

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CAMPUS MONTE CARMELO

MAYRA CAROLINA PEREIRA BATISTA

Modelagem geológica a partir de furos de sondagem e análise estatística de teores de K_2O
aplicadas a zonas anômalas de potássio

Monte Carmelo - MG

2025

MAYRA CAROLINA PEREIRA BATISTA

Modelagem geológica a partir de furos de sondagem e análise estatística de teores de K_2O
aplicadas a zonas anômalas de potássio

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Geologia do Instituto de Geografia
da Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Mota da Silva

Monte Carmelo - MG

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

B333 Batista, Mayra Carolina Pereira, 2000-
2025 Modelagem Geológica 3D através de Furos de Sondagens
aplicados à Prospecção de minério de Potássio. [recurso
eletrônico] / Mayra Carolina Pereira Batista. - 2025.

Orientador: Fabiano Mota da Silva.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em
Geologia.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Geologia. I. Silva, Fabiano Mota da, 1985-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia.
Graduação em Geologia. III. Título.

CDU: 551

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

MAYRA CAROLINA PEFREIRA BATISTA

Modelagem geológica a partir de furos de sondagem e análise estatística de teores de K_2O
aplicadas a zonas anômalas de potássio

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Geologia do Instituto de Geografia
da Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Geologia.

Monte Carmelo – MG, 2025

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fabiano Mota da Silva – Orientador (IG/UFU)

Me. Marcos César Soares de Queiroz – Membro da Banca

Geólogo Fernando Aurélio Bergamasco – Membro da Banca

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me dar forças nos momentos mais difíceis e por iluminar meu caminho até aqui.

À minha família, que foi essencial durante toda essa jornada. Em especial, à minha tia Aurea, minha avó Lucimar, meu pai Aurélio e meu tio Oseias, obrigada por todo o apoio, carinho e incentivo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fabiano Mota, meu agradecimento sincero por toda a orientação ao longo dessa caminhada e por todas as oportunidades que me proporcionou ao longo do curso. Seu apoio foi essencial para meu crescimento acadêmico e pessoal, e sua confiança em mim abriu caminhos que marcaram profundamente minha formação.

Sou também muito grata aos amigos que fiz durante o curso e que levarei comigo para a vida, Maria Clara, João Vitor, Ivania, Andrea e Igor. Cada um de vocês fez a diferença nessa trajetória, tornando os desafios mais leves e os dias mais especiais.

Agradeço também a oportunidade de estágio que tive pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Geotectônica, que representou um momento marcante da minha graduação. Essa experiência só foi possível graças ao apoio do Prof. Dr. Fabiano Mota, do Prof. Dr. Cristiano Magini e do Prof. Dr. Reinhardt Fuck. Nos trabalhos dos doutorandos Marcos César e Daniele Silva, encontrei acolhimento, aprendizado e inspiração. Essa vivência me fez crescer não só como geóloga, mas também como pessoa.

À minha psicóloga, Carolina, agradeço com muito carinho por todo o apoio ao longo desse processo. Sua escuta atenta e sensível me ajudou a enxergar meu valor, a acreditar mais em mim mesma e a seguir em frente com mais leveza e confiança.

Sou grata a todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa caminhada.

RESUMO

O presente trabalho teve como foco a modelagem geológica tridimensional de corpos mineralizados de potássio na região de Sacramento–MG, a partir de dados de furos de sondagem. A pesquisa foi realizada com base em informações fornecidas pela empresa K-Nutrisolo Mineração Sacramento LTDA, integrando dados litológicos, topográficos e analíticos em ambiente digital por meio do software Leapfrog Geo. Os objetivos do estudo foram: i) organizar e estruturar um banco de dados geológico com base nos furos de sondagem; ii) elaborar um modelo geológico 3D representando a distribuição das unidades litológicas, com destaque para a mineralização de potássio; iii) analisar a geometria e a distribuição espacial dos corpos mineralizados; iv) avaliar os teores de K_2O com base nas análises químicas disponíveis, verificando sua viabilidade econômica. O modelo final permitiu interpretar com clareza a distribuição dos corpos mineralizados, identificar zonas com maior potencial de aproveitamento e embasar futuras decisões voltadas à prospecção mineral. Além de seu valor aplicado, o trabalho também possui relevância acadêmica ao demonstrar, na prática, a importância da modelagem geológica tridimensional como ferramenta de apoio à pesquisa mineral em estudos de avaliação inicial de depósitos.

Palavras-chave: Potássio, Furos de Sondagens, Modelagem 3D e Integração de dados.

