

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

**ESTUDO GAMAESPECTROMÉTRICO EM PILHA DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE
URÂNIO**

Letícia Alves Fontoura

Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro (SP)

2021

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

LETÍCIA ALVES FONTOURA

ESTUDO GAMAESPECTROMÉTRICO EM PILHA DE REJEITO
DE MINERAÇÃO DE URÂNIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Geólogo.

Rio Claro (SP)

2021

F684e Fontoura, Letícia Alves
Estudo gamaespectrométrico em pilha de rejeito de
mineração de urânio / Letícia Alves Fontoura. -- Rio
Claro, 2021
49 f. : il., tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado -
Geologia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: César Augusto Moreira

1. Drenagem ácida. 2. Pilhas de rejeito. 3.
Gamaespectrometria. 4. Passivo ambiental. 5. Geofísica. 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.

LETÍCIA ALVES FONTOURA

ESTUDO GAMAESPECTROMÉTRICO EM PILHA DE
REJEITO DE MINERAÇÃO DE URÂNIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Geólogo.

Comissão Examinadora


Prof. Dr. César Augusto Moreira (orientador)

Msc. Fernanda Teles Gomes Rosa

Msc. Pedro Lemos Camarero

Rio Claro, 12 de março de 2021.

Assinatura do(a) aluno(a)


Assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu orientador, César, que sempre me ajudou, auxiliou em todas as minhas dúvidas e me guiou para a melhor execução do projeto.

Gostaria de agradecer à FAPESP pelo auxílio monetário.

Gostaria de agradecer aos funcionários da INB, que sempre se fizeram dispostos a ajudar no trabalho de campo.

Gostaria de agradecer ao Matheus, pelo auxílio na organização dos dados e à Anna, pelas discussões sobre o tema.

Gostaria de agradecer minha irmã, pela ajuda em várias etapas da escrita do trabalho e formatação.

Gostaria de agradecer meu namorado, Gabriel, que além de sempre me apoiar, sempre teve paciência quando estava estressada e ansiosa, compreendendo e me ajudando emocionalmente.

Gostaria de agradecer, principalmente, meus pais, que sem eles nada seria possível. Sempre me apoiando e não me deixando desistir dos meus sonhos, considerando minhas lutas e conquistas como as deles. Sempre fazendo esforços para que eu tivesse o melhor apoio durante a minha graduação.

E claro, agradeço a Deus, sempre me abençoando e me guiando pelo melhor caminho.

RESUMO

O setor mineral possui grande importância na economia mundial. No entanto, na extração de minérios de origem hidrotermal é comum produzir grandes pilhas de rejeitos que contêm sulfetos. Esses, quando expostos a condições atmosféricas sofrem hidratação e são oxidados e é produzida a drenagem ácida de mina (DAM). Tal fenômeno é caracterizado pela redução do pH devido à oxidação do S^{2-} em SO_4^{2-} que, em contato com a água produz ácido sulfúrico e aumenta a mobilidade dos metais pesados e de elementos radioativos derivados da rocha ou da pilha de rejeito. Esses contaminantes podem ser transportados e atingir um sistema de drenagem ou águas subterrâneas. A drenagem ácida de mina é um dos problemas ambientais enfrentados na mina de extração de urânio Osamu Utsumi, pertencente às Indústrias Nucleares do Brasil (INB) em Poços de Caldas – MG. Durante a lavra da mina, os rejeitos foram depositados sem preparação do terreno e sob os Córregos do Cercado (BF-08) e da Consulta (BF-04), o que faz com que a situação seja agravada. O bota-fora estudado foi o BF-08. Através da gamaespectrometria, o presente trabalho avaliou as emissões radioativas na superfície a partir do decaimento dos isótopos radioativos de U, Th, K e identificou as porções com altas concentrações, que poderiam estar relacionadas aos núcleos de geração de DAM por conta da sua associação com os sulfetos. Como produtos, foram gerados mapas de concentração de U, Th e K. Foi encontrada na zona leste do BF-08 alta concentração de U e Th, possível indicativo de uma porção de uma zona mineralizada e de alto K, uma região muito próxima às zonas de mineralização devido às alterações causadas pelo hidrotermalismo. Na região noroeste foi depositada rocha estéril, pois todos os parâmetros possuem baixa concentração, o que não indica proximidade com a zona mineralizada.

Palavras-chave: Drenagem ácida; Pilhas de rejeito; Gamaespectrometria; Passivo ambiental

ABSTRACT

The mineral sector has a great importance in the global economy. However, in the extraction of minerals of hydrothermal origin it is common to produce large tailing piles containing sulfides. Those, when exposed to atmospheric conditions are hydrated and oxidized, generating acid mine drainage (AMD). Such phenomenon is characterized by a pH reduction due to the oxidation of S^{2-} to SO_4^{2-} which, in contact with water, produces sulfuric acid and increases the mobility of heavy metals and radioactive elements derived from rock or the tailing piles. These contaminants can be transported and reach a drainage system or groundwater, polluting such waters. Acid mine drainage (AMD) is one of the environmental problems faced at Osamu Utsumi uranium mine, owned by Indústrias Nucleares do Brasil (INB) in Poços de Caldas-MG. During the extraction of minerals, the waste pile was laid up without preparing the ground and under the Cercado's (BF-08) and Consulta (BF-04) Stream, further aggravating the situation. The tailing pile studied was BF-08. Through gamma-ray method the work analyzed the evaluation of possible radioactive emanations in surface due to radioactive decay of radioactive isotopes of U, Th and K, recognizing places with high concentrations, that can be related to AMD because of its association with sulfides. As products, maps of concentration of U, Th and K were made. It was found on BF-08 east zone a high concentration of U and Th, suggesting a possible portion of a mineralized zone and with high values of K, suggesting a portion very close to mineralized zones due to hydrothermally altered zones. The northwest region was laid up a sterile rock because all parameters had low concentration, not suggesting closeness to mineralized zone.

Keywords: Acid drainage; Tailing piles; Gamma ray spectrometry; Environmental liability

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Produção e demanda mundial anual de Urânio (1949 – 2017)	8
Figura 2 – Localização da Mina Osamu Utsumi e a área de estudo, BF-8.	11
Figura 3 - Complexo Industrial da INB e bacia hidrográfica do local.	13
Figura 4 - Climograma da região de Poços de Caldas – MG.	16
Figura 5 - Localização do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, a sudeste a Mina do Cercado (futura Mina Osamu Utsumi).	17
Figura 6 - Modelo de Formação do Complexo Alcalino de Poços de Caldas.....	18
Figura 7 - Esquema dos tipos de minério encontrado na Mina Osamu Utsumi. Minério tipo A: origem hidrotermal, primário, localizado em pipes e dique de fluidização. Minério tipo B: origem hidrotermal, primário, minério de U-Mo-Zr disseminado. Minério tipo E: origem supergênica, secundário, localizado na superfície.....	20
Figura 8 – Vista da porção leste do BF-08 e cava da MOU.....	22
Figura 9 - Desenho esquemático da construção por ponta de aterro.	22
Figura 10 - Ilustração esquemática dos fatores que afetam a oxidação de sulfetos e modificam a drenagem de mina durante o transporte.	25
Figura 11 - Formação de DAM em pilha de estéril.....	26
Figura 12 - Típico espectro de raio gama. São mostradas as janelas de energia convencionais para os elementos de K, U e Th.....	31
Figura 13 – Malha de pontos coletados	33
Figura 14 – Vista da porção norte do BF-08, drenagens ao fundo.....	34
Figura 15 - Aquisição de dados com o Gamaespectrômetro	34
Figura 16 – Medição e interpolação de dados radiométricos	35
Figura 17 – Mapa de concentração de K (%)	36
Figura 18 – Mapa de concentração de Tório (ppm)	37
Figura 19 – Mapa de concentração de Urânio (ppm)	37
Figura 20 – Níveis de visualização do modelo pseudo 3-D de Resistividade e Cargabilidade	41

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Minerais associados a geração de DAM	23
Tabela 2 - Janelas de energia padrão de raios gama recomendado pelo mapeamento de radioelementos.....	31

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS.....	8
2. OBJETIVOS.....	10
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	11
3.2 LOCALIZAÇÃO, HISTÓRICO E OPERAÇÃO DA MINA OSAMU UTSUMI	11
3.3 CARACTERÍSTICAS FISIOGRAFICAS	15
3.3.1 Clima	15
3.3.2 Hidrografia	16
3.4 GEOLOGIA REGIONAL	17
3.5 GEOLOGIA LOCAL E METALOGÊNESE	19
3.6 HIDROGEOLOGIA LOCAL.....	21
3.7 BOTA FORA – 8.....	22
4. CONCEITOS FUNDAMENTAIS	23
4.1 DRENAGEM ÁCIDA DE MINA	23
4.1.1 Drenagem ácida em pilhas de rejeito	26
4.1.2 Impactos ambientais.....	27
5. EMBASAMENTO DE ESTUDO	27
6. MATERIAIS E MÉTODOS	29
6.1 FUNDAMENTAÇÃO DO MÉTODO DA GAMAESPECTROMETRIA.....	29
6.1.1 Método da Gamaespectrometria.....	29
6.2 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTOS DOS DADOS.....	32
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
8. CONCLUSÃO	43
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

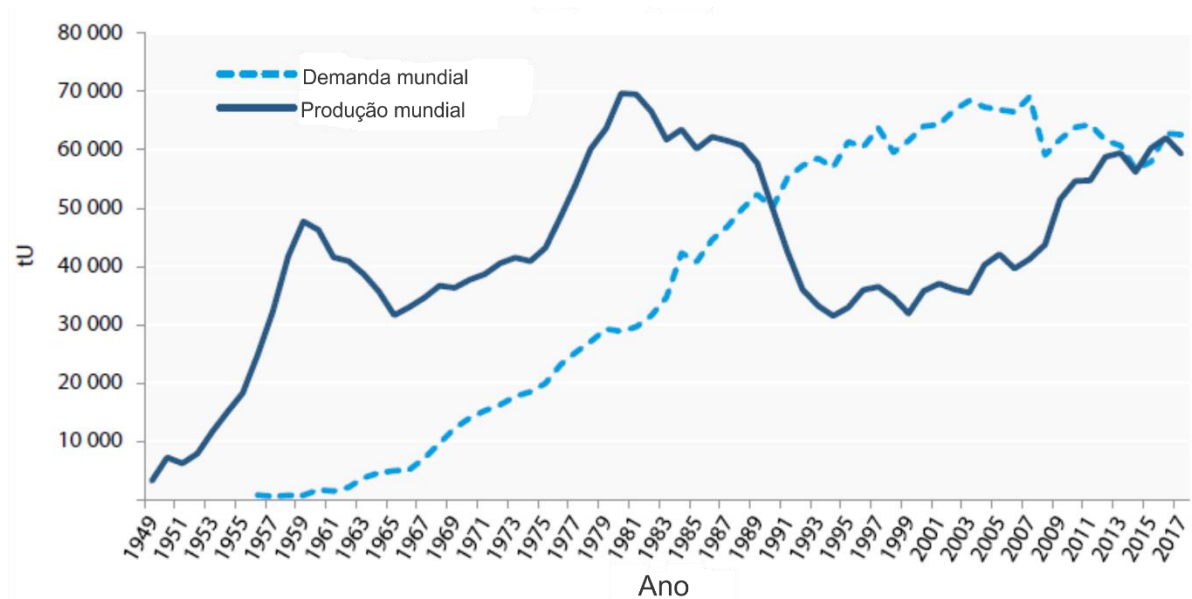
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

A exploração econômica de bens minerais provoca grandes alterações no meio ambiente. No processo da busca pelo minério, como a extração e o beneficiamento, são produzidos grandes volumes de materiais estéreis e rejeitos, que não possuem significância econômica, mas que são potenciais geradores de problemas ambientais.

O Brasil possui três plantas nucleares, Angra I, II e III. Angra I necessita cerca de 150 tU/ano para abastecer o reator de 630MWe, Angra II de 220 tU/ano para abastecer o reator de 1245 MWe de capacidade. A planta de Angra III iniciará suas operações em 2026 e a estimativa de sua demanda será de 200 tU/ano. Até 2030, é esperado que seja atingido cerca de 5000MWe de energia de origem nuclear (IAEA & NEA, 2018).

No contexto mundial, o urânio é e permanecerá como um recurso para geração de energia nuclear. A dependência mundial dessa *commodity* pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 – Produção e demanda mundial anual de Urânio (1949 – 2017)



Fonte: IAEA & AEA, 2018

Dessa forma, a procura por reservas e sua posterior extração, ainda estará presente por muitos anos. Essas atividades podem causar intensos impactos ambientais e que podem perdurar por centenas de anos caso não sejam estudadas e compreendidas para encontrar formas de amenizar seus impactos.

O termo “hidrotermal” se refere a reações heterogêneas na presença de solventes aquosos ou mineralizadores, sob condições de alta pressão e temperatura, que dissolvem e recristalizam materiais que são relativamente insolúveis em condições normais (BYRAPPA & YOSHIMURA, 2001). Na extração de minérios de origem hidrotermal, é comum a ocorrência de grandes pilhas de rejeito de minerais sulfetados. Uma pilha de rejeito consiste no empilhamento de materiais obtidos pelo beneficiamento do minério, materiais estéreis e materiais que não possuem importância econômica. Essas pilhas quando ricas em minerais sulfetados (comuns em depósitos de origem hidrotermal) são expostas a condições atmosféricas, estão susceptíveis condições atmosféricas, o que provoca a oxidação desses sulfetos e acidificação da água do meio. O pH baixo faz com que os metais pesados que antes estavam estáveis se tornem móveis, como Cd, Cr, Mn, Mo, Zn e U (INAP, 2012). A mina de urânio Osamu Utsumi em Poços de Caldas-MG se enquadra nesse caso.

A área estudada é um objeto de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) em conjunto com o IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) e o CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear). No presente projeto existe uma contribuição social, pois a empresa necessita de pesquisas para tomar atitudes que diminuam os impactos causados pela mineração. Tal atividade foi finalizada em 1995 (CIPRIANI, 2002) e atualmente está em descomissionamento e monitoramento ambiental.

O trabalho foi realizado na mina Osamu Utsumi, na pilha de rejeito BF-8, em Poços - MG, pertencente às Indústrias Nucleares do Brasil (INB).

O BF-8 já foi objeto de estudos geofísicos, como Eletrorresistividade e Polarização Induzida, no qual foram determinadas as zonas de acúmulo de água, caminhos preferenciais de fluxo da água, zonas de geração de drenagem ácida através da alta salinidade da água (BUCHI et al, 2020). Também foram definidas zonas mais suscetíveis a lixiviação e consequente geração de drenagem ácida em função dos núcleos sulfetados definidos pelos altos valores de cargabilidade e sua interação com as zonas saturadas (TARGA, 2020).

