de inversão 2D foram identificadas diversas zonas de baixa resistividade interpretadas como área de concentração de umidade. Na primeira seção de resistividade a abundância de áreas úmidas pode estar associada à presença Bacia do Carlaile, distante apenas alguns metros do local. Em outras seções ocorre a contribuição de águas meteóricas que infiltram no topo da pilha e seguem por um caminho em profundidade. Mas o mais interessante foi que em algumas das seções as zonas de baixa resistividade parecem possuir uma continuidade lateral em direção ao canal de desvio, localizado no início de cada linha de tomografia elétrica (seções 1, 2, 3, 6 e 7).

Outro ponto importante foi a identificação de zonas de alta cargabilidade nas seções 7 e 10, interpretadas como presença de sulfetos disseminados próximos ao canal. Na seção 7 em especial, os possíveis sulfetos ocorrem numa área de baixa resistividade, indicativa da presença de efluentes de alta salinidade, correspondente àqueles gerados por DAM. Este é um local propício para a formação de drenagem ácida de mina.

Nos mapas pseudo-3D de profundidade, a partir da interpolação dos dados das seções 2D, foram identificadas duas possíveis zonas de infiltração das águas do canal de desvio córrego da Consulta para dentro do Bota-fora 04. Tanto a primeira quanto a segunda têm pouca expressividade próximas à superfície, que ganham proeminência com o aumento da profundidade.

A primeira possível zona de infiltração localizada a oeste no mapa tem origem nas porções iniciais do canal de desvio, próximo à represa que o antecede. Este fluxo segue no sentido Sul e parece ser condicionada por uma zona de alta resistividade (maciço rochoso)

próximo aos limites do mapa pseudo-3D. Nesta área, tanto maciço quanto a zona úmida (baixa resistividade) têm um formato circular, o que podem ser zonas reliquias do período pré-deposição do rejeito. Esta zona de baixa resistividade também pode estar associada ao leito do antigo córrego da Consulta.

A segunda possível zona está localizada onde o canal faz sua primeira curva (próximo às linhas 6 e 7) e é caracterizada por uma estreita área de infiltração em comparação à primeira, que segue sentido a BNF. É possível notar um acúmulo de zonas úmidas ligadas à esta infiltração, possivelmente condicionadas pelo maciço rochoso. Um ponto preocupante é que dentre estas zonas de baixa resistividade existem algumas anomalias de baixa resistividade intensas ( $50 \Omega.m$ ), indicativo de fluxo de drenagem ácida de mina.

O estudo sugere a infiltração das águas do canal de desvio do córrego da Consulta na pilha de rejeito BF-04, da Mina Osamu Utsumi. Em estudos realizados anteriormente no BF-04 outros autores já aviam apontado a possibilidade de infiltração das águas do canal na pilha, contudo em pequena quantidade, quando comparado ao montante das águas que possuem influência no sistema BF-04. Agora é possível delimitar as principais áreas onde as infiltrações ocorrem.

Desta forma, a impermeabilização do canal de desvio Córrego da Consulta, ao menos nos segmentos de maior infiltração, deverá contribuir diretamente para a redução do volume de drenagem ácida de mina captado no BNF. Ações pontuais como esta deverão proporcionar a redução dos custos com o tratamento da DAM em longo prazo e um cenário de redução de impactos ambientais no futuro.