ABSTRACT

The present work focused on the three-dimensional geological modeling of potassium mineralized bodies in the region of Sacramento-MG, based on data from boreholes. The research was carried out based on information provided by the company K-Nutrisolo Mineração Sacramento LTDA, integrating lithological, topographic and analytical data in a digital environment through the Leapfrog Geo software. The objectives of the study were: i) to organize and structure a geological database based on the boreholes; ii) to develop a 3D geological model representing the distribution of lithological units, with emphasis on potassium mineralization; iii) to analyze the geometry and spatial distribution of the mineralized bodies; iv) evaluate the K₂O contents based on the available chemical analyses, verifying their economic viability. The final model allowed for a clear interpretation of the distribution of mineralized bodies, identification of zones with greater potential for use and support future decisions aimed at mineral prospecting. In addition to its applied value, the work also has academic relevance by demonstrating, in practice, the importance of three-dimensional geological modeling as a tool to support mineral research in initial deposit evaluation studies.

Keywords: Potassium, Drilling Holes, 3D Modeling and Data Integration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa de localização da área de estudo no município de Sacramento, estado de Minas Gerais, Brasil.	11
Figura 2 – Mapa Geológico de Minas Gerais, onde a Folha Desemboque é representada pela área 28.....	14
Figura 3 - Mapa geológico da Folha Desemboque (MG), mostrando o posicionamento da área de estudo em relação aos domínios geológicos da Bacia do Paraná e do Grupo Araxá	16
Figura 4 – Região da Bacia do Paraná, localizada na América do Sul.....	17
Figura 5 - Basalto intensamente alterado, apresentando estrutura friável e solo residual de coloração avermelhada, típico dos processos de intemperismo	20
Figura 6 – A) e B) Rocha potássica em associação com o solo avermelhado originado dos basaltos.	21
Figura 7 - A) Rocha vulcânica exibindo amígdalas preenchidas por material afanítico, associadas a vesículas e matriz intensamente alterada; B) Fragmentos de rocha intemperizada mostrando amígdalas preenchidas, destacando a textura interna e a alteração da matriz.	22
Figura 8 –Mapa aerogamaespectrométrico da região de Sacramento-MG, destacando a anomalia de potássio. As áreas em tons rosa e vermelho intenso indicam concentrações elevadas do elemento.	23
Figura 9 - Mapa aerogamaespectrométrico da região, destacando a localização do "furo teste".	24
Figura 10 - Área anômala de potássio com o plano de furos de sondagem delineado.....	25
Figura 11 – A) Procedimento de perfuração de sondagem rotativa (B); Amostras de testemunho armazenadas em caixas, para posterior descrição e análise.....	26
Figura 12 - Arquivos de entrada utilizados: "Assays.csv", "Collar.csv", "Litho.csv" e "Surveys.csv".....	27
Figura 13 – Processo de importação dos dados de sondagem. A) Acesso à pasta "Drillhole Data" e seleção da opção "Import Drillholes"; B) Janela "Import Drillhole Data" aberta para a inserção dos arquivos "Collar", "Survey", "Lith" e "Assays".....	30
Figura 14 - A) Verificação das colunas do arquivo "Collar.csv", associando coordenadas East (X), North (Y) e Elev (Z); B) Importação da tabela "Assays.csv", configurando a coluna de teores de K ₂ O como valor numérico ("Numeric").....	31