Nesse contexto, a gamaespectrometria foi escolhida para ser aplicada na BF-8 da mina Osamu Utsumi, devido à presença de minerais de urânio, tório e potássio. Esses elementos são radioativos e emitem radiação gama quando sofrem decaimento ou quando seus minerais sofrem quebra nos núcleos de geração de drenagem ácida. Dessa forma, o gamaespectrômetro detectou essas radiações e identificou núcleos com altas e baixas concentrações desses elementos. O objetivo desse trabalho foi identificar as zonas de geração de drenagem ácida a partir dos locais de quebra de minerais que possuem elementos radioativos em sua estrutura (Urânio), como a uraninita, pechblenda e zircão uranífero.

2. OBJETIVOS

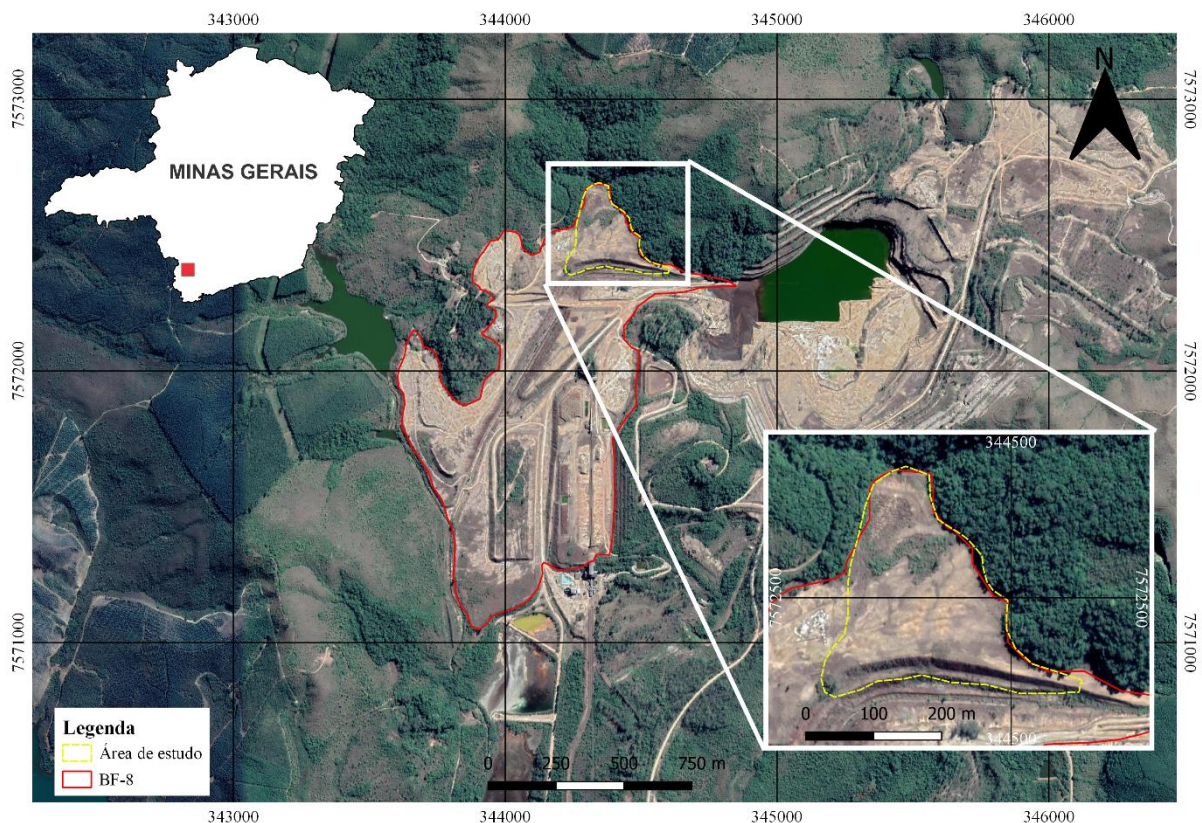
O objetivo desse trabalho foi realizar uma análise de emissões radioativas na pilha de rejeito de mineração de urânio, a qual possui sulfetos associados e mapear as potenciais zonas de geração de drenagem ácida de mina.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.2 LOCALIZAÇÃO, HISTÓRICO E OPERAÇÃO DA MINA OSAMU UTSUMI

A mina Osamu Utsumi está localizada na região sudoeste do estado de Minas Gerais, próxima à fronteira com o estado de São Paulo (Figura 2). Está localizada no Complexo Alcalino de Poços de Caldas (ELLERT, 1959), no município de Caldas-MG. Estão próximas à mineradora as cidades de Andradas, Águas da Prata, Caldas, Ibitiura de Minas e Poços de Caldas. Em destaque, está a área de estudo, o Bota-fora 8.

Figura 2 – Localização da Mina Osamu Utsumi e a área de estudo, BF-8.



Fonte: Elaborado pela autora.

As atividades de lavra de minério de urânio são de monopólio da União. O complexo pertence à INB (Indústrias Nucleares do Brasil S. A.), o primeiro empreendimento de extração de minério de urânio no Brasil.

Nos anos 1940, o uso de minerais radioativos estava direcionado a indústria bélica. Já na década de 1950, seus fins foram modificados para o setor energético, como uma alternativa de melhor custo-benefício (PRADO, 1994). Com o aumento da demanda energética devido ao

desenvolvimento econômico, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) em conjunto com a Eletrobrás, analisaram essa nova forma de geração de energia elétrica e se iniciaram projetos de prospecção geológica em 1964. Com a crise do petróleo na década de 70, foi percebido que os recursos hídricos da região sudeste brasileira não eram suficientes para atender a demanda de energia. Nesse contexto, foi desenvolvido o Programa Nuclear Brasileiro e criada a Nuclebrás (PRADO, 1994).

A jazida Campo do Cercado (mina Osamu Utsumi), localizada no Complexo Mínero-Industrial do Planalto de Poços de Caldas (CIPC), foi descoberta em 1970, na qual foram realizadas sondagens e galerias de pesquisa, foi optada uma mineração a céu aberto (SOUZA, 1995). As operações de lavra se iniciaram em 1977 e em 1979 as obras civis e de instalação e sua operação foi iniciada em 1982. Em 1988 a Nuclebrás foi substituída pela Indústrias Nucleares Brasileiras S.A. (INB) e pela Urânio do Brasil S.A. (PRADO, 1994), devido a cortes de investimento que ocorreram a partir de 1983, a produção foi reduzida no CIPC (CIPRIANI, 2002). Em 1995 as operações de lavra foram finalizadas definitivamente. A principal atividade do CIPC foi a lavra e o beneficiamento do minério de urânio e a produção de diuranato de amônio (DUA), conhecido como “*Yellow Cake*”. Essa é matéria prima para a produção de combustível das centrais nucleares (FRANKLIN, 2007).

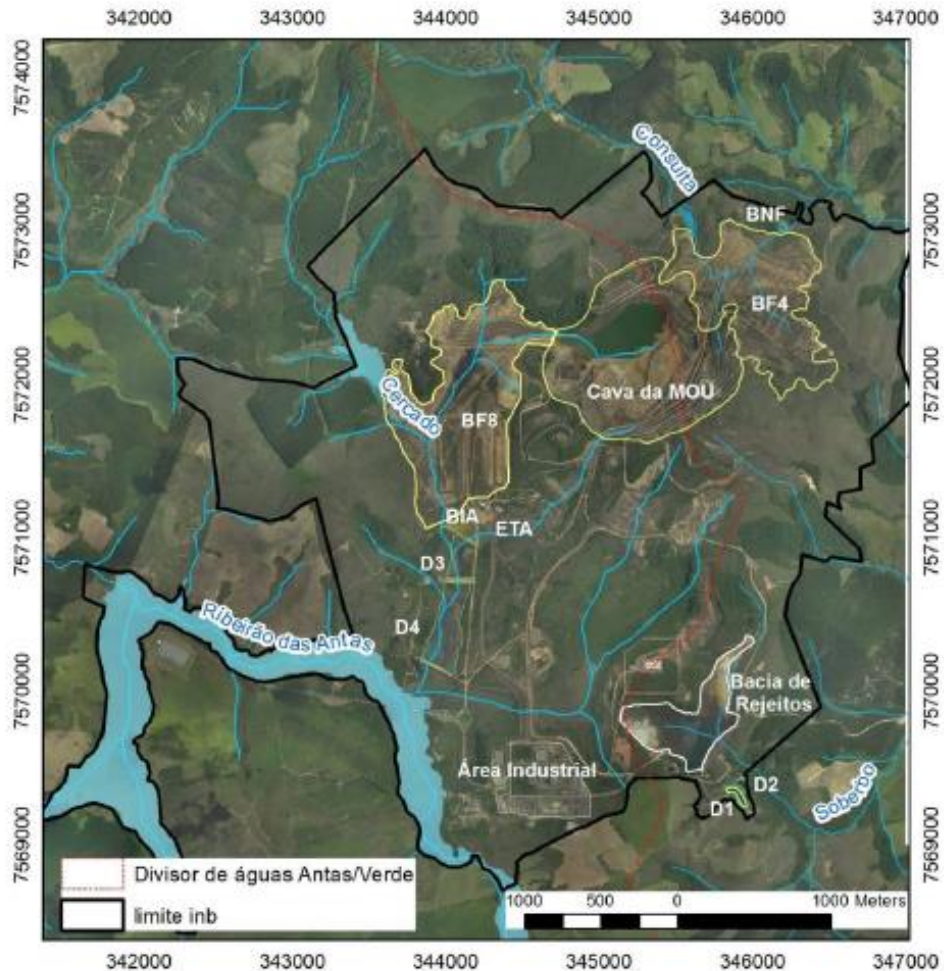
A INB é constituída pela cava da MOU, pilhas de estéril (Bota Fora), as principais são BF-4 e BF-8, a última objeto de estudo do trabalho, planta industrial de beneficiamento desativada, barragem de rejeitos, bacias de contenção de águas ácidas (D1, D2, D3, D4, D5 e D6), estação de tratamento de águas ácidas (ETA), reservatório de águas (Águas Claras). Essas estruturas podem ser observadas na Figura 3, além da rede hidrográfica do local.

A área que foi requerida para o empreendimento foi de 3193ha, dos quais 1800ha são da INB. A área construída da unidade industrial é de 30 mil m² e a de barragem de rejeitos é de 23ha. O projeto da usina era o tratamento de 2500t/dia de minério (700 mil t/ano) com teor de urânio solúvel de 680ppm de U e produção prevista de 650t/ano de diuranato de amônio, equivalente a 425tU/ano (CIPRIANI, 2002).

No entanto, a produção da mina foi menor do que o esperado. Foi estimada, inicialmente, uma escavação de 85 milhões m³ para produzir 5100tU. Após uma reavaliação da jazida em 1983, a escavação foi reduzida para 58 milhões m³. O teor de corte da mina determinado em 170 ppm de urânio solúvel, foi um fator que levou à baixa produção do empreendimento, pois as porções da jazida que estavam abaixo desse valor (grande parte dos corpos A e B) era considerado estéril e descartado nos bota-foras e bacias de rejeito. Dessa

forma, foi processado um minério com um teor menor do que o previsto e foram expostas grandes quantidades de minério de urânio nas pilhas de rejeito (CIPRIANI, 2002).

Figura 3 - Complexo Industrial da INB e bacia hidrográfica do local.



Fonte: Alberti (2017).

A lavra era feita a céu aberto. Durante o tratamento físico do minério, o minério lavrado era estocado no pátio de alimentação do britador primário, enquanto o material estéril era levado para o bota-fora, uma pilha a céu aberto. O britador primário reduzia a granulometria do material e, após esse procedimento, o minério era estocado em pilhas no pátio de estocagem classificadas pelo teor de urânio solúvel. Essas pilhas eram utilizadas para fazer um *blend*, para atingir o teor de alimentação da usina de 680 ppm de urânio solúvel. Esse material passava por uma britagem secundária, na qual era adicionado pirolusita (agente de oxidação da polpa ácida) e rocha fosfática (precipitar zircônio dissolvido na lixiviação). Em seguida, o material passava por um moinho de barras para redução da granulometria abaixo de 1,168mm (CIPRIANI, 2002).

Após o tratamento físico, o minério era submetido a um tratamento químico, no qual era feita uma lixiviação e em seguida ocorria uma separação de sólido-líquido. Em seguida era feita a concentração de urânio por solventes em baterias de misturadores/decantadores, com a precipitação de um concentrado de DUA (diuranato de amônio), conhecido como *yellow cake*, produto final gerado na unidade, que é seco e estocado em tambores metálicos. O refinado aquoso, produto da concentração por solventes e a água utilizada na precipitação do DUA, com urânio em sua composição, eram enviados para a estação de tratamento de rejeitos líquidos da usina (CIPRIANI, 2002).

Na produção de concentrado de urânio, nas atividades de mineração e beneficiamento, são extraídos aproximadamente apenas 20% da radioatividade, restante a maior parte (80%) nos sítios de mineração, nas bacias de rejeito (FRANKLIN, 2007). São gerados rejeitos sólidos, que são estéreis (teor de U_3O_8 abaixo de 170 ppm) e terras de desmonte. A pilha de estéril estudada (BF-8), possui um volume de $15m^3 \times 10^6$, uma superfície de $64,4m^2 \times 10^6$, o material depositado nela é da decapagem e triagem dos corpos A e E. (WIKMANN, 1998 *apud* FRANKLIN, 2007).

Segundo Cipriani (2002) durante a construção dos bota-foras os terrenos não foram preparados, o BF-4 depositado sobre o vale e leito do Córrego da Consulta e o BF-8 no vale e leito do Córrego do Cercado, ambos constituídos por minério de baixo teor de urânio. Eles foram construídos em disposição de camadas horizontais ou “pontas de aterros”, e na base possuem canais de drenagem que foram formados por matacões de rochas que rolaram até a base das pilhas.

Inicialmente, o rejeito líquido da mina sem tratamento, era bombeado por um canal construído no BF-8 até o córrego do Cercado e a drenagem ácida do BF-4 era lançada no córrego da Consulta. Após a constatação desse problema, a CNEN ordenou que esse material deveria ser tratado antes de ser eliminado nos córregos. Dessa forma, em 1983, foram construídas as bacias de captação das águas da mina e dos BF, para que fossem tratadas pela neutralização da acidez e precipitação dos radionuclídeos e metais pesados, além da decantação dos sólidos em suspensão. O DUCA (diuranato de cálcio) produzido no tratamento das águas começou a ser depositado na bacia de rejeitos. Em 1982, a Nuclebras desviou o córrego da Consulta que estava sob o BF-4 e em 1985 desviou o córrego do Cercado que estava sob o BF-8. Em 1989, foi construída a bacia de captação de água D5, que captava a drenagem ácida do BF-4 e direcionada para a cava da mina, com a redução da concentração de U, Al e Mn que anteriormente eram lançados no Córrego da Consulta e as bacias D3, D4 e D6 para captar a

drenagem ácida do BF-8, bombeada diretamente para a estação de tratamento de efluentes (CIPRIANI, 2002).

Na estação de tratamento de efluentes é feita a adição de cal, para elevar o pH acima de 10, e precipita Mn como pirolusita e hidróxidos de metais pesados e radioativos e sulfato de cálcio, posteriormente é adicionado floculante para acelerar decantação de sólidos. O produto tratado é colocado nas bacias de decantação D3 e D4, nas quais são adicionados mais cal, com neutralização das águas de surgência do BF-8 que não são captadas. Os transbordos destas bacias são lançados no Córrego do Cercado. As lamas produzidas no tratamento são depositadas na cava da mina (CIPRIANI, 2002).

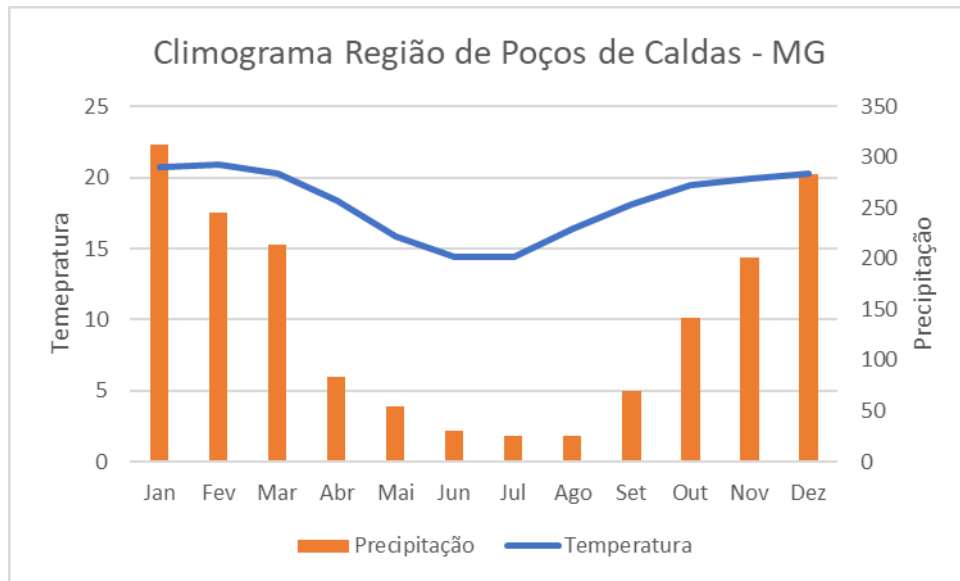
Após o encerramento das atividades, a INB busca aprovação do IBAMA para a produção de ETR (elemento de terras raras). No entanto, o órgão só aprova o licenciamento após a remediação da mina, e suas pilhas de rejeito, além da usina do CIPC. Também foi colocado como condicionante um sistema de gerenciamento de rejeitos (CIPRIANI, 2002).

3.3 CARACTERÍSTICAS FISIOGRAFICAS

3.3.1 Clima

A região possui altitude variável entre 1300m e 1600m acima do nível do mar. O clima característico é tropical de altitude, o qual possui duas estações bem definidas (FAGUNDES, 2005). A temperatura máxima é de 20,9°C no mês de fevereiro e a mínima de 14,4°C nos meses de Junho e Julho, com média de 18,2°C. Com relação à precipitação, no mês mais chuvoso, janeiro, a precipitação é de 312mm e nos meses mais secos, julho e agosto, de 25mm, com média anual de 140,5mm. Como é possível observar no climograma (Figura 4), durante o período de abril a setembro, é mais seco com temperaturas amenas e outubro a março, com altas taxas de precipitação e temperaturas mais altas.

Figura 4 - Climograma da região de Poços de Caldas – MG.



Fonte - Climograma feito pela autora com dados obtidos em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/pocos-de-caldas-2883/>

3.3.2 Hidrografia

O CIPC está localizado no divisor de águas de duas bacias hidrográficas, a bacia do Ribeirão das Antas e a bacia do Rio Verde. O Ribeirão das Antas recebe os córregos do Cercado, Pitangueiras, das Antas, Cachoeirinha e Aterrado. É utilizado para suprimento de águas do CIPC no qual foi construída uma barragem para reservatório e flui até a represa Bortolan no centro de Poços de Caldas. A água é utilizada para irrigação agrícola (10km iniciais) e minoritariamente para hidratação de bovinos. Já a água da represa Bortolan é utilizada para geração de energia hidroelétrica de pequeno porte, além do uso em pesca e passeios a barco (CIPRIANI, 2002).

A bacia do Rio Verde possui na área do CIPC o ribeirão Soberbo e seu afluente, o córrego da Consulta. O ribeirão Soberbo deságua no afluente do rio Verde, o rio Taquari. Próxima às margens do rio Verde está o distrito de Pocinhos de Rio Verde. A utilização da água é a mesma que a do ribeirão das Antas. Em um raio de 20km não há uso doméstico dessas águas (CIPRIANI, 2002).

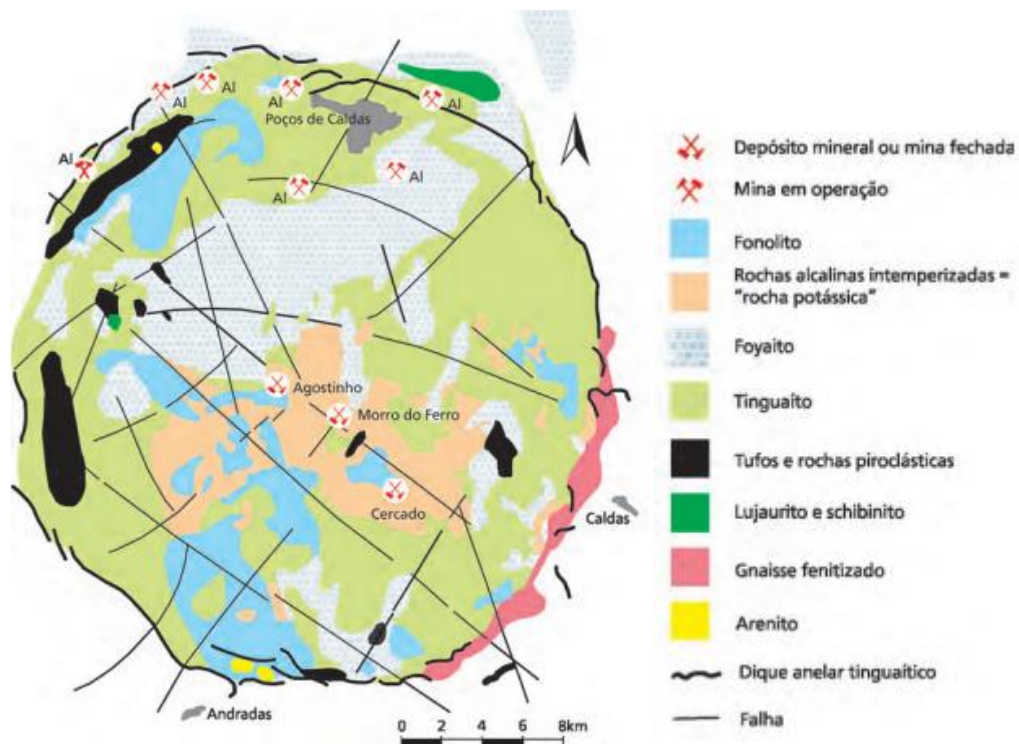
Segundo Franklin (2007), a área estudada possui aquíferos fraturados. O armazenamento e circulação significativa de água ocorre nas zonas do manto de alteração e no sistema de fraturas subjacentes. A alimentação desses aquíferos ocorre nos pontos de intersecção da rede de drenagem superficial com fraturas, ou por infiltrações verticais descendentes, no manto de alteração.

3.4 GEOLOGIA REGIONAL

A região de Poços de Caldas está inserida no contexto do Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil, denominado por Zalán & Oliveira (2005). Há cerca de 90Ma, durante a deriva da placa Sul-Americana para oeste, foi iniciada a manifestação de uma pluma mantélica na borda nordeste da Bacia do Paraná. Conforme o movimento da placa, os efeitos ocorriam em regiões mais a leste. Segundo Zalán & Oliveira (2005), tais efeitos da pluma se resumiam no soerguimento uniforme, maciço e gradual do embasamento cristalino, os quais eram marcados por centros vulcânicos/plutônicos de natureza alcalina. Como exemplos desses centros está a área estudada de Poços de Caldas.

A região de Poços de Caldas está localizada na divisa dos estados de Minas Gerais e São Paulo, na qual o maciço alcalino abrange Poços de Caldas-MG, Águas da Prata-MG, Caldas-MG e Andradás-MG (Figura 5).

Figura 5 - Localização do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, a sudeste a Mina do Cercado (futura Mina Osamu Utsumi).



Fonte: Modificado de Fraenkel et al. (1985), retirado de Biondi (2003).

Segundo Souza et al. (2013), geologicamente, o Complexo Alcalino de Poços de Caldas (CAPC) está situado na porção sul da Faixa Brasília, entre a Bacia do Paraná, a oeste e a Faixa

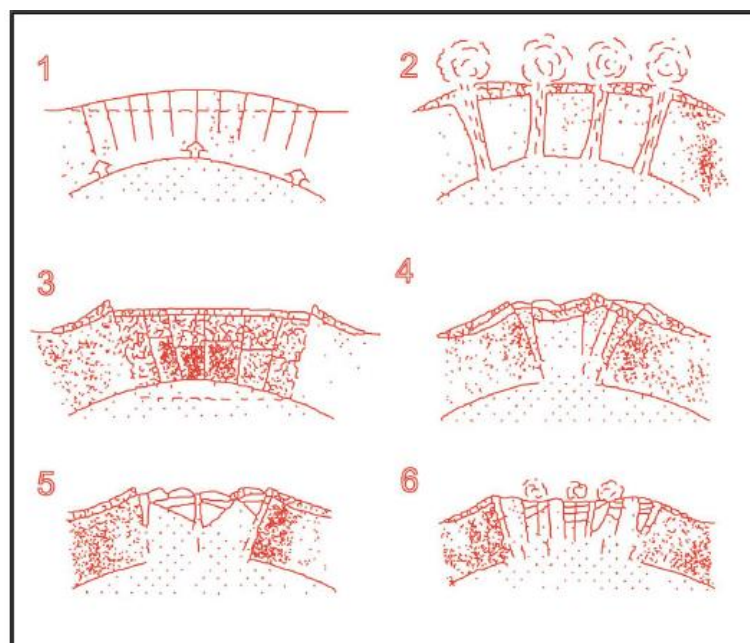
Ribeira na porção centro-oeste do lineamento magmático Cabo Frio, que segundo Loureiro & Santos (1998), possui relação genética com a direção das falhas profundas do arqueano, que foram disfarçadas durante o Ciclo Brasileiro e reativadas no Mesozoico.

O maciço possui forma elíptica e ocupa uma área de aproximadamente 800km², considerado uma das maiores ocorrências alcalinas do mundo (ELLERT, 1959). É composto por sedimentos, brechas e tufos, rochas efusivas e hipoabissais (ankaratrítos, lavas fonolíticas, tinguaítos e fonólitos), rochas plutônicas (foiaítos) (ELLERT, 1959).

Ellert (1959) esquematiza a evolução geológica de Poços de Caldas da seguinte forma (Figura 6):

- Levantamento: após sedimentação do arenito Botucatu, ocorreu um levantamento escalonado por falhas de blocos do embasamento cristalino;
- Atividade vulcânica: após ou durante o levantamento do embasamento, foram iniciadas as atividades vulcânicas alternadas em fases explosivas e efusivas, e foram depositadas sobre os sedimentos camadas de brechas, tufos e derrames de lavas ankaratríticas;
- Subsidência da parte central: abatimentos do edifício vulcânico;
- Ascensão do magma nefelinítico por fendas radiais e circulares e formação de fonólitos, tinguaítos e por diferenciação de foiaítos;
- Formação do dique anelar;
- Intrusão de chibinito, lujaurito e foiaíto, que acompanha e cruza o dique anelar.

Figura 6 - Modelo de Formação do Complexo Alcalino de Poços de Caldas



Fonte: Retirado de Doranti, 2013. Original de Ellert (1959).

As jazidas do CAPC se formaram por atividades hidrotermais, seguidas de processos de intemperismo profundos e laterização do solo, ocasionados pelas condições climáticas da região. Esses depósitos são de elementos terras raras (ETR), bauxita, urânio, molibdênio, zircônio, ferro, manganês, argilas refratárias. Essas mineralizações são associadas a brechas vulcânicas mineralizadas com zircão, baddeleyta, uraninita, pirita, esfarelita, galena, fluorita, jordisita (FRAENKEL et al., 1984; FRANKLIN, 2007).

3.5 GEOLOGIA LOCAL E METALOGÊNESE

A mina Osamu Utsumi está inserida no contexto de formação da caldeira vulcânica de Poços de Caldas, relacionada ao processo de fragmentação e deriva continental de idade Mesozóica, no qual houve ascensão de rochas pré-existentes, fragmentação da crosta, intenso vulcanismo e intrusão de diques anelares. A região conta com rochas alcalinas, como nefelina sienitos, tinguaitos, fonólitos e foiaítos (FAGUNDES, 2005).

Segundo Franklin (2007), o enriquecimento de urânio se deu através de eventos hidrotermais (mineralização primária), seguidos de processos intempéricos (mineralização secundária), os eventos hidrotermais foram os principais responsáveis. Foram concentrados minérios metálicos (sulfetos), minerais de urânio e molibdênio e enriquecimento potássico (CIPRIANI, 2002).

Na fase tectono-magmática, foiaítos intrusivos supersaturados, sofreram hidrotermalismo, os quais foram submetidos a altas pressões, as quais fazem com que a parte fluida do magma migre, com argilização de parte das rochas sobrejacentes observadas pela caolinita, halloysita e sericita. Minerais como fluorita e pirita foram depositados em pequenos veios e o urânio em poros das rochas como uraninita e pitchblenda, com um padrão de enriquecimento disseminado. Ainda na fase de mineralização primária, mas de menor expressão, ocorre o fenômeno de fluidização, no qual magmas encontraram níveis saturados de água, e geraram uma implosão e descompressão e rápida fluidização, e produziram uma brecha de matriz fina. Tais fluidos transportaram o urânio para as brechas, que se tornaram mineralizadas.

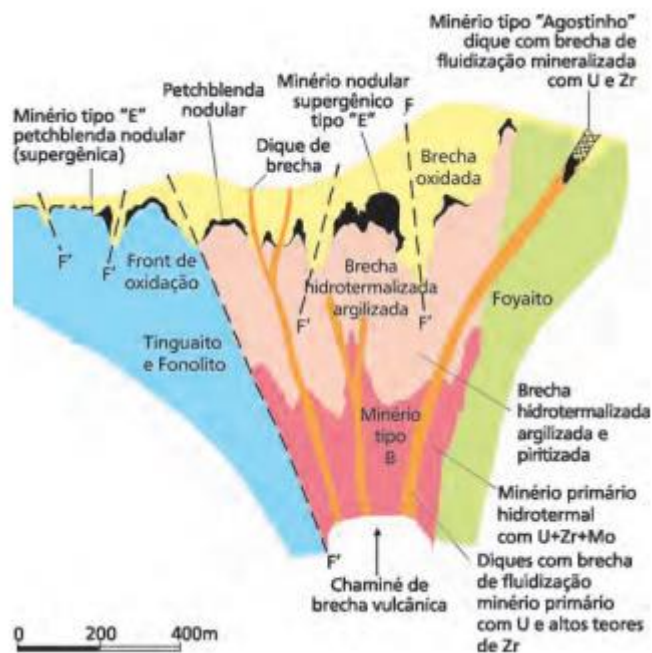
A nefelina é substituída pela sericita, em sua forma cristalina. A pirita e a fluorita estão disseminadas na rocha, na forma de preenchimento de cavidades ou vesículas, ou disseminadas na matriz das brechas. A caolinita ocupa fraturas e cavidades na rocha (CIPRIANI, 2002).

Já na mineralização secundária, o urânio primário localizado nos poros das rochas, foi oxidado e transportado por águas superficiais e depositado em zonas redutoras, na forma de UO_2 - UO_3 e seus produtos de oxidação (pitchblenda nodular) (FRANKLIN, 2007).

Segundo Cipriani (2002), os diferentes tipos de mineralizações presentes na mina foram divididos em dois grupos: mineralizações primárias, relacionadas a fenômenos de hidrotermalismo e mineralizações secundárias, ligadas ao avanço descendente de soluções intempéricas oxidantes. Em muitos casos, os minerais de urânio ocorrem com minerais de zircônio e molibdênio, fluorita e raramente esfalerita e galena. Segundo Biondi (2003), foram lavrados três tipos principais de minério: Minério tipo “A”, Minério tipo “B” e Minério tipo “E”. Para Cipriani (2002), respectivamente, Minério tipo “brecha de fluidização”, Minério tipo “B” e Minério tipo “E”.

Na Figura 7 é possível observar um esquema das diferentes mineralizações da mina.

Figura 7 - Esquema dos tipos de minério encontrado na Mina Osamu Utsumi. Minério tipo A: origem hidrotermal, primário, localizado em pipes e dique de fluidização. Minério tipo B: origem hidrotermal, primário, minério de U-Mo-Zr disseminado. Minério tipo E: origem supergênica, secundário, localizado na superfície.



Fonte: Retirado de Biondi (2003).

O Minério tipo “B” (60% da reserva) era disseminado, alojado no interior do cone de brechas, formado por hidrotermalismo em brechas e lavas tinguaiticas e fonolíticas. Os minerais de minério eram uraninita, zircão e molibdenita. Ganga com argilominerais, pirita e minerais

restantes das rochas hidrotermalizadas (BIONDI, 2003). O teor médio desse corpo era de 680ppm de U (CIPRIANI, 2002).

Minério tipo “brecha de fluidização” (10% da reserva) era composta por diques e *pipes* de brechas de fluidização, localizados preferencialmente no interior da chaminé de brecha e em encaixantes, compostas por diferentes litologias, cimentados em uma matriz de rocha pulverizada e lava fonolítica. Os corpos mineralizados continham uraninita, zircão uranífero, baddeleyita, molibdenita, pirita, esfalerita, galena e fluorita. Grande parte do urânio do minério estava na malha cristalina do zircão (0,5 e 1,5% de Zr) (BIONDI, 2003). O teor médio desse corpo era de 600ppm de U (CIPRIANI, 2002).

Minério tipo “E” (30%) era supergênico, nodular, gerado pela água meteórica oxidante. Essa água foi acidificada após oxidar a pirita presente nas rochas e gerou sulfatos e hidróxidos de ferro. A água ácida lixiviou o urânio que estava disseminado nas brechas e lavas, este foi concentrado na frente de oxidação (lado reduzido) na superfície que limita as rochas oxidadas e não oxidadas. O corpo mineralizado formado era irregular, descontínuo, são formados bolsões, com teores médios acima de 2% em U_3O_8 (BIONDI, 2003). O teor médio desse corpo é de 1000 ppm de U (CIPRIANI, 2002).

3.6 HIDROGEOLOGIA LOCAL

A mina Osamu Utsumi está localizada no divisor de águas entre a bacia do Rio das Antas e do Rio Verde. A área avaliada está em um contexto de aquíferos fraturados, os quais possuem armazenamento e circulação de água restritos a porções do manto de alteração e ao sistema de fraturas das rochas subjacentes (FRANKLIN, 2007).

Ao construir uma pilha de estéril, ela se torna parte do sistema hidrogeológico local e fica sujeita à infiltração de águas meteóricas, influência de corpos hídricos locais e escoamento superficial sazonal (FRANKLIN, 2007). Um aquífero poroso pode ser formado por rochas sedimentares consolidadas, solos arenosos ou sedimentos inconsolidados. A pilha de rejeito estudada consiste em material não compactado e se comporta como um aquífero poroso. A água que infiltra na pilha circula pelos vãos (poros) formados entre os sedimentos, ou entre fragmentos de rochas de diversos tamanhos. Essa movimentação é controlada pelas forças gravitacionais e capilares (DE PAULA, 2015, FRANKLIN, 2007).

Segundo Franklin (2007), a ampla variação granulométrica das pilhas de rejeito causa uma heterogeneidade no interior da pilha o que gera fluxos preferenciais provocados pelas mudanças de condutividade do material.

3.7 BOTA FORA – 8

O BF-8 é o maior bota fora da mina Osamu Utsumi, possui um volume de estéril de $14,8 \text{ m}^3 \times 10^6$ e uma superfície de 64,4ha. O material depositado nessa pilha de rejeito consiste em material de decapagem e materiais da triagem dos corpos A e E (CIPRIANI, 2002). O BF-8 e a cava da mina podem ser observados na Figura 8.

Figura 8 – Vista da porção leste do BF-08 e cava da MOU



Fonte: Autoria própria

Esse BF foi construído pelo método de avanço por ponta de aterro. Nunes (2014) descreve o processo de construção no qual um caminhão transporta o estéril e descarrega o material na crista da plataforma de trabalho, como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Desenho esquemático da construção por ponta de aterro.



Fonte: Modificado de Nunes (2014).

Em seus ensaios de caracterização, Murta (2006) afirma que essa pilha de rejeitos possui grande variação granulométrica, com material areno-siltoso que chega a matações na ordem de metros. Também conclui que é bastante permeável, devido, por exemplo, a heterogeneidade da matriz e a presença dos matações e apresentação de fissuras macroscópicas causadas pelos ciclos de umedecimento e secagem que geram alívios de tensões. A mesma autora afirma a presença de ortoclásio, muscovita e uma menor proporção de caulinita, no entanto, em sua análise não confirmou a presença de pirita, apenas pequenas concentrações de ferro. Foi interpretado que originalmente a concentração de pirita era maior no BF-8, no entanto ela foi intemperizada.

4. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

4.1 DRENAGEM ÁCIDA DE MINA

A drenagem ácida de mina (DAM) é um dos maiores problemas ambientais que ocorrem em certas atividades mineiras, pois ocorre a remoção de grandes volumes de rocha, para então extrair a porção que é economicamente viável. Durante esse processo, podem ser expostas rochas ricas em sulfetos, nas pilhas de rejeito ou na própria cava. Essas rochas são sujeitas a condições atmosféricas e ficam em contato com água e oxigênio. Segundo Akcil & Koldas (2006), em condições oxidantes, os minerais sulfetados são oxidados e formam ácidos e a água é acidificada.

Os principais minerais sulfetados que auxiliam na geração de drenagem ácida estão representados na Tabela 1. A pirita é o sulfeto de maior participação.

Tabela 1 - Minerais associados a geração de DAM

Mineral	Composição
Arsenopirita	$\text{FeS}_2 \cdot \text{FeAs}$
Bornita	CuFeS_4
Calcocita	Cu_2S
Calcopirita	CuFeS_2
Covellita	CuS
Galena	PbS
Millerita	NiS
Molibdenita	MoS_2
Pirita	FeS_2
Pirrotita	$\text{Fe}_{11}\text{S}_{12}$
Esfalerita	ZnS

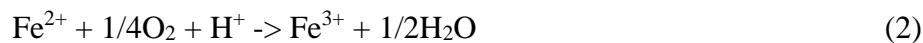
Fonte: Adaptado de Gray (1997)

As reações envolvidas, na quebra da molécula FeS₂, segundo Akcil & Koldas (2006) são as seguintes:

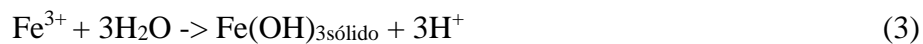
Nesta primeira equação, ocorre a oxidação do sulfeto, e são produzidos ferro dissolvido, sulfato e hidrogênio. Tais produtos indicam um aumento de sólidos totais dissolvidos e da acidez da água, o que reduz o pH.



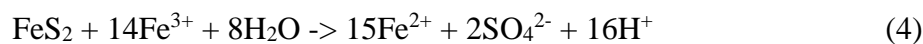
Se o ambiente estiver suficientemente oxidante, o íon ferroso será oxidado para férrico, representado pela seguinte equação:



Quando os valores de pH estão entre 2.3 e 3.5, o ferro férrico precipita como Fe(OH)₃ e jarosita, o que resta pouco Fe³⁺ na solução e ao mesmo tempo o pH é reduzido.



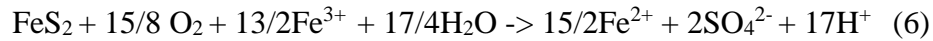
O Fe³⁺ que não sofreu precipitação como da Eq.(3) pode oxidar a pirita residual no ambiente. Nesse processo, são gerados ferro ferroso, o íon sulfato e liberação de H⁺ e a acidez é aumentada (AKCIL & KOLDAS, 2006).



Ao considerar tais reações básicas simplificadas, a geração de ácido que produz ferro e eventualmente precipita como Fe(OH)₃, pode ser representada pela junção das equações (1) e (3).



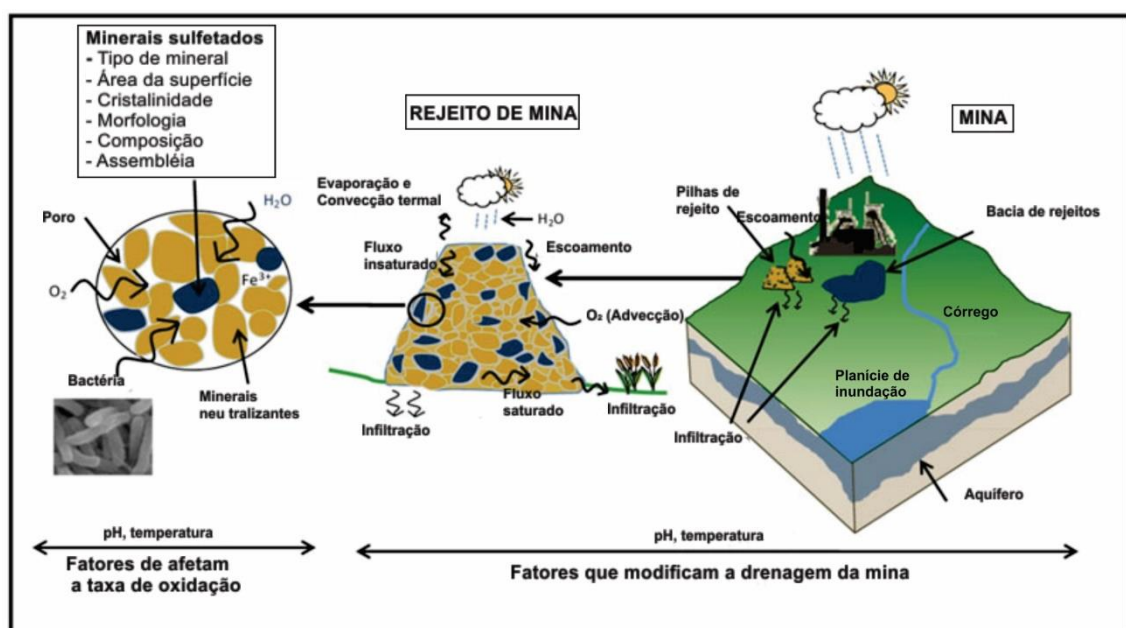
Por outro lado, a equação geral de estabilização do ferro férrico que oxida a pirita residual pela combinação das equações (1) e (3) é a seguinte:



Quando os valores de pH da água natural (4,5 - 8,0) se tornam ácidos (pH entre 2 e 3) os cátions metálicos, como Cu, Ni, Cd, Zn, Pb, Cr, Fe, Hg e Mn, que antes estavam estáveis na forma de sulfatos, hidróxidos, sulfetos ou carbonatos, se solubilizam e se tornam móveis e são transportados por águas superficiais e/ou subterrâneas, o que gera a contaminação do meio ambiente (PASTORE & MIOTO, 2000 citado por MURTA, 2006).

Segundo a INAP (Rede internacional de prevenção de ácidos, do inglês *International Network for Acid Prevention*) (2012), os fatores que estão diretamente envolvidos na taxa de oxidação de sulfetos são divididos em fatores químicos, físicos e biológicos (Figura 10). Esses são alguns aspectos, além de outros que contribuem nesse sistema, mas estão altamente envolvidos entre si. Como fatores físicos e químicos, influenciam o mineral de sulfeto (tipo de mineral, área de superfície, cristalinidade, morfologia, assembleia), o ambiente (pH, potencial de oxidação-redução, temperatura, fonte de água), oxidante (tipo de oxidante, oxigênio, ferro férrico, disponibilidade de oxidantes). Já como fatores biológicos está envolvida a disponibilidade de carbono (CO_2), doador de elétron (Fe^{2+} ou S), disponibilidade de nutrientes (N, F, para produção de biomassa), oxigênio (auxilia no crescimento de bactérias aeróbicas e é um elétron receptor, mata bactérias estritamente anaeróbicas) e a temperatura (maior crescimento de bactérias em aproximadamente 70°C) (INAP, 2012).

Figura 10 - Ilustração esquemática dos fatores que afetam a oxidação de sulfetos e modificam a drenagem de mina durante o transporte.

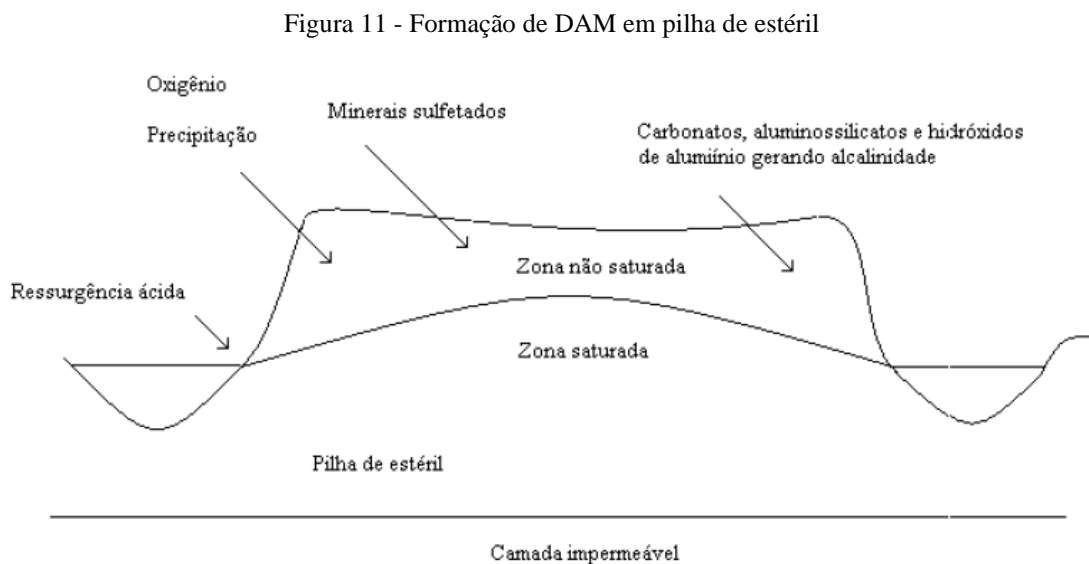


Fonte: Adaptado de INAP (2012).

O tempo para a produção de ácidos e poluição variam de 10 a 100 anos. No entanto, as medidas de controle adotadas pela operação da mina devem se manter efetivas após o fechamento da mina (RITCHIE, 1995).

4.1.1 Drenagem ácida em pilhas de rejeito

O processo de formação de drenagem ácida em uma pilha de estéril de saturação parcial é explicado por Pastore & Miotto (2000) na Figura 11.



Fonte: Retirado de Murta (2006) apud Pastore & Miotto (2000).

Na construção de uma pilha de rejeito, existe uma grande variabilidade granulométrica e mineral, o que caracteriza um meio heterogêneo e até mesmo anisotrópico. Pela possível presença de minerais sulfetados e a não uniformidade da disposição dos corpos, são condições favoráveis à geração de drenagem ácida, com a grande difusão de oxigênio e alta permeabilidade (FAGUNDES, 2005).

Em pilhas de alta permeabilidade, a difusão do oxigênio é elevada, o que facilita a oxidação dos minerais sulfetados presentes ali. Ocorre, então, um processo denominado “convecção”. Por ser uma reação exotérmica, a temperatura dentro da pilha pode ser elevada e conseqüentemente a pressão também é elevada. Isto causa maior absorção de oxigênio para o interior da pilha e aumenta a taxa de oxidação. Tal processo ocorre próximo aos taludes e na porção superior da pilha de estéril (SHINOBE & SRACEK, 1997 apud MURTA, 2006).

4.1.2 Impactos ambientais

A DAM afeta os sistemas de diversas formas, gera modificações diretas e indiretas em organismos que fazem parte do ecossistema. Os efeitos podem ser categorizados em químico, físico, biológico e ecológico. O impacto geral é a eliminação de espécies, a simplificação da cadeia alimentar e redução da estabilidade ecológica. A estrutura da comunidade entra rapidamente em colapso total, mesmo que nenhum poluente por si só tenha causado um grave impacto ecológico. Dessa forma, devido à redução de nicho, eliminação de habitat, mudanças no substrato, toxicidade dos sedimentos e bioacumulação de metais na fauna e flora, a recuperação se torna praticamente impossível (GRAY, 1997).

5. EMBASAMENTO DE ESTUDO

A geofísica é muito utilizada por ser relativamente de baixo custo e obter informações de subsuperfície de forma rápida para vários fins como hidrológico, geológico, ambiental etc. e correlacionáveis.

A gamaespectrometria é um método radiométrico, que mapeia as concentrações de radioelementos como Urânio, Tório e Potássio nas rochas e materiais alterados, a partir da radiação gama emitida por eles durante o decaimento de seus isótopos. A explicação do método será detalhada no item 6.1.1.

Hermann et al (2010) utilizou a gamaespectrometria para mapeamento de solo, com objetivo de determinar potenciais zonas de intervenção para novas práticas de agricultura. Os resultados mostraram que os solos derivados de rochas magmáticas emitem alta radiação, as sedimentares químicas baixa radiação e as clásticas valores intermediários.

Wilford (1997) realizou casos de estudos, nos quais identificou zonas de recarga e descarga de água subterrânea através do uso da gamaespectrometria. Em seu estudo, discorre que solos quartzosos muito porosos, desenvolvidos *in situ* de granitos, são potenciais zonas de recarga e facilmente distinguidos de solos mais densos pois tipicamente exibem valores de K e/ou Th/U mais altos. As zonas de descarga algumas vezes possuem assinaturas de raios gama, mas não sempre. No entanto, há evidências de que anomalias de U associadas a zonas de descarga podem ser relacionadas ao gás radônio dissolvido no lençol freático.

Para fins de prospecção mineral, Fornazzari Neto & Ferreira (2003) utilizaram a gamaespectrometria associada aos dados geológicos e metalogenéticos da Folha Botuverá, para

encontrar áreas de alteração hidrotermal e estabelecer relações com processos de mineralização de metais, com foco em mineralizações de ouro filoneano e determinar possíveis alvos exploratórios.

No trabalho de estudo de casos de Ribeiro et al (2013), a gamaespectrometria auxiliou na caracterização de duas assinaturas distintas no batólito de Santa Helena, localizado no estado do Mato Grosso, através das contagens de potássio, tório e urânio. Foram comparados esses dados com a topografia do local e foi observado que os altos topográficos coincidem com os altos radiométricos de K e U, no entanto regiões ao longo de zonas de aluvião, mesmo distantes dos corpos, também possuem altos radiométricos. Foi concluído que os radioelementos foram erodidos e depositados ao longo do córrego. No caso da região do Complexo Alcalino de Tapira, foi identificada uma forte anomalia com altas contagens de U e Th associadas à rocha alcalina e baixas concentrações de K, que condiz com o que era esperado para intrusões ígneas básicas (caso da rocha alcalina). Na região norte do complexo observaram três regiões com baixas concentrações dos três elementos, explicadas pela presença de lagoas de rejeito geradas por uma mineradora.

Na Mina Osamu Utsumi, nas pilhas de rejeito, já foram feitos estudos geofísicos relacionados à geração de drenagem ácida de mina, para melhor compreensão de sua origem. O trabalho de Casagrande *et al* (2019) foi feito na BF-04 e consiste na combinação de métodos como a eletrorresistividade e polarização induzida (IP). Nele, foram reconhecidos núcleos de geração do processo de drenagem ácida, indicados por anomalias de alta cargabilidade, que estão associadas a sulfetos disseminados na pilha ou na própria rocha, além de entender o fluxo subterrâneo no aquífero. Alberti (2017) fez um estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas que foram impactadas pela drenagem ácida dessa mesma mina. Com o intuito de entender os processos relevantes na geração de drenagem ácida a partir dos rejeitos de mineração da BF-04, Franklin (2007) produziu modelos que simulam os processos hidrológicos e geoquímicos, que representam as condições de funcionamento do sistema.

Atualmente existem poucos trabalhos com a utilização do método gamaespectrométrico para fins ambientais pois sua aplicação usual é em prospecção mineral de minerais radioativos. No presente estudo seu uso consiste na verificação da possibilidade de emissão radioativa em superfície dos núcleos de rejeito que são relativamente ricos em K, Th e principalmente U, independente de sua origem genética.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 FUNDAMENTAÇÃO DO MÉTODO DA GAMAESPECTROMETRIA

O estudo da radioatividade teve contribuição de diversos estudiosos, como Marie e Pierre Curie, Rutherford, Frederick Soddy, F. Joliot, Sir Chadwick, Niels Bohr, entre outros. Após a descoberta da radioatividade, iniciaram estudos para descobertas de técnicas para a medição desse fenômeno. No início do século XX, foram construídos tais equipamentos e com o passar o tempo suas medições se tornaram mais precisas devido ao desenvolvimento de cintilômetros na década de 40 pois possuíam maiores sensibilidades (RIBEIRO et al, 2013).

Inicialmente, a busca por urânio era principalmente para finalidade bélica e foi preciso intensificar as pesquisas para encontrar novos depósitos minerais. Dessa forma, as primeiras aquisições radiométricas foram feitas em 1947. A utilização da gamaespectrometria na exploração mineral e monitoramento ambiental se intensificou entre os anos 60 e 70. Dessa forma, a geofísica aplicada adquiriu grande espaço em projetos de engenharia, prospecção de bens minerais e estudos ambientais.

Quando comparados a métodos diretos de investigação em subsuperfície, os métodos geofísicos possuem vantagens na utilização em projetos de meio ambiente e geotecnia. Como exemplo, são métodos não invasivos, que preservam o meio ambiente; os ensaios de campo são relativamente rápidos, é possível adquirir uma grande cobertura de aquisição de dados; boa relação custo-benefício, etc (SOUZA & GANDOLFO, 2012).

6.1.1 Método da Gamaespectrometria

O método geofísico de Gamaespectrometria consiste na medição de dados radiométricos. Segundo Wilford (1997), o raio gama é uma forma de radiação eletromagnética que possui alta energia e curto comprimento de onda. Não possui massa ou carga elétrica e é emitido em diferentes níveis de energia ou picos que correspondem ao decaimento radioativo de cada radioisótopo particular. Os solos e rochas podem conter esses radioelementos e podem ser estimados pela intensidade dos seus picos de emissão.

O decaimento radioativo é um processo no qual o isótopo pai radioativo perde partículas elementares do seu núcleo para se tornar o isótopo filho. O decaimento ocorre através da emissão de raios alfa, beta e gama. A taxa de decaimento (tempo de meia-vida) é um processo extremamente preciso e constante para cada elemento (REYNOLDS, 2011).

A taxa de decaimento é dada pela equação:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

N – Número de átomos após o tempo t

N_0 – Número de átomos inicial

λ – Constante de decaimento característica de cada elemento

A meia-vida ($T_{1/2}$) de um elemento é calculada por:

$$T_{1/2} = N / N_0$$

Desta forma, o método da gamaespectrometria detecta o decaimento radioativo quando é emitida uma radiação energética, o raio gama. O tempo de meia-vida e o pico de emissão é característico de cada elemento. Os raios gama podem penetrar 30cm de rocha e algumas centenas de metros de ar, devido à alta energia e nenhuma massa (MINTY, 1997). Quando existe matéria entre o emissor e o sensor, a detecção de raios gama pode ser afetada de forma significativa e as medições podem se tornar mais precisas superficialmente. A radiação gama no solo é inversamente proporcional à densidade do meio que atravessa (MINTY, 1988).

No caso da Gamaespectrometria, são medidos em rochas e solos o decaimento dos isótopos naturais de Potássio (K), Tório (Th) e Urânio (U). O K corresponde ao pico de decaimento do ^{40}K , que emite raios gama ao decair para ^{40}Ar . A medição do decaimento do Th e do U são mais complexos, pois o ^{232}Th e ^{238}U decaem por uma série de núclídeos filhos até se estabilizar nos isótopos de Chumbo (Pb). Para calcular a concentração de Th, são utilizados picos de emissão associados a ^{208}Tl (Tálio) e para calcular a concentração de U os picos de emissão associados ao ^{214}Bi (Bismuto) (MINTY, 1997). O U e o Th são expressos em partes por milhão (ppm), representados por eU e eTh (U e Th equivalentes), já que sus concentrações estão associadas ao decaimento de uma cadeia de elementos. No entanto, o K existe em maior abundância na crosta, tipicamente expressado em porcentagem (%K).

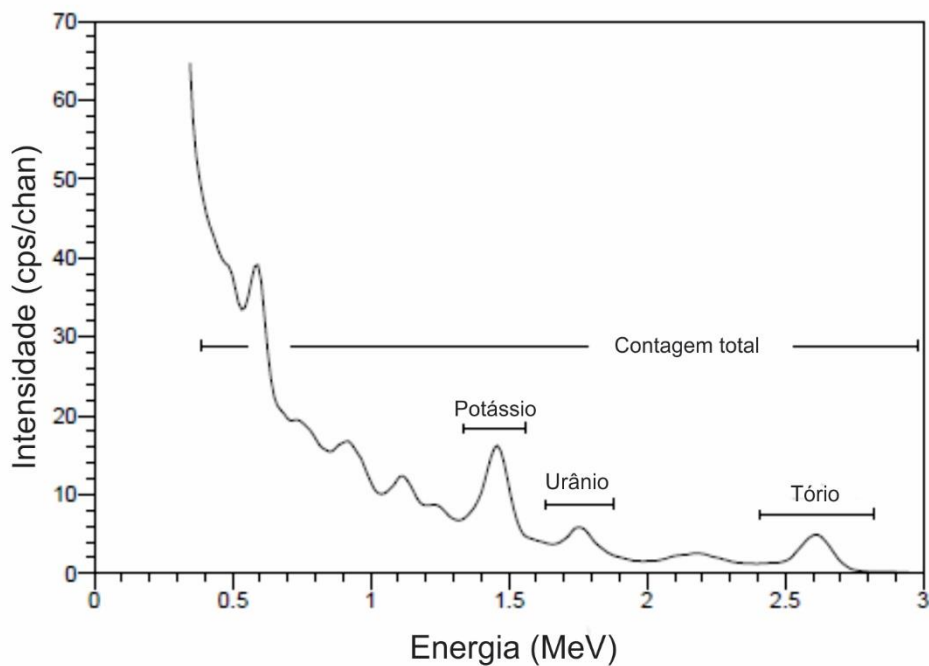
O intervalo (janela) de medidas de raios gamas de um espectrômetro (Figura 12 e Tabela 2) é de 0,40 a 2,810 MeV. Nesse intervalo, cada elemento possui sua emissão de raio gama concentrada em um pico de energia. Para o ^{40}K , esse pico é de 1,460 MeV, para o ^{238}U de 1,765 MeV e ^{232}Th de 2,614 MeV.

Tabela 2 - Janelas de energia padrão de raios gama recomendado pelo mapeamento de radioelementos

Janela	Nuclídeo	Intervalo de energia (MeV)
Contagem total	-	0.400 – 2.810
Potássio	^{40}K (1.460 MeV)	1.370 – 1.570
Urânio	^{214}Bi (1.765 MeV)	1.660 – 1.860
Tório	^{208}Th (2.614 MeV)	2.410 – 2.810

Fonte: Adaptado de IAEA (1991).

Figura 12 - Típico espectro de raio gama. São mostradas as janelas de energia convencionais para os elementos de K, U e Th.



Fonte: Adaptado de IAEA (2003).

O uso de um gamaespectrômetro portátil pode ser aplicado em detalhamento regional e pesquisa para estimar a concentração de radioelementos em superfície, também pode ser utilizado para adquirir informações sobre a litologia e mineralização de estruturas geológicas em subsuperfície. Esse equipamento é usado desde a década de 1960 na exploração de urânio, mapeamento geológico e estudos ambientais. Existem procedimentos bem estabelecidos para a medição, calibração do instrumento e processamento de dados.

Segundo a IAEA (Agência Internacional de Energia Atômica) (2003), os espectrômetros multicanais de Germânio (utilizado neste trabalho), utilizam uma ótima resolução de energia gama dos detectores de germânio para distinguir os emissores da radiação gama. O detector e a fonte devem ter uma distância constante em todas as medições, pois a resposta do

gamaespectrômetro é influenciada pelo tamanho, pela localização e geometria das fontes radioativas. Uma das formas de manter essa distância é colocar o detector diretamente na superfície, dessa forma são reduzidos os possíveis efeitos da variação do relevo e da distribuição dos radioelementos.

O tempo de amostragem necessário depende da radioatividade da fonte e da precisão necessária da medida. No entanto, deve ser feita uma relação entre a precisão das taxas de contagem medidas e a economia das medições de campo.

A calibração do espectrômetro de raios gama é a estimativa das constantes que relacionam as taxas de contagem do instrumento à concentração dos radionuclídeos ou taxas de doses ambientais (IAEA, 2003).

Os espectrômetros mais antigos requerem essa calibração para identificar corretamente as janelas e limites das radiações dos elementos medidos. Não há necessidade da calibração nos equipamentos mais modernos, pois eles já são calibrados e estabilizados e identificam os picos das medições (MILSON & ERIKSEN, 2011).

A intensidade dos raios gama emitidos na superfície estão relacionados a geoquímica e mineralogia da rocha (WILFORD et al, 1997). O potássio é um elemento alcalino e ocorre principalmente em álcali feldspatos, micas e ilita, ocorre também em minerais evaporíticos. O urânio e o tório são raramente substituídos por outros elementos e tendem a formar seus próprios minerais. O urânio pode formar um óxido ou silicato. Alguns minerais formadores de rochas, quartzo e feldspatos podem conter traços de U e Th, mas em sua maioria ocorrem em minerais acessórios como zircão, monazita, esfênio, rutilo, etc. (DENTITH & MUDGE, 2014). O potássio tem concentração média estimada de 2,5% na crosta, enquanto que o urânio e o tório ocorrem em concentrações muito menores, com médias de 3 ppm para o U e 12 ppm para Tório.

6.2 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTOS DOS DADOS

Os procedimentos adotados em campo para a aquisição de dados com um gamaespectrômetro portátil são determinados a partir do motivo da pesquisa e dos problemas geológicos/ambientais investigados.

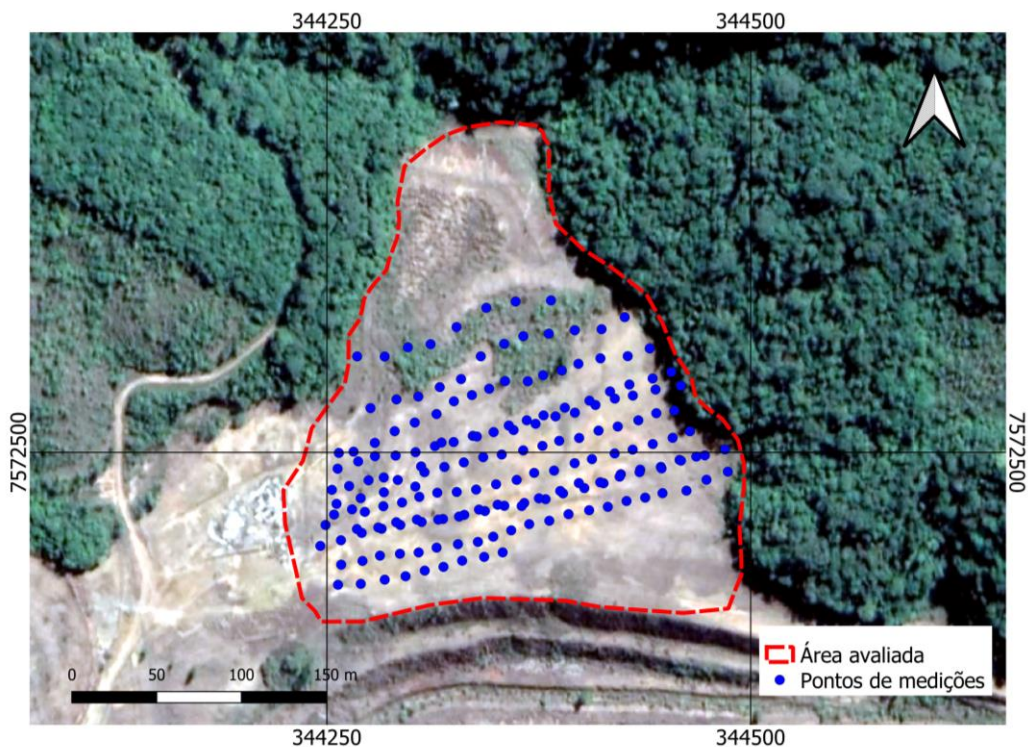
É de conhecimento que existe a geração de drenagem ácida no interior da pilha de rejeitos BF-8 e, que em pH baixo cátions metálicos se tornam solúveis e móveis e podem ser transportados, com o risco de contaminar o ambiente. Também é de conhecimento que o urânio

é um elemento radioativo, que libera radiação gama quando sofre decaimento. Com a utilização do método radiométrico de gamaespectrometria, é esperada a identificação dos locais que possuem alta concentração de K, Th e U, possíveis regiões mineralizadas e potenciais núcleos geradores de drenagem ácida.

Dessa forma, os pontos de aquisição dos dados foram espalhados de maneira a cobrir grande parte da área avaliada, mantidos equidistantes entre si (Figura 13). Alguns desvios na locação da medida foram feitos devido à exposição da superfície em alguns lugares do que outros por conta da vegetação rasteira.

O equipamento utilizado foi o Gamaespectrômetro RS 332 Terraplus, com um cristal detector de óxido de germanato de bismuto (GBO) e um colimador, que direciona e suaviza os feixes de radiação. A resposta de energia do equipamento é de 30keV-3000keV. Por ser um equipamento moderno, não foi preciso fazer sua calibração.

Figura 13 – Malha de pontos coletados



Fonte: Autoria própria

A aquisição dos dados consistiu em posicionar o gamaespectrômetro no ponto definido pela malha e aguardar 3 minutos para que o equipamento fizesse a medição da concentração de K, U e Th, como pode ser observado nas Figuras 14 e 15. Após a aquisição dos dados naquele ponto, eles são salvos na memória do equipamento. No próximo ponto, o procedimento se

repete. Foram feitas medições em 181 pontos. O desvio padrão das medições de campo foi no entorno de 4%.

Esse procedimento foi realizado em todos os pontos da malha e foram necessários três dias de campanha para fazer o levantamento dos dados, realizadas em julho e outubro de 2020 e a última em janeiro de 2021.

Figura 14 – Vista da porção norte do BF-08, drenagens ao fundo.



Fonte: autoria própria

Figura 15 - Aquisição de dados com o Gamaespectrômetro



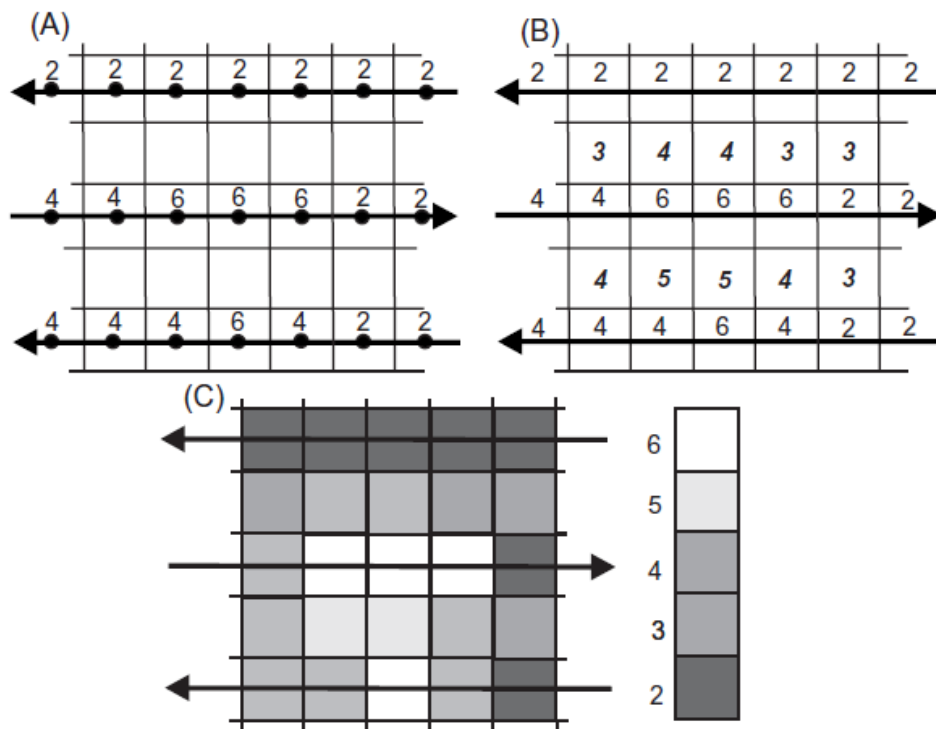
Fonte: Autoria própria

Para o processamento dos dados, o primeiro passo foi descarregar os dados adquiridos da memória do equipamento para o computador. Esses dados foram tratados para que

estivessem dentro dos conformes para que o *software Geosoft* pudesse processá-los. Para isso, as coordenadas obtidas que estavam no formato decimal, foram convertidas para UTM (SIRGAS 2000) através da calculadora do IBGE, um *software* chamado TCGeo. Também foram filtradas informações de cada ponto da malha medido como: altitude, *dose*, *dose rate*, a concentração do K/U/Th e o desvio padrão daquela medição. Após a conversão das coordenadas e a organização das três tabelas de dados, para K, U e Th, o banco de dados foi importado para o *software Geosoft, Oasis Montaj*.

Com os dados coletados em cada ponto, o programa forma uma malha sob o terreno com intervalos nas medições, faz a interpolação desses pontos e define uma cor de acordo com o número de contagens medidas (REYNOLDS, 2011), como pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 – Medição e interpolação de dados radiométricos



Fonte – Retirado de Reynolds (2011).

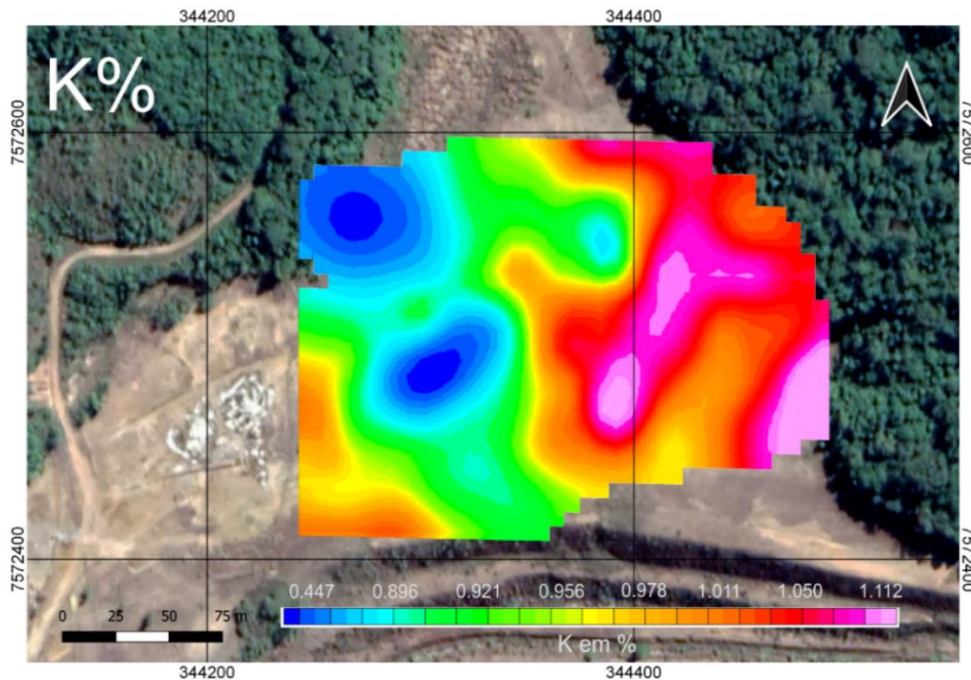
Como produto, foram gerados três mapas de concentração, um de K, outro de U e o último de Th, apresentados no item Capítulo 7.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os mapas de concentração de K (%), Th (ppm) e U (ppm) foram feitos a partir do processamento dos dados radiométricos coletados em campo, com o objetivo de identificar os possíveis locais de emissão de radiação do K, eTh e eU A seguir serão expostos os resultados do trabalho.

O mapa de concentração de potássio produzido pode ser observado na Figura 17. As cores quentes como rosa e vermelho indicam valores altos e as cores frias valores baixos, como tons de azul. Os valores variam de 0,447 a 1,112% de K. São indicados elevados valores (>1,050%) na região leste e nordeste e baixos valores na região noroeste e central (<0,896%).

Figura 17 – Mapa de concentração de K (%)



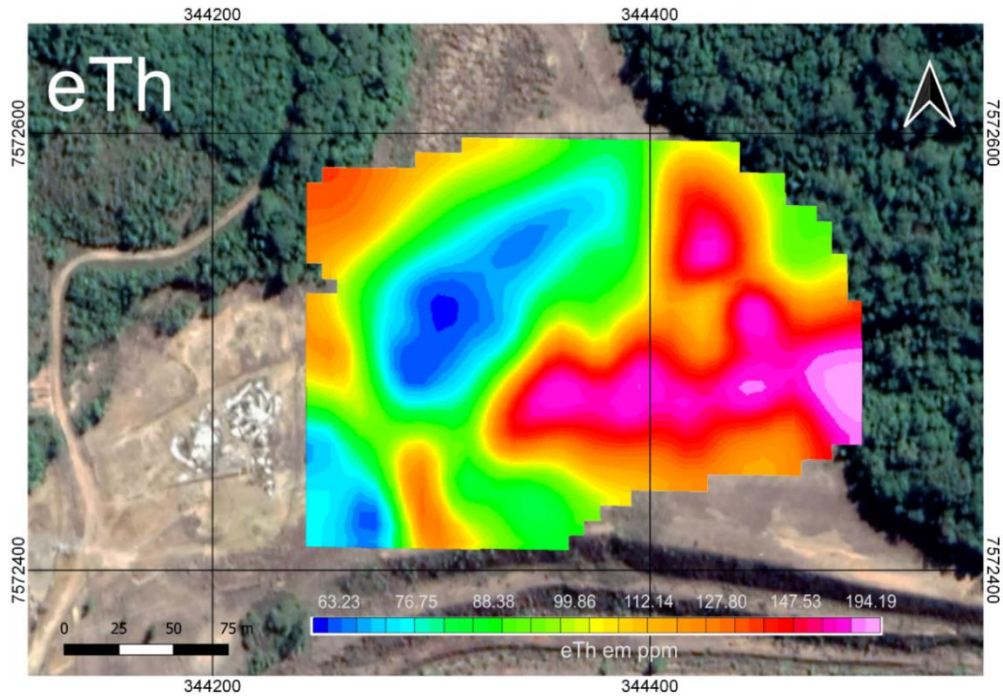
Fonte: Autoria própria (Elaborado no *software* Oasis Montaj e sobreposto a imagem de satélite do Google Earth)

O mapa de concentração de Tório (ppm) produzido pode ser observado na Figura 18. Os valores variam de 63,23 a 194,19 ppm. São indicados elevados valores (>147,53 ppm) na região leste. As porções sudoeste e noroeste-central apresentam baixos valores de concentração (<76,75ppm).

O mapa de concentração de Urânio (ppm) produzido pode ser observado na Figura 19. Os valores variam de 29,84 a 349,16 ppm. São indicados elevados valores de concentração

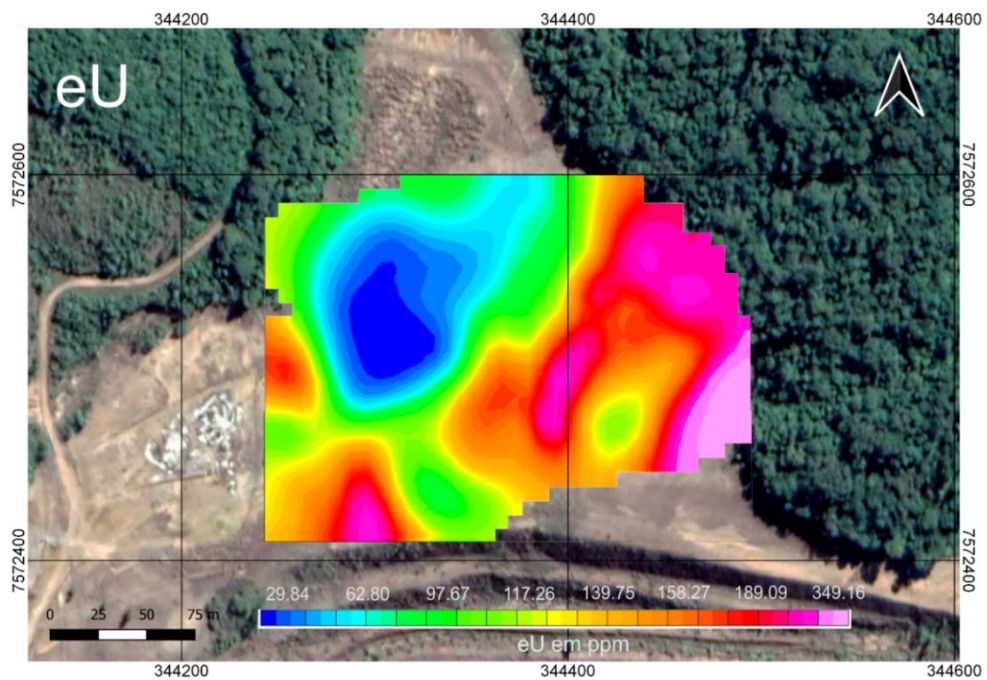
(>189,09 ppm) nas regiões leste, oeste e sudoeste. São observados também baixos valores de concentração (62,80 ppm) nas regiões noroeste, norte e central.

Figura 18 – Mapa de concentração de Tório (ppm)



Fonte: Autoria própria (Elaborado no *software* Oasis Montaj e sobreposto a imagem de satélite do Google Earth)

Figura 19 – Mapa de concentração de Urânio (ppm)



Fonte: Autoria própria (Elaborado no *software* Oasis Montaj e sobreposto a imagem de satélite do Google Earth)

Segundo Biondi (1976), as mineralizações da mina foram formadas no interior de uma chaminé de brecha, com forma cônica. Essa chaminé é composta por brechas tinguaiticas, cortadas por diques e apófises de tinguaitos e fonólitos. As brechas ficam em contato com lavas tinguaiticas e fonolíticas através de uma falha na região sul. Fora dessa zona de falha, a chaminé de brecha é envolvida e limitada por foiaítos e nefelina-sienitos. Todas essas rochas foram hidrotermalmente alteradas, o principal tipo de alteração gerado a argilização pervasiva. Dessa forma, próximo aos corpos mineralizados, também são encontradas zonas enriquecidas em potássio. Os corpos mineralizados foram divididos em três: corpo A, B e E.

Os materiais despejados no BF-08 eram da decapagem da cava e triagem dos corpos A e E. Inicialmente foi realizada a decapagem e deposição no Bota Fora, em seguida a lavra do corpo E e posteriormente do corpo A.

O minério tipo A (considerado como brecha de fluidização por Biondi (1976)), foi formado por uma sequência de implosões de vapor d'água com gases vulcânicos. Possuem diversos tipos de rochas e são cimentadas por uma matriz de rocha pulverizada e lava fonolítica. Os minérios presentes são uraninita, zircão uranínífero, baddeleyita, molibdenita, pirita, esfalerita, galena e fluorita. Grande parte do minério de urânio nesse corpo estava na malha cristalina do zircão, um mineral rico em sílica e muito resistente ao intemperismo. Esse minério representava 10% das reservas do depósito.

O minério tipo E é de origem secundária, supergênica, formado em uma frente de oxidação causada por água meteórica, que lixiviou as brechas que já haviam sido hidrotermalizadas. A água meteórica oxidou a pirita presente nas rochas e se tornou ácida e possibilitou a geração de sulfatos e hidróxidos de ferro. O urânio que estava disseminado nas brechas e lavas também foi lixiviado pelas águas ácidas e concentrado na frente de oxidação, no limite entre as rochas oxidadas e não oxidadas. A ocorrência desse minério é irregular e descontínua, são formados bolsões enriquecidos em pitchblenda, um óxido de urânio, como a uraninita, minerais menos resistentes ao intemperismo. Esse minério representava 30% das reservas do depósito.

O minério tipo B foi formado pela alteração hidrotermal das brechas e lavas tinguaiticas e fonolíticas. Era disseminado e estava localizado no interior do cone de brechas, representado por minérios de uraninita, zircão e molibdenita. A ganga possuía argilominerais, pirita e minerais remanescentes das rochas hidrotermalizadas. Esse minério representava cerca de 60% das reservas da mina.

A lavra da mina tinha como teor de corte 170 ppm de U, ou seja, não foram depositados apenas estéreis nas pilhas, mas também rejeitos com concentração de até 170 ppm de U solúvel. Os minerais de minério de U e Th ocorrem juntos, além dos minerais ricos em K, devido às zonas hidrotermalizadas. Dessa forma, a região que apresenta alta concentração de K pode indicar que o rejeito depositado ali era de uma rocha hidrotermalizada, enriquecida em K, próxima à região mineralizada. A região que apresenta alta concentração de U e Th, indica rejeitos que fazem parte das zonas mineralizadas. As regiões de baixa concentração de U, Th e K, pode ser caracterizada como estéril. Portanto, ao observar os mapas de concentração, é possível dizer que as principais áreas de baixa e alta concentração coincidem entre os três radioelementos.

No trabalho de Targa (2020), foram realizados modelos de inversão de resistividade e cargabilidade da mesma área de estudo. A partir dos níveis de visualização do modelo pseudo-3D de cargabilidade (Figura 21) elaborado pela autora foram identificadas em superfície (cota de 1365m, a 2m da superfície) duas zonas de alta cargabilidade, uma a noroeste (1) e outra a sudeste (2). A autora interpreta essas zonas como núcleos de alta concentração de sulfetos. Ao comparar com os mapas de concentração de U e Th, a região de elevados valores de alta cargabilidade a sudeste coincide com a região de elevados valores de U e Th. No entanto, a área abrangida por alta concentração de U e Th é mais ampla que a área de elevada cargabilidade. A justificativa para tal acontecimento é que existem rejeitos de dois corpos de minérios que foram depositados na pilha e, em um deles, o U e Th estão presentes em minerais silicáticos, como o zircão e não nos óxidos, como a uraninita. Dessa forma, o resultado obtido pela gamaespectrometria indica a concentração apenas dos radioelementos, independente do seu mineral de minério, relacionado ou não aos sulfetos. A zona de elevada cargabilidade a noroeste não coincide com elevados valores de concentração de urânio, no entanto os valores de tório são relativamente altos. Isso poderia ser explicado pela diferença de mobilidade do Th e U. Ambos são móveis em ambiente oxidante, no entanto o urânio possui maior mobilidade (PAIVA, 2008). Dessa forma, o urânio pode ter sido mobilizado e transportado e o tório não.

A partir dos níveis de visualização do modelo pseudo 3-D de resistividade (Figura 20) elaborado pela autora, é possível observar que na região central da superfície (cota 1365m) os valores de resistividade são elevados, o que indica baixa retenção de água na camada superficial. Na região norte são observados valores mais baixos, interpretados como zonas de infiltração de águas superficiais. Ao comparar com os mapas de concentração de U e Th as zonas de infiltração de água superficial coincidem com as zonas de baixa concentração de U e

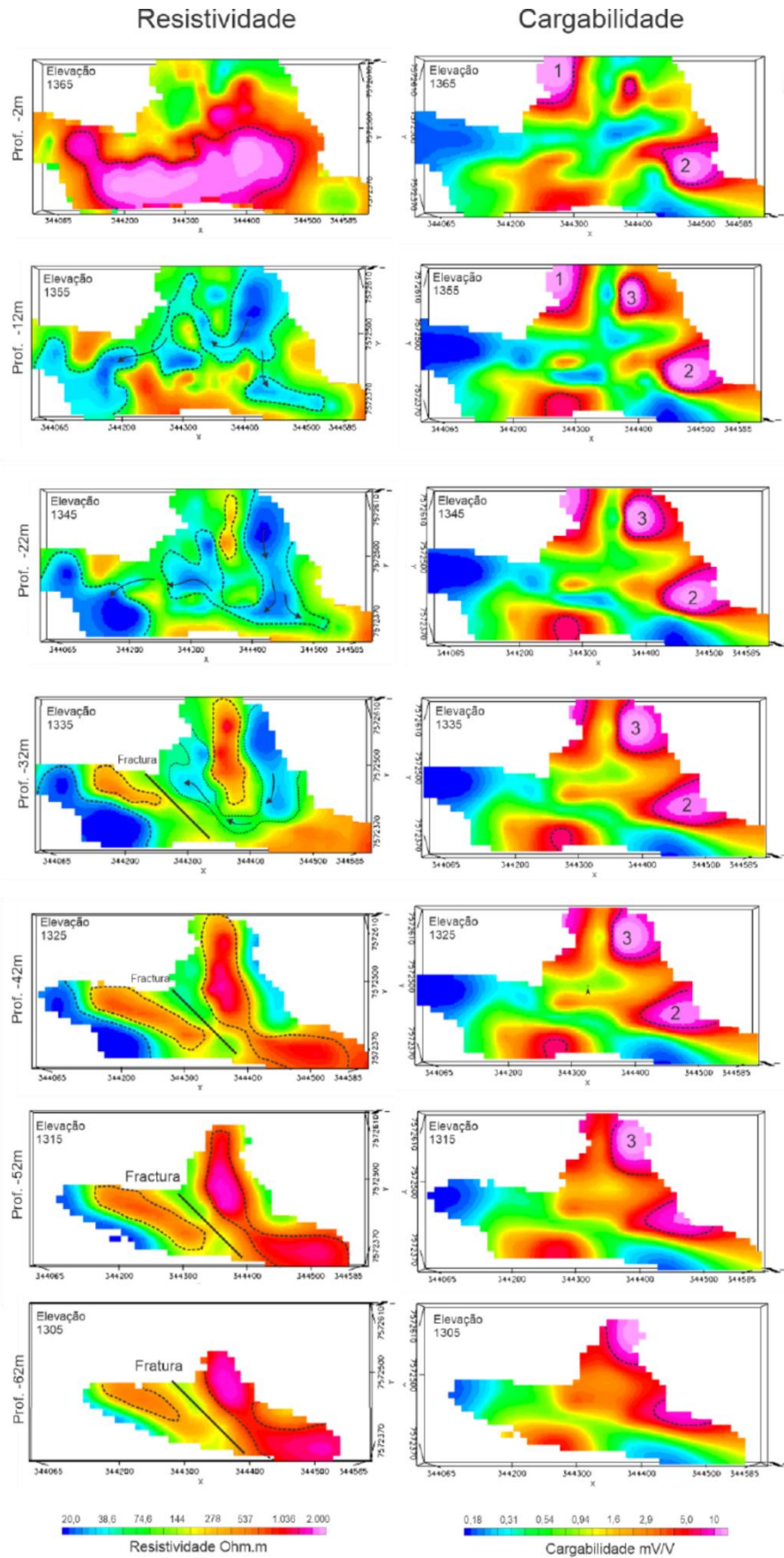
Th. Para ser caracterizado como uma região potencial geradora de drenagem ácida, devem coincidir zonas de percolação/infiltração de água com núcleos de sulfetos e altas concentrações de U e Th. Dessa forma, em superfície, não são encontrados potenciais núcleos de geração DAM em superfície.

No nível 1355m (12m de profundidade) são observados núcleos de baixa resistividade e um aumento da zona de alta cargabilidade a nordeste da área (3). Targa interpretou a redução da resistividade como água retida no interior do BF-08 e sua percolação foi favorecida pela topografia do terreno com leve caimento para sul, dessa forma o fluxo principal da água é de nordeste para sudoeste. Ao comparar os dados de resistividade com os de cargabilidade, é observada uma interação entre as zonas de baixa resistividade (valores menores que 20 Ω .m) com as de alta cargabilidade (valores maiores que 10mV/V) na região nordeste (3). Essa interação indica uma potencial fonte de geração de drenagem ácida. É possível observar em todos os níveis na região sudoeste uma zona de alta cargabilidade, que coincide com uma zona de alta concentração de urânio. Além disso, em 12m de profundidade apresenta resistividade de aproximadamente 38 Ω .m e a partir de 22m resistividade com valores de 20 Ω .m. Essa é uma potencial região para geração de DAM, pois há interação de sulfetos, alta concentração de U e valores de baixa resistividade.

Os valores de resistividade não sofrem grandes alterações no nível 1345m, 22m abaixo da superfície, no entanto as zonas de baixa resistividade estão mais interconectadas, com fluxo da água indicado para sudeste e sudoeste. Os valores de cargabilidade nesse nível também não sofrem grandes alterações quando comparados ao nível anterior.

Em 32m de profundidade, é observado um aumento nas áreas de alta cargabilidade na região norte e central, o que indica maiores regiões que contenham sulfetos. Com relação a resistividade, é possível observar uma zona de alta resistividade na região central que reduz a conexão hidráulica para a região sudeste. A autora interpreta essa região como o topo rochoso. Além disso, na região sudoeste, a circulação é limitada por um alinhamento NW-SE que fica cada vez mais evidente em maiores profundidades. Esse alinhamento é interpretado pela autora como uma zona de fratura que induz o fluxo para o interior do maciço rochoso.

Figura 20 – Níveis de visualização do modelo pseudo 3-D de Resistividade e Cargabilidade



Fonte: Retirado de Targa (2020)

Com relação a cargabilidade, as regiões 2 e 3 se coincidem com as zonas de alta concentração de U, Th e K. A zona 2 a 32m de profundidade possui formato muito próximo ao da zona de alta concentração (>147 ppm) de Tório. Isso pode indicar que o gamaespectrômetro detectou em superfície emissão de radioatividade de profundidades de até 32m. Segundo Reynolds (2011) o alcance de um gamaespectrômetro é de 20 a 30cm em solos e rochas. Era esperado que seu alcance fosse ser maior pois a área avaliada não possui solo compactado, no entanto, 32m seria muito profundo para um gamaespectrômetro. Como foi dito anteriormente, o que pode ser interpretado é a detecção de zonas ricas em Th e U, mas que não estão associadas a grandes quantidades de sulfetos na região superficial. Essa hipótese é mais plausível pois na região norte, por exemplo, há baixas concentrações de urânio e tório e alta cargabilidade em profundidades de 22 e 32m. Dessa forma, não é possível afirmar que o gamaespectrômetro tenha capacidade de detectar em profundidades de 22m.

8. CONCLUSÃO

A utilização do método da gamaespectrometria direcionado para estudos voltados ao meio ambiente, especificamente para a drenagem ácida de mina em pilhas de rejeito, foi importante para interpretações e identificação de núcleos ricos em U, Th e K. Baseado nas diferenças de concentração, foi definida uma grande zona de altas concentrações de K (>1,05%), Th (>147,53 ppm) e U (>189,09 ppm), o que indica que na região leste do BF-08 foi depositado um rejeito com alta concentração de minério. Também foi identificada a noroeste uma região com baixas concentrações dos três radioelementos, interpretada como um material estéril.

A disposição dessas concentrações pode ser devido a sequência da lavra dos corpos mineralizados. Dessa forma, nas regiões mais próximas da cava foram depositados os rejeitos de maior teor de U, o corpo E, com teor médio de 1000 ppm em seguida o corpo A, com teor médio de 600 ppm e as porções de estéreis na região noroeste.

A comparação dos mapas de concentração com os níveis de visualização do modelo pseudo 3-D de cargabilidade de Targa (2020) auxiliou na conclusão de que o gamaespectrômetro identificou em superfície os locais com emanção de urânio, independentemente de sua origem metalogenética, pois foram verificadas regiões que coincidiam altos valores de cargabilidade (zonas sulfetadas) com altos valores de concentração de U e Th e baixos valores de cargabilidade com altos valores de U e Th.

No BF-08 existem tanto minerais de minério resistentes ao intemperismo quanto mais suscetíveis ao intemperismo, a contribuição para a drenagem ácida não é igual entre eles. A uraninita (óxido de urânio) é menos resistente e por conta disso, influencia de forma intensa na atual geração de drenagem ácida. Já o zircão uranífero, por ser extremamente resistente, contribuirá para a geração de DAM a longo prazo, na escala de centenas de anos.

A comparação com os dados de resistividade de Targa indicou que em superfície as zonas de infiltração de água não coincidem com as zonas de alta concentração de U e Th. No entanto, é possível observar que em profundidade foram detectadas zonas de baixa resistividade ($20\Omega.m$), o que indica presença de drenagem ácida. Logo, a água pode infiltrar pela superfície e alcançar porções com altas concentrações de U e Th e sulfetos em profundidade e gerar DAM, como na região sudoeste. Por se tratar de uma região em que os índices pluviométricos são altos, a quantidade de água disponível para intensificar os processos é grande.

Ao observar os mapas de concentração, a região leste possui altas concentrações de U e Th, mas segundo o modelo de resistividade não há infiltração de água superficial nessa região. Caso houvesse infiltração, seria um potencial núcleo de geração de drenagem ácida. Talvez os altos valores de potássio nessa localidade possam indicar a presença de argilominerais que dificultam a permeabilidade do meio e não permitem a infiltração de água superficial. No entanto, é preciso que seja mantida essa impermeabilidade nesse local.

Dessa forma, caso não sejam tomadas medidas de remediação que amenizem de fato e controlem a geração de drenagem ácida, o tratamento das águas ácidas perdurará por centenas de anos. Para definir as melhores técnicas de remediação, é preciso aprofundar os estudos para delimitar os locais de geração de drenagem ácida, não apenas associados aos sulfetos, para assim poder tratar na origem do sistema e isolar os núcleos. É recomendada a redução da infiltração das águas superficiais no sistema através de uma proteção superficial impermeável, como adição de uma camada de argila, membranas sintéticas ou coberturas de asfalto, por exemplo.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKCIL, A., & KOLDAS, S. (2006). *Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. Journal of Cleaner Production, 14(12-13), 1139–1145.*
- ALBERTI, H. L. C. (2017). Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas impactadas pela drenagem ácida da mina de urânio - Osamu Utsumi, planalto de Poços de Caldas (MG). 198 p.. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, SP.
- BYRAPPA, K., YOSHIMURA, M. *Handbook of Hydrothermal Technology. A technology for Crystal Growth and Materials Processing.* New York. Noyes Publications. 2001.
- CIPRIANI, M. (2002). Mitigação dos impactos sociais e ambientais decorrentes do fechamento definitivo de minas de urânio. 332p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, SP.
- CLIMATE. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/pocos-de-caldas-2883/>. Acesso em: 28/10/2020.
- DE PAULA, T. L. F. (2015). Comportamento hidráulico de aquíferos sedimentares e metassedimentares de dupla porosidade da região do Alto Paraguai, MT. 129p. Tese (mestrado) – Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, DF.
- DENTITH, M., MUDGE, S. (2014). *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist.* New York. Cambridge University Press. 2014.
- DORANTI, C. (2013). Evolução geomórfica e modelagem termocinética 3D da região do planalto de Poços de Caldas (SP/MG). 160 f. Tese - (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas.
- ELLERT, R. (1959). Contribuição à Geologia do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Universidade de São Paulo. Geologia, v.18, p. 5-60.
- FORNAZZARI NETO, L., FERREIRA, J. F. (2003). Gamaespectrometria integrada a dados exploratórios multifonte em ambiente SIG aplicada à prospecção de ouro na Folha Botuverá, SC. Revista Brasileira de Geociências. 33(2-Suplemento):197-208, junho de 2003.

FRAENKEL M.O., SANTOS R.C., LOUREIRO F.V.L., MUNIZ W.S. (1984). Jazida de Urânio no Planalto de Poços de Caldas – Minas Gerais. *In: Principais depósitos minerais do Brasil*. NUCLEBRAS, Rio de Janeiro, 1:89-103, *Anais*.

FRANKLIN M.R. (2007). Modelagem numérica do escoamento hidrológico e dos processos geoquímicos aplicados à previsão da drenagem ácida em uma pilha de estéril da mina de urânio de Poços de Caldas – MG. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

GOMES, M. J. S. (2003). Utilização de métodos geofísicos em sambaquis fluviais, região do Vale do Ribeira de Iguape - SP/PR. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

GRAY, N. F. (1997). *Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem*. *Environmental Geology Journal*, v. 30, p. 62-71.

HERMANN, L. (2010). *The Potential of Gamma-ray Spectrometry for Soil Mapping*. *In: 19th World Congress of Soil Science, Solutions for a Changing World*. 2010, Australia.

HOLMES, D. C., PITTY, A. E., & NOY, D. J. (1992). *Geomorphological and hydrogeological features of the Poços de Caldas caldera analogue study sites*. *Journal of Geochemical Exploration*, 45(1-3), 215–247.

INAP - *The International Network for Acid Prevention. The Global Acid Rock Drainage Guide – Gard Guide*. 2012. Disponível em: <<http://www.gardguide.com>>. Acesso em 26 out. de 2019.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), (1991). *Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying, Technical Reports Series*, No. 323, Vienna.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). (2003). *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. Viena: Intern. Atomic Energy Agency.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA). *Uranium 2018: Resources, Production and Demand. Report*. 27th ed. NEA n°7413.

LOUREIRO F.E.V. & SANTOS R.C. (1988). *The intra-intrusive uranium deposits of Poços de Caldas, Brazil*. *Ore Geology Reviews*, 3:227-240.

- MELLO, J. W. V., DUARTE, H. A., LADEIRA, A.C. Q. (2014). Origem e Controle do Fenômeno Drenagem Ácida de Mina. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola, n.8 p.24-29.
- MOREIRA, C. A., CASAGRANDE, M. F. S., BÜCHI, F. M. S., & TARGA, D. A. (2020). *Hydrogeological characterization of a waste rock pile and bedrock affected by acid mine drainage from geophysical survey. SN Applied Sciences*, 2(7).
- MILSON, J., ERIKSEN, Z. L. (2003). *Field Geophysics. 4th ed.. United Kingdom. Wiley*. 2003.
- MINTY, B.R.S. (1988)2. *A review of airborne gamma-ray spectrometric data-processing techniques*. Canberra: Australian Gov. Publ. Service. 48 p.
- MINTY, B.R.S., (1997). *The fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2).
- MURTA, F. C. Ensaio de colunas para a avaliação de remediação passiva de drenagem ácida na mina Osamu Utsumi (INB), Caldas/MG. 2006. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.
- PAIVA, C. T. (2008). Estudo da Mobilidade e Dispersão de ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{228}Ra , ^{222}Rn e metais pesados no sistema solo-rocha do depósito de U-ETR de São José de Espinharas (PB). 2008. 224f. Tese de Doutorado. Universidade Federal Rural do Pernambuco. Recife, 2020.
- PASTORE, E.L. & MIOTO, J.A. (2000). Impactos Ambientais em Mineração com Ênfase à Drenagem Mineira Ácida e Transporte de Contaminantes. *Revista Solos e Rochas*, 23, (1): 33-53, São Paulo, SP.
- PRADO, V. C. S. (1994). O impacto da produção de concentrado de urânio sobre a qualidade da água dos rios – Um estudo de caso na área do Complexo Mínero-Industrial de Poços de Caldas. Dissertação. Rio de Janeiro, RJ, 195 p.
- RADIATION SOLUTIONS INC. (2017). *Operator Manual: RS-300/332 Multipurpose Gamma-Ray Spectrometer System*.
- REYNOLDS, J. M.. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics..* 2nd ed. United Kingdom. Wiley-Blackwell. 2011.

- RIBEIRO, V. B., MANTOVANI, M. S. M., LOURO, V. H. A. (2014). Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. *Terræ Didactica*, **10**(1):29-51.
- RITCHIE, A. I. M. *Application of oxidation rates in rehabilitation design*. In: Grundon NJ, Bell LC, editors. *Proceedings of the Second Australian Acid Mine Drainage Workshop*, Australian Centre for Minesite Rehabilitation Research, Charles Towers, 1995: 101±116.
- SOUZA, L. A. P. de; GANDOLFO, O. C. B. Métodos geofísicos em geotecnia e geologia ambiental. *Revista Brasileira de Geologia e Engenharia e Ambiental*, v. 2, n. 2, p. 10-27, maio, 2012.
- SOUZA, A.M., SILVEIRA, C.S., & PEREIRA, R.M. (2013). Contribuições dos metais provenientes das pilhas de rejeito da mina Osamu Utsumi a drenagens do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, Minas Gerais.
- TARGA, D. A.; MOREIRA, C. A.; CAMARERO, P. L.; CASAGRANDE, M. F. S.; ALBERTI, H. L. C. (2019). *Structural analysis and geophysical survey for hydrogeological diagnosis in uranium mine, Poços de Caldas (Brazil)*. *SN Applied Science*. 1(4),1-12.
- TARGA, D. A.. (2020). Análise da Geração de Drenagem Ácida de Mina em Pilha de Rejeito Sulfetada a parte de Levantamento Geofísico e Dados Hidroquímicos. 2020. 108f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”. Rio Claro, 2020.
- ULBRICH, H. H. G. J. (1984). A petrografia, a estrutura e o quimismo de nefelina sienitos do Maciço alcalino de Poços de Caldas, MG-SP. Tese (Livre Docência em Mineralogia e Petrologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- WIKMANN, L. O., 1998, Caracterização química e radiológica dos estéreis provenientes da mineração de urânio do planalto de Poços de Caldas. Universidade de São Paulo – USP. 98p.
- WILFORD J.R., BIERWIRTH P.N., CRAIG M.A. (1997). *Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/ regolith mapping and applied geomorphology*. *Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2): 201-216.

ZALAN, P. V., & OLIVEIRA, J. B. A. (2005). Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil; B. Geociências. Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 269-300.