## 8. Referências Bibliográficas

- AKCIL, A.; KOLDAS, S. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 14, p. 1139-1145, 2005.
- ALBERTI, H. L. C. Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas impactadas pela drenagem ácida da mina de urânio – Osamu Utsumi, Planalto de Poços de Caldas (MG). 2017, 194 p. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- ALMEIDA, F.F.M.de. Origem e evolução da Plataforma Brasileira. Rio de Janeiro, DNPMDGM. 36p. (Boletim 241), 1967.
- ALMEIDA FILHO, R. & Paradella, W.R. Estudo do maciço alcalino de Poços de Caldas através de imagens Landsat com ênfase em mineralizações radioativas. Dissertação de mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, 1977.
- ALMEIDA, F.F.M. de – Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós paleozóico no Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 16 (4), p. 325-349, 1986.
- ALVES A. D. Rochas vulcanoclásticas do complexo alcalino de Poços de Caldas. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em mineralogia e petrologia. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, 2003.
- AMARANTE, E. M. S. Interpretação de seções de resistividade e cargabilidade aparente, Trabalho de graduação, Instituto de Geociências, UFBA, Salvador, Brasil, 2014.
- AMOS, R.; BLOWES, D. W.; BAILEY, B. L.; SEGO, D. C.; SMITH, L.; RITCHIE, A. I. M. Waste-rock hydrogeology and geochemistry. *Applied Geochemistry*, 57, p. 140-256, 2015.
- ANTERRIEU O, CHOUTEAU M, AUBERTIN M (2010) Geophysical characterization of the large-scale internal structure of a waste rock pile from a hard rock mine. *Bull Eng Geol Environ* 69: 533–548. <https://doi.org/10.1007/s10064-010-0264-4>
- "BIONDI, J. C. Cubagem e avaliação do depósito de urânio do Cercado (c -09). In: Relatório interno NUCLEBRÁS. Rio de Janeiro, RJ, 1976
- BRAGA, A. C. d. O. Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática, 2006.

- BURNHAN, C. W. Energy release in subvolcanic environments: Implications for breccia formation. *Economic Geology*, 80:1515-1522, 1985.
- CAPOVILLA, M. N. G. M. Urânio nos hidrotermalitos potássicos (“rocha potássica”) da Mina Osamu Utsumi, Complexo Alcalino de Poços de Caldas, MG. 2001. 227 p. Tese de doutorado em Mineralogia e Petrologia. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- CASAGRANDE, M. F. S. Investigação geofísica em pilha de rejeito afetada por processo de drenagem ácida na mina Osamu Utsumi, Poços de Caldas - MG. Dissertação de Mestrado. Universidade Paulista 'Júlio de Mesquita Filho, 2019.
- CASTRO, Eduardo de; LOUREIRO, Celso de Oliveira. Comportamento da concentração de espécies dissolvidas em drenagem ácida. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2006.
- CIPRIANI, M. Mitigação dos Impactos sociais e ambientais decorrentes do fechamento definitivo de minas de urânio. 2002. 334p. Tese de doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2002.
- COSTA, P. C. G.; Delgado, S. L.; Carmo, C. C. Projeto hidrogeoambiental das estâncias hidrominerais de Poços de Caldas, Companhia Mineradora de Minas Gerais - COMIG. Belo Horizonte, MG. 69p, 2001.
- CRUZ, W.B.; PEIXOTO, C.A.M. A Evolução química das águas subterrâneas de Poços de Caldas – MG. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 21, cap. 1, p. 23-33, 1991.
- DAWOOD, I.; AUBERTIN, M. A numerical investigation of the influence of internal structure on the unsaturated flow in a large waste rock pile. 62nd Canadian Geotechnical Conference and 10th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Specialty Conference, Halifax, Nova Scotia, 2009.
- ELLERT, R. Contribuição à geologia do maciço alcalino de Poços de Caldas. *Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo*. 5-63p, 1959.
- EVERETT, M. E. *Near-Surface Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 2013 pg 75.
- FAGUNDES, J.R.T. Balanço hídrico do bota – fora BF4 da mina Osamu Utsumi, INB, como subsídio para projetos de remediação de drenagem ácida. 2005, 121 p. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2005.

- FAGUNDES, J.R.T. Balanço hídrico do bota-fora BF4 da mina Osamu Utsumi, INB, como subsídio para projetos de remediação de drenagem ácida. 2005, 121 p. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2005.
- FALA, O.; MOLSON, J. W.; AUBERTIN, M.; BUSSIÈRE, B. Numerical modelling of flow and capillary barrier effects in unsaturated waste rock pile. *Mine Water Environment*, 24 (4), p. 172-185, 2005.
- FRAENKEL, M. O.; SANTOS, R. C.; LOUREIRO, F. E. V. L.; MUNIZ, W. S. Jazida de urânio no Planalto de Poços de Caldas – Minas Gerais. Principais depósitos minerais do Brasil, v. 1, Recursos Minerais Energéticos, MMe, DNPM e CVRD, Brasília, p. 89-103, 1985.
- FRANKLIN, M.R. Modelagem numérica do escoamento hidrológico e dos processos geoquímicos aplicados à previsão da drenagem ácida em uma pilha de rejeito da mina de urânio de Poços de Caldas – MG. 2007, 337 p. Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.
- GANDOLFO, O. C. B. Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa- Tese de Doutorado, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo- Instituto de Geociências, 2007.
- GARDA, G. M. A alteração hidrotermal no contexto da evolução geológica do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG-SP. 1990. 262p. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.
- GEOTOMO SOFTWARE. RES2DINV, version 3.53, Rapid 2D resistivity & IP inversion using the least-square method - Geoelectrical Imaging 2-D & 3D, Geotomo Software, Penang, Malaysia, 129 f, 2003.
- GONÇALVES, J. T. D. Utilização do método de eletrorresistividade para mapear agentes causadores de instabilidade de taludes no campus da ufba, Trabalho de graduação. Instituto de Geociências, UFBA, Salvador, Brasil, 2016.
- GRAY, N. F. 1997. Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. *Environmental Geology*, v. 30, p. 62–71, 1997.
- GURIN, G.; TARASOV, A.; ILYIN, Y.; TITOV, K. Time domain spectral induced polarization of disseminated electronic conductors: Laboratory data analysis through the Debye decomposition approach. *Journal of Applied Geophysics*, 98, p. 44-53, 2013.
- HALLOF, P. G. A comparison of the various parameters employed in the variablefrequency induced-polarization method. *Geophysics*, 1964.

- HOLMES, D. C.; PITTY, A. E.; NOY, D. J. Geomorphological and hydrogeological features of the Poços de Caldas caldera analogue study sites. *Journal of Geochemical Exploration*, 45, p. 215-247, 1992.
- HUPFER, S.; MARTIN, T.; WELLER, A.; GÜNTHER, T.; HUHN, K.; NGNINJIO, V. D. N.; NOELL, U. Polarization effects of unconsolidated sulphide-sand-mixtures. *Journal of Applied Geophysics*, 135, p. 456-465, 2016.
- IAEA, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Descommissioning of Nuclear Facilities 2006. Site:<https://wwwns.iaea.org/downloads/rw/projects/r2d2/workshop2/lectures/decommissioning-process.pdf>. Acessado em 24/05/2021 às 16:06.
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Considerações sobre a evolução do bota-fora 4. Relatório n. 50. São Paulo: IPT, jun. 1984.
- KAZAKIS, N.; VARGEMEZIS, G.; VOUDOURIS, K. S. Estimation of hydraulic parameters in a complex porous aquifer system using geoelectrical methods. *Science of the Total Environment*, 550, p. 742-750, 2016.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. An introduction to Geophysical exploration. Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002, 429 p.
- KLEINMANN, R. L. P.; CREAMER, D. A.; PACELLI, R. R. Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation. *Mining Engineering*, p. 300-305, 1981.
- SKOUSEN JG, ZIEMKIEWICZ PF, MCDONALD LM (2018) Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies. *The Extractive Industries and Society* 6(1):241-249. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.09.008>
- KURAMOTO, Renato Y. Ribeiro; APPOLONI, Carlos Roberto. Uma breve história da política nuclear brasileira. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, vol.19, n.03, p.379-392, 2000.
- LIMA, H. M. Liability assessment: a tool for mine closure planning. University of Wales, Aberystwyth. PhD Tese. 196p, 2002.
- LIMA, H. M.; WATHERN, P. "Closure: a conceptual review". In: *Mining Engineering*, v. 51, n. 11, p. 41-45, 1999.
- LOKE, M. H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys. Online, 2001.

- LORENZ, V. Maars and diatremes of phreatomagmatic origin: a review: *Trans. Geol. Soc. South Africa, Pretoria*, 88:459-470, 1985.
- LORENZ, V.; McBirney, A. R.; Willians, H. An investigation of volcanic depressions: maars, tuffings, tuffcones and diatremes. In: NASA. Research Grant Report NGR 38-003-012. Houston, 1970.
- LUZ, A. B. da, DAMASCENO, E. C. Desativação de minas. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq. 18p. (Série Tecnologia Ambiental, 14), 1996.
- MACIEL, A. C. Formação de geólogos no Brasil e sua influência na prospecção, pesquisa e descoberta de jazidas de urânio. In: Gomes, C. B. (org). *Geologia USP – 50 anos*. Editora USP, São Paulo, 2007, 544 p.
- MAGNO JÚNIOR, L. B.. Osamu Utsumi Mine, Geologic Presentation. In: Relatório interno NUCLEBRÁS. Rio de Janeiro, RJ, 1985.
- Martín-Crespo T, Gómez-Ortiz D, Marín-Velázquez S, Martínez-Pagán P, Ignacio C, Lillo J, Faz A (2018) Geoenvironmental characterization of unstable abandoned mine waste rocks combining geophysical and geochemical methods (Cartagena-La Union district, Spain). *Eng Geol* 232:135–146. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.11.018>
- Martínez-Pagán P, Gómez-Ortiz D, Martín-Crespo T, Martín-Velázquez S, Martínez-Segura M (2021) Electrical resistivity imaging applied to waste rocks ponds: an overview. *Mine Water Environ.* <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00741-3>
- MENTE, A. J. Análise das informações sobre recursos hídricos subterrâneos no país. Relatório técnico 015, jun. Projeto de assistência técnica ao setor de energia. Mente, Albert. J. Mendo Consultoria. Ministério de Minas e Energia e Banco Mundial, 2009.
- MENTE, A; MONTALVERNE, A.F. Mapa hidrogeológico do Brasil na escala 1:2.500.000. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, 4., 1981, Fortaleza. Anais... Fortaleza: ABRH, 1981. V.1, p. 597-610, 1981.
- MILSON, J. *Field Geophysics*. Wiley, England, 232 p., 2003.
- MIYASAKI, G. S. Plano de recuperação de áreas degradadas – PRAD, RT-006\_099-515-3023\_01-J. Parecer Técnico DIFOR número 01/14, 2014.
- MORAES, F. T.; JIMÉNEZ-RUEDA, J. R. Fisiografia da região do planalto de Poços de Caldas, MG/SP. *Revista Brasileira de Geociências*, 38 (1), p. 196-208, 2008.

MOREIRA, C. A., LAPOLA, M. M., CARRARA, A. Comparative analyzes among electrical resistivity tomography arrays in the characterization of flow structure in free aquifer. *Geofísica Internacional*, vol. 55, 2, p. 119 – 129, 2016.

MOTOKI, A; VARGAS T.; CHIANELLO E.; CORREA F. J. G; OLIVEIRA J. L. S.; KLOTZ M. Nível de denudação atual do Complexo Alcalino de Poços de Caldas (MG/SP). Departamento de Geologia/Geofísica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ. *Boletim de Congresso Brasileiro de Geologia*, 1988.

MOYÉ, J.; PICARD-LESTEVEN, T.; ZOUHRI, L.; AMARI, K. E.; HIBTI, M.; BENKADDOUR, A. Groundwater assessment and environmental impact in the abandoned mine of Kettara (Morocco). *Environmental Pollution*, 231, p. 899-907, 2017.

NASCIMENTO, M. R. L. Remoção e recuperação de urânio de águas ácidas de mina por resina de troca iônica. 1998. 93 p. Dissertação de mestrado em Química Analítica. Departamento de Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 1998.

NÓBREGA, F. A. Análise de múltiplas variáveis no fechamento de mina – Estudo de caso da pilha de rejeito BF-04, Mina Osamu Utsumi, INB Caldas, Minas Gerais. 2007. 86 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral. Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2007.

NORDSTROM, D. K.; BLOWES, D. W.; PTACEK, C. J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update. *Applied Geochemistry*, 57, p. 3-16, 2015.

NUNES, D.R. Comportamento geotécnico de pilha de rejeito formada pelo método de disposição por correia. 2014. 112p. Dissertação de mestrado em Engenharia Mineral. Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2014.

OLIVEIRA FILHO, W. L. Anotações de Aula. Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto (MG), Brasil, 2010.

PAES, R. A. S.; MOREIRA, C. A.; ILHA, L. M. Tomografia elétrica e modelagem pseudo 3D aplicada na reavaliação de uma ocorrência de cobre, Bacia do Camaquã. VIII Simpósio Brasileiro e Geofísica, 2018.

POISSON J, CHOUTEAU M, AUBERTIN M, CAMPOS D (2009) Geophysical experiments to image the shallow internal structure and the moisture distribution of a mine waste rock pile. *J Appl Geophys* 67:179-192. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.10.011>

- PORCIÚNCULA, R. J; LIMA; O. A. L.; LEAL, L. R. B. Método geoeétrico - potencial instrumento para auxílio da gestão do solo e dos recursos hídricos subterrâneos: estudos de caso, Alagoinhas, Bahia. XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2016.
- POWER, C.; TSOURLLOS, P.; RAMASAMY, M.; NIVORLIS, A.; MKANDAWIRE, M. Combined DC resistivity and induced polarization (DC-IP) for mapping the internal composition of a mine waste rock pile in Nova Scotia, Canada. *Journal of Applied Geophysics*, 2018.
- REYNOLDS, D. L. Fluidization as a geological process and its bearing on th e problem of intrusive granites. *Amer.Jour. Sci.*, New Haven: J.D.& E. S. Dana, v.252, 1954.
- REYNOLDS, J. M. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Chichester John Wiley and Sons Ltd. 796p, 1997.
- RIZZINI, C. T. *Tratado de fitogeografia do Brasil: aspectos sociológicos e florísticos*. 1ª ed. São Paulo: HUCITEC, Editora da Universidade de São Paulo, 2º volume, 374 p, 1979.
- SADOWSKI, G. R; DIAS NETO, C. M. O lineamento sismo-tectônico do Cabo Frio. *Rev. Bras. Geoc.*, 11(4):209 - 212, 1981.
- SAMARCO MINERAÇÃO S.A, *Technical Description For an Exemplary Fully Mobile Dumping System*, THYSSENKRUPP Fördertechnik Latino America, 2010.
- SCHORSCHER. H.D.; SHEA, M.E. The regional geology of the Poços de Caldas alkaline complex: mineralogy and geochemistry of selected nepheline syenites and phonolites. *Journal of Geochemistry Exploration*, 45, p.25-51, 1992.
- SEIDEL, K.; LANGEM G. *Direct Current Resistivity Methods*. In: KNÖDEL, K.; LANGE, G.; VOIGT, H. J. *Environmental Geology – Handbook of fields methods and case studies*. Springer, 2007. Cap. 4.
- SENGUPTA, M. *Environmental impacts of mining – monitoring, restoration, and control*. Lewis Publishers, v. 1, p. 167-259, 1993.
- SIMATE, G. S.; NDLOVU, S. Acid mine drainage: Challenges and opportunities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, p. 1786-1803. 2014.
- SUMNER, J. S. *Principles of Induced Polarisation for Geophysical Exploration*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1976.

TARGA, D. A.; MOREIRA, C. A.; CAMARERO, P. L.; CASAGRANDE, M. F. C.; ALBERTI, H. L. C. Structural analysis and geophysical survey for hydrogeological diagnosis in uranium mine, Poços de Caldas (Brazil). SN Applied Sciences, 1:299. 2019.

TEDESCHI, L. R. Hidrogeoquímica e hidrologia do reservatório na cava da mina Osamu Utsumi do Complexo Mínero-Industrial do Planalto de Poços de Caldas, Caldas, MG. 2005, 234 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental, Ouro Preto, 2005.

TELFORD, W. M. et al. Applied Geophysics. Cambridge University Press, New York, 2ed, 1990.

ULBRICH, H.H.G.J. A petrografia, a estrutura e o quimismo de nefelina sienitos do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG-SP. 1984, 530 p. Dissertação de mestrado – Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências. São Paulo, 1984.

ULBRICH, H.H.G.J; VLACH, S.R.F.; ULBRICH, M.N.C; KAWASHITA, K. Penecontemporaneous, syenitic-phonolitic and basic-ultrabasic-carbonatitic rocks at the Poços de Caldas Alkaline Massif, SE, Brazil: geologic and geochronologic evidence. Revista Brasileira de Geociências, v.32, n.1, p.15-36, 2002.

WABER, N.; Schorscher, H. D.; Peters, T. Mineralogy, petrology and geochemistry of the Poços de Caldas analogue study sites, Minas Gerais, Brazil. Poços de Caldas Report N2, 514p, 1991.

WIJKMAN, L. O. Caracterização química e radiológica dos rejeitos provenientes da mineração de urânio do Planalto de Poços de Caldas. 98t; Dissertação (Mestre em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

ZALÁN, P.V. & OLIVEIRA, J.A.B. - Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. B. Geoci. Petrobras, v. 13, n. 2, p. 269-300, 2005.