Figura 15 - A) Acesso à ferramenta "Fix Errors" para correção de inconsistências na tabela "Assays"; B) Configuração de omissão de valores ausentes ("Omit") e confirmação das regras de tratamento, garantindo a integridade dos dados para a modelagem.	32
Figura 16 - Criação do modelo geológico a partir da opção "New Geological Model".....	33
Figura 17 - A) Modelagem geológica no Leapfrog utilizando a ferramenta "Surface Chronology"; B) Definição das litologias: solo como "New Erosion"; areia, argila, saprolito, arenito e basalto como "New Deposit"; e mineralização como "New Vein", devido à sua geometria mais concentrada.	33
Figura 18 - Configuração dos contatos litológicos: Use Contacts Below para solo, areia, argila e saprolito; Use Contacts Above para arenito e basalto.	34
Figura 19 - Organização das litologias em ordem cronológica, da mais recente (solo) à mais antiga (basalto), e aplicação da função Contact Surface.	35
Figura 20 - Modelo geológico 3D final gerado.	35
Figura 21 - Distribuição dos furos evidenciando variações altimétricas.....	37
Figura 22 - Modelo 3D gerado, mostrando a distribuição dos corpos geológicos entre unidades estéreis e litologias de interesse.....	38
Figura 23 - Visualização superior evidenciando corpos mineralizados espessos distribuídos continuamente, com exceção da porção sudoeste.	38
Figura 24 - A) Distribuição dos corpos mineralizados na porção Sul do modelo, com maior espessura; B) Porção Norte com corpos mais estreitos.	40
Figura 25 - Volumes das litologias presente na área de estudo.....	41
Figura 26 – Furos de sondagem e os teores de K ₂ O	42
Figura 27 - Distribuição espacial dos furos na área de estudo.	43
Figura 28 - Tabela estatística com dados de comprimento e teores de K ₂ O nas diferentes litologias modeladas.	44
Figura 29 - Box plot da mineralização evidenciando a concentração de amostras com teor de K ₂ O acima de 4%.....	45
Figura 30 - Gráfico de dispersão K ₂ O vs. K ₂ O mostrando tendência de concentração entre 4% e 8%.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplo dos dados registrados na tabela "Collar".....	28
Tabela 2 - Exemplo dos dados registrados na tabela "Survey".	28
Tabela 3 - Exemplo dos dados registrados na tabela "Lith".....	28
Tabela 4 - Exemplo dos dados registrados na tabela "Assays".	29

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Importância do potássio	10
1.2 Ocorrência “Verdetes”	11
1.3 Importância dos furo de sondagens	12
2 OBJETIVO.....	13
2.1 Objetivos Específicos	13
3 CONFIGURAÇÃO GEOLOGICA.....	14
3.1 Geologia Regional	14
3.1.1 Grupo Itararé.....	18
3.1.2 Grupo São Bento.....	18
3.2 Geologia Local.....	19
4 METODOLOGIA.....	22
4.1 Furos de sondagem	22
4.1.1 Elaboração de mapas aerogamaespectrométricos.....	22
4.1.2 Validação em campo.....	23
4.1.3 Integração e planejamento dos furos de sondagem	25
4.1.4 Execução da sondagem e caracterização inicial das amostras.....	26
4.2 Passo a passo da construção do modelo 3D	27
4.2.1 Organização dos dados de sondagem	27
4.2.2 Construção do Modelo 3D.....	29
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
5.1 Análise Modelo 3D.....	36
5.2 Análise teor de K ₂ O	41
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
7 REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A modelagem geológica representa uma ferramenta essencial em diversas áreas da geologia, sendo amplamente utilizada para diferentes finalidades que vão desde aplicações didáticas até propósitos econômicos e estratégicos, conforme destacado por Machado (2019).

O uso de modelos geológicos tridimensionais possibilita a determinação do volume e da geometria de diferentes litologias ou áreas mineralizadas, sendo uma ferramenta crucial para uma compreensão mais detalhada dos ambientes de exploração de recursos naturais e reservas minerais.

De acordo com Batista (2015), na indústria mineral os modelos geológicos 3D são atuantes em todas as etapas necessárias para o funcionamento do empreendimento, o uso da ferramenta se dá desde a pesquisa até a lavra. Além disso, com base nos resultados obtidos por meio da modelagem, é possível determinar a viabilidade em prosseguir ou encerrar uma exploração mineral.

A ferramenta pode também contribuir para a compreensão e desenvolvimento de estratégias e planejamentos que reduzam situações adversas, riscos ou probabilidades existentes não observadas inicialmente.

Os modelos tridimensionais (3D) proporcionam uma representação visual espacial mais intuitiva e abrangente das características geológicas e dos recursos minerais presentes em uma determinada área. Esta abordagem facilita a identificação de padrões geológicos, estruturas mineralizadas e regiões de interesse para a exploração mineral.

Machado (2019), desenvolveu um modelo tridimensional da cidade do Rio de Janeiro, com foco específico na região da Trilha Transcarioca. O principal objetivo desse trabalho foi promover o conhecimento geocientífico da área, utilizando a modelagem 3D para explorar e compreender as características geológicas e topográficas da região.

Roberto (2022), por sua vez, apresentou um estudo detalhado sobre a Bacia Potiguar com o objetivo de aprimorar o entendimento dos reservatórios da região e, assim, otimizar a recuperação e produção de recursos petrolíferos. Seu trabalho focou na análise da estrutura e geologia da bacia, utilizando modelos tridimensionais para identificar as áreas com maior potencial produtivo, buscando aumentar a eficiência das operações de extração e reduzir os custos de exploração. O estudo também destacou a importância de uma modelagem geológica precisa para a tomada de decisões estratégicas na indústria petrolífera.

Em uma outra vertente, