

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir
de 04/09/2025.

**PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO
EM GEOCIÊNCIAS
E MEIO AMBIENTE**

**USO DE TÉCNICAS DE EXPLORAÇÃO MINERAL NO
ESTUDO DE PASSIVOS AMBIENTAIS EM MINA DE
URÂNIO EM FASE DE DESCOMISSIONAMENTO**

Lenon Melo Ilha

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

Rio Claro - SP
2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

LENON MELO ILHA

**USO DE TÉCNICAS DE EXPLORAÇÃO MINERAL NO ESTUDO DE PASSIVOS
AMBIENTAIS EM MINA DE URÂNIO EM FASE DE DESCOMISSIONAMENTO**

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro, SP

2024

I27u	Ilha, Lenon Melo Uso de técnicas de exploração mineral no estudo de passivos ambientais em mina de Urânio em fase de descomissionamento / Lenon Melo Ilha. -- Rio Claro, 2024 110 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro Orientador: César Augusto Moreira 1. Magnetometria. 2. Gamaespectrometria. 3. Passivos ambientais em mineração. 4. Drenagem ácida de minas. I. Título.
------	---

Impacto potencial desta pesquisa

A tese avalia o uso de métodos geofísicos no detalhamento de zonas com ocorrência de minerais que em contato com água e oxigênio geram um efluente denominado drenagem ácida de mina. O impacto abrange a identificação e mitigação de áreas de geração de drenagem ácida, o qual contribui para a prevenção de acidentes ambientais e a manutenção da qualidade das águas superficiais e subterrâneas que abastecem comunidades próximas a áreas de mineração.

Potential impact of this research

The thesis evaluates the use of geophysical methods in detailing areas with the occurrence of minerals that, in contact with water and oxygen, generate an effluent called acid mine drainage. The impact covers the identification and mitigation of areas where acid drainage is generated, which contributes to the prevention of environmental accidents and the maintenance of the quality of surface and underground waters that supply communities close to mining areas.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

LENON MELO ILHA

USO DE TÉCNICAS DE EXPLORAÇÃO MINERAL NO ESTUDO DE PASSIVOS
AMBIENTAIS EM MINA DE URÂNIO EM FASE DE DESCOMISSIONAMENTO

Tese de Doutorado apresentada ao
Instituto de Geociências e Ciências
Exatas do Campus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista “Júlio
de Mesquita Filho”, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Doutor em Geociências e Meio
Ambiente.

Comissão Examinadora:

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

Prof. Dr. Dionísio Uendro Carlos
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. Pedro Daniel da Cunha Kemerich
UFSM/Santa Maria (RS)

Profa. Dra. Jéssica Weiler
UNIPAMPA/Caçapava do Sul (RS)

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

Conceito: Aprovado.

Rio Claro (SP), 04 de setembro de 2024.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sem ele nada seria possível.

Aos meus queridos pais Edson e Cristina, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda a trajetória.

Ao professor César, pelo apoio contínuo, por sua paciência, motivação e dedicação exemplar em orientar seus alunos.

A Sissa por estar ao meu lado em todos os momentos, pelo carinho, compreensão e apoio.

A Fabiola pelo incentivo e acolhida nas idas a Rio Claro.

A INB/Caldas por disponibilizar a área de estudos e fornecer apoio nas atividades de campo.

Ao PPGGMA da Unesp por todo suporte na realização desta pesquisa.

A todos os mestres que contribuíram com a minha formação acadêmica e profissional durante a minha vida.

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho, meu muito obrigado.

RESUMO

A atividade de mineração consiste essencialmente em movimentar rochas com o objetivo de extrair substâncias com valor econômico de zonas de acumulação natural ou jazidas. Esta atividade produz alterações significativas na região do complexo mineiro, seja na paisagem, vegetação, hidrologia, hidrogeologia, dentre outros. Depósitos minerais com milhões de anos são lavrados em operações mineiras e trazidos ou expostos em superfície, onde são submetidos a condições de estabilidade química e física totalmente distintos das condições originais de preservação. Variáveis climáticas como calor, frio, chuvas e estiagem agem de forma severa na integridade física de rochas e minerais, com oxidação acelerada e mobilidade de elevados teores de elementos químicos em águas de superfície e subterrâneas. Drenagem ácida de mina (DAM) consiste num efluente gerado pela interação de água e ar com zonas enriquecidas em sulfetos, cuja oxidação resulta no incremento da acidez deste fluido, um fenômeno recorrente em minerações de sulfetos ou ouro e sulfetos associados. Este trabalho foi desenvolvido na Unidade de Descomissionamento Caldas, onde existe uma mina de Urânio lavrado a céu aberto e também uma pilha de rejeitos de grandes dimensões formada por aterramento de vale fluvial, numa operação que lavrou Uraninita (U_3O_8) e sulfetos associados. A elevada pluviosidade anual aliada a exposição de sulfetos em superfície resultou na geração de DAM desde o início das operações em 1981, com atividades de mineração suspensas em 1995 e início da fase de descomissionamento. A geração de DAM é algo recorrente em minas com presença de sulfetos como minério ou mineral acessório, contudo, o caso da área de estudos envolve uma especificidade: a oxidação de uraninita e a mobilidade de urânio na DAM. Diante do exposto, este trabalho aplicou métodos geofísicos tradicionalmente empregados em pesquisas por depósitos minerais para avaliar os condicionantes de geração e fluxo de DAM na área de estudos, com vistas à compreensão do fenômeno. Os resultados obtidos indicaram áreas com situações distintas: na cava da mina ocorre dispersão de elementos por meio da interação entre o fluxo subterrâneo com zonas de alteração hidrotermal e minério residual, enquanto na pilha de rejeitos ocorrem áreas com significativa concentração de sulfetos e minério residual, responsáveis pela geração de DAM. Como forma de mitigar os impactos ambientais gerados e contribuir com o processo de descomissionamento do complexo mineiro, são propostas ações de remediação a partir dos resultados obtidos. Na cava da mina, o retaludamento das bancadas e impermeabilização com camada de material argiloso pode reduzir a infiltração de águas superficiais no maciço rochoso e reduzir a geração de DAM, enquanto na pilha de rejeitos, a remoção de parte do material disposto na parte norte, que apresenta maiores concentrações de minério residual e sulfetos, possivelmente reduzirá a geração de DAM.

Palavras-chave: Indústrias Nucleares do Brasil, gamaespectrometria, magnetometria, uraninita, sulfetos, drenagem ácida de mina.

ABSTRACT

The goal of mining activity is to extract substances with economic value from areas of natural accumulation or deposits. This activity produces significant changes in the region of the mining complex, including landscape, vegetation, hydrology, and hydrogeology. Mineral deposits that are millions of years old are mined in mining operations and brought or exposed to the surface. These deposits are subjected to chemical and physical stability different from the original conditions of preservation. Climatic variables such as heat, cold, rain, and drought act severely on the physical integrity of rocks and minerals, with accelerated destruction and mobility of high levels of chemical elements in surface and underground waters. Acid mine drainage (DAM) consists of an effluent generated by the interaction of rainwater and groundwater with zones enriched in sulfides, the destruction of which increases the acidity of this fluid, a recurring phenomenon in sulfide or gold and associated sulfide mining. This project was developed in an open-pit uranium mine and also in a large tailing pile formed by filling a river valley, in an operation that mined uraninite (U_3O_8) and associated sulfides. The high annual rainfall combined with the placement of sulfides on the surface resulted in the generation of DAM since the beginning of operations in 1981, with mining activities suspended in 1995 and the beginning of the decommissioning phase. The generation of DAM is something recurrent in hundreds of mines with the presence of sulfides as an ore or accessory mineral, however, the case in the study area involves a specificity: the destruction of uraninite and the mobility of uranium in the DAM. The geological complexity and dynamics of DAM generation and flow represent a challenge in terms of characterization and understanding of the phenomenon. In view of the above, this work applied geophysical methods traditionally used in research for mineral deposits to evaluate the conditions for the generation and flow of DAM in the study area, with a view to understanding the phenomenon. The results obtained indicated areas with different situations: in the mine pit there is dispersion of elements through the interaction between the underground flow with zones of hydrothermal alteration and residual ore, while in the tailings pile there are areas with significant concentration of sulfides and residual ore, responsible for generating DAM. As a way of mitigating the environmental impacts generated and contributing to the decommissioning process of the mining complex, remediation actions are proposed based on the results obtained. In the mine pit, the resurfacing of benches and waterproofing with a layer of clayey material can reduce the infiltration of surface water into the rock mass and reduce the generation of DAM, while in the tailings pile, the removal of part of the material disposed in the northern part, which has higher concentrations of residual ore and sulfides, will possibly reduce DAM generation.

Key words: Indústrias Nucleares do Brasil, gammaspectrometry, magnetometry, uraninite, sulfides, acid mine drainage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mapa de localização com destaque para a Unidade de Descomissionamento de Caldas.....	18
Figura 2: Arranjo Físico do Complexo Mineiro-Industrial da MOU, com destaque para as unidades operacionais e a cava da mina.....	19
Figura 3: Produção de yellow-cake para a conformação de combustível nuclear, INB-Caldas.....	20
Figura 4: Aspecto geral e localização da pilha BF-04 e da cava da mina.	24
Figura 5: Bombeamento das águas para a estação de tratamento de efluentes (A) e seu lançamento em bacias de decantação (B, C), seguido da disposição de lama de rejeito na área da cava (D).	25
Figura 6: Vista aérea da cava da MOU.....	25
Figura 7: Mapa geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas.	26
Figura 8: Mapa geológico com as principais litologias da cava da mina.	28
Figura 9: Padrão de lineamentos estruturais do Maciço de Poços de Caldas– MG.....	29
Figura 10: Modelo genético da mineralização de urânio no Complexo Alcalino de Poços de Caldas.....	31
Figura 11: Perfil ilustrativo dos corpos mineralizados "A", "B" e "E".	32
Figura 12: Taxa de precipitação, baseada nas médias mensais no período entre 1977 a 1988. A linha vermelha destaca o valor médio anual.	34
Figura 13: Padrão de drenagem (linhas em azul) condicionado ao controle estrutural de fraturas regionais (linhas em vermelho) próximos à Mina Osamu Utsumi (limites da cava em laranja)	35
Figura 14: Visão geral do complexo industrial da INB/Caldas, rede hidrográfica e o divisor de bacias hidrográficas.	36
Figura 15: Modelo hidrogeoquímico conceitual da cava da MOU.....	37
Figura 16: Modelo hidrogeoquímico conceitual da pilha de estéril BF-04.....	38
Figura 17: Modelos pseudo-3D com diferentes níveis de visualização em profundidade com a indicação dos piezômetros instalados no local e o fluxo hidrogeológico.....	39
Figura 18: Modelos pseudo-3D de resistividade (A) e cargabilidade (B).	40
Figura 19: Modelo de inversão de linha localizada na porção central da cava da mina. ..	41

Figura 20: Correlação 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.....	43
Figura 21: Ilustração do processo de geração da DAM e seu transporte através de uma pilha de estéreis.....	50
Figura 22: Representação esquemática da força e orientação dos elementos dipolares através dos domínios: a) ferromagnético; b) antiferromagnético e; c) ferrimagnético.	55
Figura 23: Características do campo magnético da Terra.....	56
Figura 24: Os elementos do campo magnético da terra, onde: Fe = vetor do campo total, He = componente horizontal, Ze = componente vertical, d = declinação, e i = inclinação.	57
Figura 25: Funcionamento do magnetômetro de precessão de prótons. a) Elementos do magnetômetro de precessão de prótons; b) Aplicação da corrente na bobina de magnetização que gera um campo magnético forte que alinha os momentos magnéticos ("spins") dos prótons; c.....	61
Figura 26: Representação do decaimento radioativo para as séries do urânio, actínio e tório.....	69
Figura 27: Interação do raio gama com a matéria.	71
Figura 28: Espectro gama do potássio, urânio e tório e um gnaiss granítico aflorante... ..	75
Figura 29: Gamaespectrômetro portátil RS-332.	77
Figura 30: Aquisição de dados gamaespectrométricos.	77
Figura 31: Malha de pontos de aquisição dos dados Gamaespectrométricos.....	78
Figura 32: Magnetômetro GSM 19.....	79
Figura 33: Gráfico da variação diurna na estação base utilizada.....	80
Figura 34: Aquisição de dados magnetométricos.	80
Figura 35: Malha de pontos de aquisição dos dados Magnetométricos.	81
Figura 36: Mapa Gamaespectrométrico de Potássio.....	84
Figura 37: Exemplo de rocha hidrotermalizada com manchas de manganês (ao centro).	85
Figura 38: Interface sudeste do BF-04, com fragmentos de rocha de tamanhos variados e bloco com impregnações de manganês (base da imagem ao centro).....	85
Figura 39: Mapa Gamaespectrométrico de concentração de Urânio.....	86
Figura 40: Fraturas com caulinição por intemperismo acelerado pela passagem de água subterrânea (manchas esbranquiçadas a direita). As zonas escuras a esquerda são área de passagem de água subterrânea, mas sem caulinição.	87

Figura 41: Detalhe do mapa gamaespectrométrico de concentração de Urânio, com registro de fragmento de minério de urânio circundado com óxidos de Fe resultantes da oxidação de sulfetos.	87
Figura 42: Mapa Gamaespectrométrico de concentração de Tório.	88
Figura 43: Vista parcial da cava, com destaque para contatos entre horizontes de solo, saprólito, rocha parcialmente alterada e rocha inalterada, com setas de fluxo superficial em perfis erosivos.....	89
Figura 44: Vista parcial da cava, com destaque em primeiro plano de recobrimento do fundo de cava emersa por sedimentos originados nas partes elevadas da cava.	89
Figura 45: Vista do BF-04, com solo e saprólito como materiais de recobrimento em primeiro plano	89
Figura 46: Composição média de radionuclídeos em poços de monitoramento.....	90
Figura 47: Mapa magnetométrico de campo total.....	92
Figura 48: Mapa magnetométrico Residual.	93
Figura 49: Mapa magnetométrico de amplitude do sinal analítico.	94
Figura 50: Modelos de inversão para resistividade (superior) e cargabilidade (inferior) referentes a Linha 1, com delimitação de áreas anômalas.	95
Figura 51: Fragmento do mapa magnetométrico de amplitude de sinal analítico com posição da linha de tomografia elétrica apresentado no estudo de Casagrande (2019). ..	95
Figura 52: Modelo esquemático da UDC. A) Situação atual da cava da mina e pilha de rejeitos BF-04. As setas indicam o fluxo de água subterrânea sem contaminação (em azul) e ácida (em laranja). B) Propostas de remediação da cava da mina e pilha de rejeitos BF-04.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tabela 1: Produção mineira do Complexo Industrial de Poços de Caldas entre 1977 e 1997.....	22
Tabela 2: Características das pilhas de estéreis da MOU.....	23
Tabela 3: Etapas do ciclo de vida de um empreendimento mineiro.	47

LISTA DE ABREVIATURAS

CIPC - Complexo Mineiro Industrial de Poços de Caldas
CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
DAM – Drenagem Ácida de Mina
DUA - Diuranato de Amônia
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
INB - Indústrias Nucleares do Brasil
MOU - Mina Osamu Utsumi
PRAD - Plano de Recuperação de Áreas Degradadas
UDC - Unidade de Descomissionamento de Caldas
UTM-Caldas – Unidade de Tratamento de Minérios Caldas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	13
2. HIPÓTESE.....	16
3. OBJETIVOS	17
3.1. Objetivo Geral.....	17
3.2. Objetivos específicos.....	17
4. ÁREA DE ESTUDO	18
4.1. Localização e Acessos	18
4.2. Histórico.....	19
4.3. Processos Operacionais.....	20
4.4. Disposição de estéril e rejeito	21
4.5. Geologia Regional	26
4.6. Geologia Local.....	28
4.7. Geologia estrutural	29
4.8. Metalogênese	30
4.9. Geomorfologia	33
4.10. Pluviosidade, Clima e Vegetação	33
4.11. Hidrografia	34
4.12. Hidrogeologia	36
4.13. Trabalhos prévios desenvolvidos na área de estudo	39
5 – GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS.....	44
5.1 – Passivos Ambientais em Mineração	44
5.2 – Descomissionamento de Mina.....	46
5.3 – Drenagem Ácida de Mina	48
6 – MATERIAIS E MÉTODOS	52
6.1 - MÉTODOS GEOFÍSICOS	52
6.1.1. Método Magnetométrico	52
6.1.1.1 Conceitos	53
6.1.1.2 Propriedades Magnéticas.....	54
6.1.1.3. O Campo Magnético Terrestre	55
6.1.1.4. O Campo Principal	56
6.1.1.5. Campo Externo	57
6.1.1.6. Anomalias Magnéticas Locais	58
6.1.1.7. Propriedade Magnética das Rochas	58

6.1.1.8. Instrumentos para Medições do Campo Magnético	59
6.1.1.9. Levantamento Magnetométrico	61
6.1.1.10. Correções e Processamento de Dados Magnetométricos	62
6.1.1.11. Análise de dados magnetométricos e aplicações	65
6.2. Método Gamaespectrométrico	66
6.2.1. Conceitos Fundamentais	66
6.2.2. Decaimento Alfa.....	66
6.2.3. Decaimento Beta	67
6.2.4. Radiação Gama.....	67
6.2.5. Série de Decaimento Radioativo	68
6.2.6. Equilíbrio Radioativo	70
6.2.7. Interação da Radiação Gama com a Matéria	70
6.2.8. Unidades.....	72
6.2.9. Fontes de Radiação Gama	72
6.2.10. Instrumentos	73
6.2.11. Correções e Processamento de Dados	75
7. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO	77
7.1. Gamaespectrometria	77
7.2. Magnetometria.....	79
8. RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
8.1. Gamaespectrometria	83
8.2. Magnetometria.....	91
9. PROPOSTAS DE REMEDIAÇÃO	96
10. CONCLUSÕES.....	99
11. REFERÊNCIAS	101

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A mineração e o processamento mineral possuem grande relevância para a industrialização de uma nação e papel fundamental na economia global, sendo necessários para o desenvolvimento econômico, para a produção de energia e a competitividade de mercado internacional (CHATTERJEE, 2007; RICHARDS, 2009). Minerações e plantas industriais são infraestruturas absolutamente necessárias para sociedades industriais, e adicionalmente, possuem o encargo de realizar o tratamento e descarte adequado para os resíduos gerados pelas atividades (GILMORE, 2008; JAIN, et al, 2016).

Lavra é definida como o conjunto de procedimentos de desmonte, carregamento e transporte de rocha com valor econômico proveniente de uma jazida, classificada em subterrânea ou céu aberto (DHILLON, 2008). A escolha do método de lavra deve ser pautada por questões geológicas, econômicas, ambientais e de segurança e variam de acordo com o formato e arquitetura do depósito mineral, morfologia do terreno e processos de beneficiamento mais adequados ao tipo de minério.

Materiais provenientes do desmonte e beneficiamento de rochas em mineração são responsáveis por grandes volumes de material sem aproveitamento econômico, e que podem ser lançados em bacias de decantação, pilhas ou bota-foras (AALST, 2016). Uma das grandes questões econômicas e ambientais enfrentadas pela mineração é a baixa proporção de minério em relação a quantidade de estéril/rejeitos produzidos, em alguns casos na ordem de gramas por toneladas (g/T) (BRODA et al., 2014).

Existem dois tipos de resíduos produzidos pelas atividades mineradoras: estéril e rejeito. O decapeamento de uma jazida resulta em materiais sem valor econômico, denominado estéril. O rejeito pode ser tanto proveniente de materiais de baixo teor de minério diretamente retirados da lavra ou como resíduos de beneficiamento, ambos com pequena fração de conteúdo de minério, cuja concentração não é econômica. O rejeito frequentemente é constituído por minerais relacionados ao processo de mineralização e muito importantes na pesquisa dos depósitos, como guias prospectivos (MOON, 2006; DENTITH & MUDGE, 2014). Tais minerais podem ser óxidos ou sulfetos, cuja exposição em condições atmosféricas pode resultar em rápida oxidação e mobilidade de seus constituintes nas águas de superfície e subterrânea (ROBERTSON et al., 1985).

A quantidade de estéril e rejeito produzidas em atividades de lavra e beneficiamento é tão elevada que sua disposição final deve ser realizada de forma concomitante a operação mineira, frequentemente em extensas áreas, mas sempre

posicionados nas proximidades da área de operação. São diversas as técnicas e configurações usadas para a disposição de estéril e rejeito, o que as tornam únicas do ponto de vista estrutural com características particulares de seu material constituinte (DAWOOD e AUBERTIN, 2014).

Segundo McCarter (1985) e McCarter (1990), no passado havia pouca consideração ambiental em projetos e construções de pilhas de estéril. O estéril removido era simplesmente basculado em ponta de aterro, nas encostas ou terrenos no entorno das minas, de forma relativamente desordenada e em condições precárias de estabilidade, em locais denominados de bota-fora. Estas práticas resultaram em dispendiosos remanejamentos, questionável instabilidade, impactos ambientais, danos em equipamentos e instalações, risco aos operadores e grande dificuldade para recuperação das áreas após o encerramento das atividades.

O rejeito, frequentemente é disposto em barragens, principalmente quando produzidos via úmida. Essas estruturas são construídas com a finalidade de proporcionar decantação dos materiais sólidos e separação da fração líquida para descarte ou reuso no processo. Barragens de rejeito devem envolver planejamento e construção pautadas em elevado grau de segurança, além de seguir critérios geotécnicos, estruturais e econômicos, para redução de riscos de ruptura e impactos ambientais. Contudo, são obras que necessitam de investimento, mas não são lucrativas, e nesse sentido a eventual negligência com redução de custos pode resultar em desastres ambientais e sociais (PEREIRA, et al., 2019; DIAS, et al., 2018).

Embora as pilhas de estéril sejam caracterizadas por baixo grau de risco geotécnico, a diversidade química e granulométrica resulta em estruturas porosas e permeáveis, com eventual presença de minerais reativos e que podem ser rapidamente alterados em condições ambientais (AALST, 2016). A exposição de minerais sulfetados ao oxigênio atmosférico ou águas de chuva resulta na oxidação e liberação de elementos químicos para águas de superfície ou subterrâneas, com geração de efluentes de baixo pH e altas concentrações de metais, metaloides e sulfatos, denominado drenagem ácida de mina (DAM). Esse efluente pode causar a acidificação de corpos d'água adjacentes e do solo, inibindo o estabelecimento e crescimento da cobertura vegetal local (PICHTEL & DICK, 1991; BLOWES, 1997).

A mineração de urânio apresenta diversos riscos ambientais devido à significativa gama de possibilidades de contaminação das águas subterrâneas e superficiais locais por metais pesados, radionuclídeos e efluentes. Casos particulares onde ocorrem minérios de Urânio e sulfetos associados podem resultar na geração de DAM com elementos

radioativos dissolvidos (FRANKLIN, 2007; ALBERTI, 2017). A mitigação de impactos ambientais nesse tipo de cenário envolve o reconhecimento e compreensão de áreas de geração e fluxo de DAM, fundamentais para o planejamento de ações de extinção da fonte e tratamento de fluxos superficiais e subterrâneos.

O alívio de tensões em maciços rochosos durante a operação mineira ou a disposição aleatória de materiais com granulometria variável em pilhas de estéril, criam caminhos de fluxo subterrâneo caótico e distante dos padrões previstos em condições naturais para solos e rochas. O passar do tempo pode envolver mobilidade granulométrica, destruição de minerais e intemperismo de rochas expostas, que também podem criar ou obstruir caminhos de fluxo em sistemas aquíferos porosos ou fraturados. A dinâmica deste ambiente impõe severas limitações ao uso de técnicas clássicas de monitoramento hidrogeológicos pautados meramente por elementos geomorfológicos como declividade de terreno.

A especificidade e complexidade deste tipo de cenário necessita por vezes do desenvolvimento ou adaptação de métodos e técnicas de diagnóstico e monitoramento, seja da origem e consequência dos impactos ambientais.

A geofísica ambiental é um ramo da ciência Geofísica que envolve o uso de métodos e técnicas de investigação indireta de materiais geológicos com ênfase em questões ambientais. O diagnóstico geofísico de passivos ambientais de mineração pode indicar locais de geração de efluentes como DAM e respectivos caminhos de fluxo, informações essenciais para instalação de poços em locais estratégicos, quantificação de teores e previsão de ações efetivas de mitigação de impactos (LGHOUL et al., 2012a, b; MARTÍN-CRESPO et al., 2012; REY et al., 2013; MARTÍNEZ et al., 2014; MARTÍNEZ et al., 2016; CORTADA et al., 2017; MARTÍN-CRESPO et al., 2018; CASAGRANDE, et al. 2020; MOREIRA, et al., 2020; TARGA, et al, 2021; CAMAREIRO, et. al., 2022; NASCIMENTO, et al., 2022).

Diante do exposto, o presente estudo propõe adaptar o uso de métodos geofísicos tradicionalmente empregados em pesquisa mineral, no diagnóstico de passivos ambientais de mineração. O caso específico tratado nesta tese envolve Gamaespectrometria e Magnetometria aplicados na investigação de uma extensa pilha de rejeito e cava de uma mina de Urânio em fase de descomissionamento, num cenário de gerenciamento de áreas contaminadas e de ações para redução de impactos ambientais.

10. CONCLUSÕES

O estudo extensivo de impactos ambientais de empreendimentos mineiros em fase de planejamento, seja pela revisão de literatura especializada, elaboração de cenários e respectivas ações para redução de impactos, é algo básico em qualquer projeto desenvolvido atualmente. Contudo, empreendimentos antigos visavam essencialmente o processo de extração, beneficiamento, acessos a recursos naturais como água e a disposição final de resíduos e rejeitos, em termos de economia e eficiência, em projetos com pouco espaço para questões ambientais. É necessário reconhecer que o rigor crescente na legislação contribuiu significativamente para o atual destaque na questão de preservação ambiental.

A área de estudos foi o primeiro empreendimento mineiro para extração de urânio no Brasil, com erros e acertos que servirão ao planejamento de projetos posteriores e em operação na atualidade. Contudo, a ausência de projetos de redução de impactos ambientais no início da MOU resultou num contexto de alta complexidade técnica e economicamente custosa em sua atual fase de descomissionamento. Tais desafios implicam em ações criativas, e neste sentido, a adaptação de técnicas de investigação ambientais pode ser uma alternativa inovadora e contribuir significativamente na gestão do passivo ambiental.

Os métodos geofísicos da gamaespectrometria e da magnetometria são empregados há muitas décadas em projetos de pesquisa por recursos minerais nas fases de investigação regional e de detalhe. A gamaespectrometria permite em medidas de radioatividade, enquanto a magnetometria é baseada em medidas de interação do campo magnético terrestre em minerais magnéticos.

Particularidades relacionadas ao passivo ambiental na cava e bota foras da MOU subsidiaram a proposição destes métodos de investigação de subsuperfície: minerais radioativos e metálicos e suas associações com o processo de geração de DAM. Ferramentas diagnósticas que permitam o reconhecimento de minerais radioativos (uraninita e associados) e magnéticos (sulfetos diversos) podem proporcionar projetos técnicos de retirada ou isolamento destas matérias da infiltração de águas pluviais, cuja interação produz o efluente que representa o maior passivo ambiental da área de estudos.

O estudo geofísico proporcionou resultados satisfatórios na identificação de áreas com maiores concentrações de minério residual na cava da mina, além de locais com presença de sulfetos minerais no BF-04.

Os dados gamaespectrométricos apresentaram informações distintas em cada elemento estudado. As maiores concentrações do elemento K foram observadas principalmente na área da cava e são relacionadas a presença de rocha exposta e áreas hidrotermalizadas com halos de alteração potássica. O elemento U, as maiores concentrações também foram verificadas na área da cava, relacionadas a rocha exposta, e anomalias na zona norte do BF-04 foram interpretadas como provenientes de blocos de minério residual dispostos no rejeito. O elemento Th ocorre de forma difusa em toda a área de estudo. Sua presença está relacionada a retenção deste por parte de argilominerais e partículas finas presentes tanto na cava emersa quanto no BF-04.

Os dados magnetométricos destacaram anomalias de alta intensidade e expressiva dimensão localizada na cava e ao norte do BF-04. Estas respostas indicam tanto a ocorrência de diversos pontos com minério residual visível na cava, quanto a dispersão de fragmentos de minério residual com sulfetos no BF-04. A correlação entre estudos prévios desenvolvidos na área permitiu delimitar a região com maior concentração de elementos geradores de DAM no BF-04.

Embora os resultados geofísicos tenham permitido reconhecer alvos estáticos (minerais radioativos e metálicos), o processo de geração de DAM produz um efluente dinâmico e de ampla dispersão. Este certamente foi o maior desafio a uma análise integrada dos dados geofísicos, que considerou questões de intemperismo e oxidação de minerais, fluxo em meio poroso e fraturado, química e hidroquímica.

Ao final dos resultados são sugeridas alternativas para redução do volume total de DAM, com ênfase em métodos de eficiência em longo prazo, considerada a condição de descomissionamento e fechamento da mina e de baixa manutenção. Neste sentido, são recomendadas remoção de parte do BF-04 e de rochas da cava com grande concentração de sulfetos, e retaludamento das bancadas da cava com material argiloso, para impermeabilização e restrição de acesso de água as amplas áreas com minerais radioativos e reconstituição do sistema de escoamento superficial.

Os resultados deste estudo forneceram informações inéditas e pertinentes as Indústrias Nucleares do Brasil (INB) em auxílio de ações de medidas para redução no volume de geração de drenagem ácida na origem do processo. A ampla área de cobertura e sensibilidade dos métodos de investigação ao reconhecimento de zonas enriquecidas nos minerais diretamente envolvidos na geração do principal passivo ambiental da unidade, permitem concluir com eficácia a adaptação de métodos geofísicos de pesquisa por recursos minerais no estudo de passivos ambientais de mineração.

11. REFERÊNCIAS

AALST, W. V. D. **Mining process: data science in action**. Springer; 2016; p 477.

AKCIL, A.; KOLDA, S.. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. **Journal of Cleaner Production**, 14: 1139-1146. 2006.

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. Tese (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

ALMEIDA, F. F. M. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, 16, p. 325-340, 1986.

ALMEIDA, D. S.. **Recuperação ambiental da Mata Atlântica**. 3rd ed. Ilhéus, BA: Editus, 2016, 200 p. ISBN 978-85-7455-440-2

AUSTRALIA. Department of Industry Torism and Resources. **Mine closure and completion**. Canberra, 2006.

BIONDI, J. C.. Cubagem e avaliação do depósito de urânio do Cercado (c-09). In: Relatório interno **NUCLEBRÁS**. Rio de Janeiro, RJ. 1976.

BLAKELY, R. J.. **Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 441 p.

BLOWES, D. W. The Environmental Effects of Mine Wastes. In: **Proceedings of Exploration 97: Fourth decennial International Conference on Mineral Exploration**, 4. 1997, Toronto. Anais... Toronto: Prospectors and Developers Associaton, 1997, p. 887–892.

BORMA, L. S.; SOARES, P. S. M. Drenagem ácida e gestão de resíduos sólidos de mineração. In: **Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente**. Cap.10. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002. p.253-276

BRASIL. Lei nº 12.234, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial da União. 21 Set 2010.

BRODA, S.; AUBERTIN, M.; BLESSENT, D.; HIRTHE, E.; GRAF, T. Improving control of contamination from waste rock piles. **Journal of Environmental Geotechnics**. 2014.

BURGER, H. R.; SHEEHAN, A. F.; JONES, C. H.. **Introduction to Applied Geophysics: Exploration geophysics of the shallow subsurface**. New York: Norton & Company, 2006. 622 p.

BURRITT, R. L.; CHRIST, K. L. Water risk in mining: Analysis of the Samarco dam failure. **Journal of Cleaner Production**, vol. 178, p. 196-206. 2018.

CAMARERO, P.L., MOREIRA, C.A., TARGA, D.A. ET AL.. Analysis of Acid Drainage Flow Zones in a Rocky Massif in a Uranium Mine from Structural and Geophysical Diagnoses. **Mine Water Environ** 41, 303–316, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00827-6>

CAMPANER, V. P.; SILVA, W. L. Processos físico-químicos em drenagem ácida de mina em mineração de carvão no sul do Brasil. **Química Nova**, 32 (1), 146-152, 2009.

CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y.; JUNIOR, R. T.; CAMPOS, I. C.; CARMO, F. F.; SILVINO, G.; CASTRO, K. J. S. X.; MAURO, M. L.; RODRIGUES, N.U. A.; MIRANDA, M. P. S.; PINTO, C. E. F. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest 95 technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives in ecology and conservation**, 15, p. 145-151, 2017.

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.

CASAGRANDE, M. F. S.; MOREIRA, C. A.; TARGA, D. A.. Study of generation and underground flow of acid mine drainage in waste rock pile in uranium mine using electrical resistivity tomography. **Pure and Applied Geophysics**, 77:703–721, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02351-9>

CAPOVILLA, M. N. G. M. **Urânio nos hidrotermalitos potássicos (“rocha potássica”) da Mina Osamu Utsumi, Complexo Alcalino de Poços de Caldas, MG.** Tese de doutorado em Mineralogia e Petrologia. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 227 p. 2001.

CARDOSO, E. de M.. **Radioatividade:** Apostila Educativa. Comissão Nacional de Energia Nuclear (Apostila). Rio de Janeiro, 2004. 19 p.

CETEM/MCT, Projeto Conceitual para a Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera Sul Catarinense, RT33/2000, RT45/200, RT46/200 - Relatório Técnico Elaborado para **SIECESC** Volume 1, 2 e 3, 2001

CHATTERJEE, K. K.. Uses of metals and metallic minerals. **New Age International Publishers**. 2007, 314 p.

CIPRIANI, M. **Mitigação dos Impactos sociais e ambientais decorrentes do fechamento definitivo de minas de urânio.** 334p. Tese de doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP. 2002.

CORTADA, U., MARTÍNEZ, J., REY, J., HIDALGO, C., SANDOVAL, S.. Assessment of tailings pond seals using geophysical and hydrochemical techniques. **Engineering Geology**, 2017, 223, 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.04.024>

DAHLKAMP, F. J.. Uranium Deposits of the World - USA and Latin America. Berlin: **Springer**. 692p. 2010

DAWOOD, I.; AUBERTIN, M. Effect of dense materials layers on unsaturated water flow inside a large waste rock pile: a numerical investigation. **Mine Water and the Environment**, 33(1), p. 24-38. 2014.

DENTITH, M.; MUDGE, S. T.. Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist. Cambridge: **Cambridge University Press**. 2014.

DHILLON, B. S. . Mining equipment reliability, maintainability, and safety. **Springer**. 2008. 209 p.

DICKSON, BRUCE & SCOTT, K.. Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors. **AGSO journal of Australian geology & geophysics**. 17. 187-199. 1997.

DIAS, C. A., COSTA, A. S. V. DA, GUEDES, G. R., UMBELINO, G. J. DE M., SOUSA, L. G. DE, ALVES, J. H., & SILVA, T. G. M.. Impactos do rompimento da barragem de Mariana na qualidade da água do rio Doce. **Revista Espinhaço**, 7(1) 2018. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3952940>

ELLERT, R. Contribuição à geologia do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. São Paulo, **Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras – USP**, Boletim 237, Geologia 18, p. 5-63, 1959.

FAGUNDES, J.R.T.. **Balanço hídrico do bota – fora BF4 da mina Osamu Utsumi, INB, como subsídio para projetos de remediação de drenagem ácida**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais, 121p. 2005.

FERREIRA, F. J. F.; SOUZA, J. L.. **Gamaespectrometria: Fundamentos, Geoquímica e Distribuição dos Radioelementos em Rochas e Solos**. Curso de Graduação em Geologia, Disciplina Geofísica Aplicada (Apostila). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002. 72 p.

FERNANDES, H. M.; FRANKLIN, M. R. Assessment of acid rock drainage pollutants release in the uranium mining site of Poços de Caldas – Brazil. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 54, p. 5-25, 2001.

FILHO, C. A. C. **Avaliação da qualidade das águas superficiais no entorno das instalações minero-industriais de urânio de Caldas, Minas Gerais**. 363 p. Tese de Doutorado, Pós- Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais. Centro de desenvolvimento da tecnologia nuclear, Belo Horizonte, MG. 2014.

FLORES, C. D. C. **Fechamento de Mina: Aspectos Tecnicos, Juridicos e Socioambientais**. Tese (Doutorado em Ciências) -Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2006.

FLORES, J. C. C.; LIMA, H. M.. **Fechamento de Mina: Aspectos técnicos, jurídicos e socioambientais**. UFOP, Ouro Preto. 2012. 316p

FORMAN, J. M. A.; WARING, M. H. Uranium in South America with emphasis on the Brazilian Uranium Province. **26th Int. Geol. Congress, Colloquium on Energy Resources**, Paris. 1981.

FOURIE, A. B.; Brent, A. C.. A project-based Mine Closure Model (MCM) for sustainable asset Life Cycle Management. **Journal of Cleaner Production**, 14, 1085-1095. 2006.

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 a previsão da drenagem ácida em uma pilha de estéril da mina de urânio de Poços de Caldas – MG**. Tese de doutorado em ciências em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 358p. 2007.

GALHARDI, J. A.; SOLDERA, B. C.. Efeitos da drenagem ácida de mina sobre a qualidade das águas subterrâneas: preceitos legais e técnicos. **Holos Environment**, v. 18, n. 1, p. 87–109, 2018. <http://dx.doi.org/10.14295/holos.v18i1.12247>

GOLDER ASSOCIATES. Plano de Recuperação de Áreas Degradadas – **INB UTM Caldas**. Technical Report, Belo Horizonte, 2012.

GONÇALVES, B. F.. **Modelagem de dados geofísicos magnéticos e radiométricos aéreos e terrestres aplicados à interpretação geológica**. 129 p. Trabalho de Graduação (Graduação em Geofísica Aplicada), Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

GUTHRIE, V. A.; KLEEMAN, J. D.. Changing uranium distributions during weathering of granite. **Chemical Geology**, 54: 113-126. 1986

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. Introductory mining engineering. 2nd. ed. Hoboken: **John Wiley & Sons**, 2002. 570 p.

HEIKKINEN, P. M.; NORAS, P.; SALMINEN, R. (Ed.). Mine closure handbook. Espoo: **Geological Survey of Finland**, 2008

HENDGES, A. S.. O que é Passivo Ambiental. **Ecodebate**, 2013.

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.

GRAY, N. F. Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. **Environmental Geology**, v. 30, 1997.

INB. UDC Caldas, Níveis de lançamento de efluentes no meio ambiente. 2023. Disponível em: www.inb.gov.br/Portals/0/Documentos/Programas%20de%20Monitoramento%20-%20UDC%202020-2021%20rev%2007_03.pdf?ver=XJm9-FsGC7rFYDM1s99VQ%3%3d. Acesso em 20/03/2024.

JOHNSON, D.B.; HALLBERG, K.B. Acid mine drainage remediation options: a review. **The Science of the total environment**, 338 1-2, 3-14. 2005.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An Introduction to Geophysical Exploration**. 3rd ed. Blackwell: Blackwell Science Ltd., 2002. 262 p.

KOGEL, J. E. et. al.. **Industrial Minerals e Rocks. Commodities, Markets, and uses**. 7th ed. **Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc.**, 2006. 1498p.

KONZEN, L.. **Métodos Potenciais: Aplicações em Petróleo e Recursos Minerais**. São Paulo: IAG/USP, 2002. CD-ROOM.

LAGREGA, M.D.; BUCKINGHAM, P.L.; EVANS, J.C. **Hazardous waste management**. New York, **McGraw-Hill**, 1994.

LGHOUL, M., KCHIKACH, A., HAKKOU, R., ZOUHRI, L., GUERIN, R., BENDJOUDI, H., TEÍXIDO, T., PENÁ, J.Á., ENRIQUÉ, L., JAFFAL, M., & HANICH, L.. Etude geophysique et hydrogeologique dusite minier abandonne de Kettara (region de Marrakech, Morocco): contribution au projet de rehabilitation. **Hydrological Sciences Journal**. 2012a <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.637495>

LGHOUL, M., TEIXIDÓ, T., PEÑA, J. A., HAKKOU, R., KCHIKACH, A., GUÉRIN, R., JAFFAL, M., & ZOUHRI, L.. Electrical and seismic tomography used to image the structure of a tailings pond at the abandoned kettara mine, Morocco. **Mine Water and the Environment**, 31, 2012b, 53–61. <https://doi.org/10.1007/s10230-012-0172-x>

LOWRIE, W. **Fundamentals of Geophysics**. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 381 p.

LÓPEZ-SÁNCHEZ, Lina Marleny; LÓPEZ-SÁNCHEZ, Mary Luz; MEDINA SALAZAR, Graciela. La prevención y mitigación de los riesgos de los pasivos ambientales mineros (PAM) en Colombia: una propuesta metodológica. En: **Entramado**. Enero - Junio, 2017. vol. 13, no. 1, p. 78-91 <http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25138>

LUIZ, J. G.; COSTA E SILVA, L. M.. **Geofísica de Prospeção**. Belém: Universidade Federal do Pará; Cejup,1995. 300 p.

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

MACLEOD, I. N.; JONES, K.; DAI, T. F.. **3-D Analytic Signal in the Interpretation of Total Magnetic Field Data at Low Magnetic Latitudes**. In: KONZEN, Luciano. **Métodos Potenciais: Aplicações em Petróleo e Recursos Minerais**. São Paulo: IAG/USP, 2002. CD-ROOM.

MAGNO JÚNIOR, L. B.. Osamu Utsumi Mine, Geologic Presentation. In: **Relatório interno NUCLEBRÁS**. Rio de Janeiro, RJ, 1985.

MAJDALANI, A. A.; TAVARES, A. M. Status of uranium in Brazil. **IAEA – TECDOC 1258**, **IAEA**, Vienna, p. 119-127, 2001.

MANAHAN, S. E. **Environmental Chemistry**. 7ª Edição. **Lewis Publishes**, Boca Raton, EUA. 876p. 2000.

MARTÍN-CRESPO, T., GÓMEZ-ORTIZA, D., MARTÍNEZ PAGÁN, P., IGNACIO-SAN JOSÉ, C., MARTÍN-VELÁZQUEZ, S., LILLO, J., & FAZ, A.. Geoenvironmental characterization of riverbeds affected by mine tailings in the Mazarrón district (Spain). **Journal of Geochemical Exploration**, 119–120, 6–16. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.06.004>

MARTÍN-CRESPO, T.; GÓMEZ-ORTIZ, D.; MARTÍN-VELÁZQUEZ, S.; MARTÍNEZ PAGÁN, P.; IGNACIO, C.; LILLO, J.; FAZ, A.. Geoenvironmental characterization of unstable abandoned mine tailings combining geophysical and geochemical methods (Cartagena-La Union district, Spain). **Engineering Geology**, 232, p. 135-146. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.11.018>

MARTÍNEZ, J., HIDALGO, M. C., REY, J., GARRIDO, J., KOHFAHL, C., BENAVENTE, J., ROJAS, D.. A multidisciplinary characterization of a tailings pond in the Linares-La Carolina mining district, Spain. **Journal of Geochemical Exploration**, 162, 62–71. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.12.013>

MARTÍNEZ, J., REY, J., HIDALGO, M. C., GARRIDO, J., & ROJAS, D.. Influence of measurement conditions on the resolution of electrical resistivity imaging: the example of abandoned mining dams in the La Carolina District (Southern Spain). **International Journal of Mineral Processing**, 133, 67–72. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2014.09.008>

MCCARTER, M. K.. Design of Non-Impounding Mine Waste Dumps, **AIME**, New York, 1985. p. iii.

MCCARTER, M. K.. Design and Operating Considerations for Mine Waste Embankments. **Source: Surface Mining**, p. 890 - 899. 1990.

MIYASAKI, G. S. Plano de recuperação de áreas degradadas – PRAD, RT-006_099-515-3023_01-J. Parecer Técnico DIFOR número 01/14, 2014.

MIEKELEY, N.; JESUS, H. C. de; SILVEIRA, C. L. P. da; DEGUELDRE, C. Chemical and physical characterization of suspended particles and colloids in Waters from the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, 45, p. 409-437, 1992.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resolução Conama nº 001, de 23 de janeiro de 1986. Brasília, DF, 1986. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0001-230186.PDF>. Acesso em: 15 nov. 2022.

MINTY, B. R. S.. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, Australian, v. 17, n. 2, p. 39-50, 1997.

MOON, C. J.; WATHELEY, M. K. G.; EVANS, A. M. Introduction to Mineral Exploration. 2nd ed. **Blackwell Publishing Company**, 2006. 481 p.

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., CASAGRANDE, M. F. S., BUCHI, F. M. S., TARGA, D. A.. Hydrogeological characterization of a waste rock pile and bedrock affected by acid mine drainage from geophysical survey. **Applied Sciences**, 2, 1236. 2020. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3021-8>

NABIGHIAN, M. N. et al.. The historical development of the magnetic method in exploration. **Geophysics**, [S. l.], v. 70, n. 6, p. 33-61, nov-dec. 2005.

NASCIMENTO, M. M. P. F., MOREIRA, C. A., DUZ, B. G. et al. Geophysical Diagnosis of Diversion Channel Infiltration in a Uranium Waste Rock Pile. **Mine Water Environment**. 41, 704–720. 2022. <https://doi.org/10.1007/s10230-022-00878-3>

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.

NERI, A. C. **Tratamento de incertezas no planejamento do fechamento de mina**. Tese (Doutorado) -Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. 369 p. 2013.

NICHOLSON, R.; SMYTH, D. Desk top review. In: CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT, WATERLOO CENTRE FOR GROUND WATER RESEARCH. SUBSURFACE ASSESSMENT HANDBOOK FOR CONTAMINATED SITES. Winnipeg, 1994. Section 2, p 21-43.

NÓBREGA, F. A. **Análise de múltiplas variáveis no fechamento de mina – Estudo de caso da pilha de estéril BF-4, 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.

OLIVEIRA, A. G.. Mineralização de Urânio e Molibdênio no Planalto de Poços de Caldas-MG. **Anais do 28º Congresso Brasileiro de Geologia**. Vol. 7, p. 207-221. 1974.

OLIVEIRA, J. B.. **Desativação de empreendimentos mineiros: estratégias para diminuir o passivo ambiental**. 2001. 179 p. Tese (Doutorado) -Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

OWEN, J. R.; KEMP, D. Displaced by mine waste: the social consequences of industrial risktaking. **The Extractive Industries and Society**. 2019.

PABST, T.; BUSSIÈRE, B.; AUBERTIN, M.; MOLSON, J. Comparative performance of cover systems to prevent acid mine drainage from pre-oxidized tailings: A numerical hydrogeochemical assessment. **Journal of Contaminant Hydrology**. 2018.

PEREIRA, L. F., CRUZ, G. DE B., GUIMARÃES, R. M. F.. Impactos do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, Brasil: uma análise baseada nas mudanças de cobertura da terra. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, 4(2), 122–129. 2019. <https://doi.org/10.24221/jeap.4.2.2019.2373.122-129>

PEREIRA, W. S.; KELECOM, A.; CHARLES-PIERRE, M. et al.. Assessment of released natural radionuclides by waste rock pile and mining pit associated with a uranium mine at

Caldas, Minas Gerais, Brazil. *Environ Sci Pollut Res* 29, 58065–58077. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19887-4>

PICHTEL, J. R.; DICK, W. A. Sulfur, iron and solid phase transformations during biological oxidation of pyritic mine spoil. **Solid Biology & Biochemistry**, v. 23, p. 101-107, 1991.

RANGEL JÚNIOR, H. E.; COSTA, C. G. S. Apresentação do Plano de Recuperação de Áreas Degradadas da UTM-Caldas das Indústrias Nucleares do Brasil – Workshop on Environmental Remediation IAEA TC Project BRA 3013 Poços de Caldas, MG, 2009.

REY, J., MARTÍNEZ, J., HIDALGO, M. C., & ROJAS, D.. Heavymetal pollution in the Quaternary Garza basin: a multidisciplinary study of the environmental risks posed by mining. **CATENA**, 110, 234–242. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.06.023>

RICHARDS, J. P.. Mining, society, and a sustainable world. Springer. 2009, 515p.

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.

ROBERTSON, A. MACG., STEFFEN & KIRSTEN.. Mine Waste Disposal: An Update on Geotechnical and Geohydrological Aspects. Vancouver, Canadá, 24p. 1985.

SÁNCHEZ, L.E. A desativação de empreendimentos industriais: um estudo sobre o passivo ambiental. São Paulo, 1998. 178p. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

SÁNCHEZ, L. E.. Guia para o planejamento do fechamento de mina /L.E. Sánchez, S.S. Silva-SÁNCHEZ, A.C. Neri. -- 1.ed. -- Brasília : Instituto Brasileiro de Mineração, 2013. 224 p.

SANTOS, J. A. G.. Recuperação e reabilitação de áreas degradadas pela mineração. Cruz das Almas, BA: UFRB, 2017. 44p.

SCHÖN, J. H.. **Physical Properties of Rocks**: Fundamentals and Principles of Petrophysics; Handbook of Geophysical Exploration: Seismic Exploration, v. 18. Amsterdam: Elsevier, 2004. 583 p.

SCUDINO, P. C. B. Caracterização hidrodinâmica do meio aquífero fraturado na área de Poços de Caldas e adjacências, mediante a análise do conteúdo radioisotópico das águas subterrâneas. 1992. 146p. Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1992.

SHARMA, P. V. Magnetic surveying. In **Environmental and Engineering Geophysics** (pp. 65–111). chapter, Cambridge: Cambridge University Press. 1997.

SHEA, M. E. Isotopic geochemical characterization of selected nepheline syenites and phonolites from the Poços de Caldas Alkaline Complex, Minas Gerais, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, 45, p. 179-214, 1992.

SIMATE, G.S.; NDLOVU, S.. Acid mine drainage: Challenges and opportunities. **Journal of environmental chemical engineering**, 2, 1785-1803. 2014.

SINGH, J.; KALAMDHAD, A. S.. Effects of Heavy Metals on Soil, Plants, Human Health and Aquatic Life. **International Journal of Research in Chemistry and Environment**, 1, 15-21. 2011.

SOUZA, S. B.. **Feições regionais da porção emersa do Alto de Cabo-Frio e sua continuação para as Bacias de Campos e Santos**. 131 p. Dissertação (Faculdade de Geologia), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SOUZA, A. M.; SILVEIRA, C. S.; PEREIRA, R. M. Contribuições dos metais provenientes das pilhas de rejeito da Mina Osamu Utsumi a drenagens do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, Minas Gerais. **Geochimica Brasiliensis**, 27(1), p. 63-76. 2013.

TARGA, D. A.. Diagnóstico Hidrogeológico-Geotécnico por meio de Análise Estrutural na Mina Osamu Utsumi (Poços de Caldas – MG). **Trabalho de Conclusão. Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho – UNESP**. Rio Claro, 2018.

TARGA, D. A.. Análise da Geração de Drenagem Ácida de Mina em Pilha de Rejeito Sulfetada a partir de Levantamento Geofísico e dados Hidroquímicos. **Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho – UNESP**. Rio Claro, SP. 2020.

TARGA, D. A., MOREIRA, C. A., CASAGRANDE, M. F. S.. Hydrogeological Analysis of Sulfide Tailings at a Uranium Mine Using Geophysical and Hydrochemical Methods. **Mine Water Environ** 40, 671–689. 2021. <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00791-1>

TEDESCHI, M. F.; VIEIRA, P. L. N. C. R.; NOMO, T. A. Projeto fronteiras de Minas Gerais: Folha Caldas/Poços de Caldas, escala 1:100.000. Universidade Federal de Minas Gerais, 78 p. 2015.

THOMPSON, F.; OLIVEIRA, B. C.; CORDEIRO, M. C.; MAIS, B. P.; RANGEL, T. P.; PAZ, P.; FREITAS, T.; LOPES, G.; SILVA, B. S.; CABRAL, A.; SOARES, M.; LACERDA, D.; VERGILIO, C. S.; LOPES-FERREIRA, M.; SILVA, C. L.; THOMPSON, C.; RESENDE, C. E.; Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Geras, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. **Science of the Total Environment**, vol. 705, 2020.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E.. **Applied Geophysics**. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 770 p.

TONIDANDEL, R. P. et. al.. Aspectos Legais e ambientais sobre Fechamento de Mina, com enfase no Estado de Minas Gerais. **Geonomos**, 20(1), 32-40, 2012

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.; ULBRICH, M. N. C. The lujavrite and khibinite bodies of the Poços de Caldas Massif, southeastern Brazil: a structural and petrographical study. **Revista Brasileira de Geociências**, 30, p. 615-622, 2000.

ULBRICH, H.H.G.J et al. Penecontemporaneous syenitic-phonolitic and basic-ultrabasic-carbonatitic rocks at the Poços de Caldas Alkaline Massif, SE Brazil: geologic and geochronologic evidence. **Rev. Bras. Geociênc.**, vol. 32, n. 1, pag. 15-2, 2002.

URÂNIO DO BRASIL S.A. Síntese dos trabalhos – Gerência da Mina de Caldas. Relatório Interno, Urânio do Brasil, Poços de Caldas, MG. 1988.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Subsurface characterization and monitoring techniques – Solids and Ground Water. EPA/625/R-93/003. Washington, DC, Office of Research and Development, 1993.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. 1994. Acid mine drainage prediction. Washington DC: Office of Solid Waste, 51 p, Technical Document.

VEIGA, M. M. da; SILVA, A. R. B. da; HINTON, J. J. **O garimpo de ouro na Amazônia: aspectos tecnológicos, ambientais e sociais**. CETEM/MCT, 2002.

WABER, N. The supergene thorium and rare-earth element deposit at Morro do Ferro, Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, 45, p. 113-157, 1992.

WILFORD, J. R.; BIERWIRTH, P. N.; CRAIG, M. A.. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**. Australian, v. 17, n. 2, p. 201-216, 1997.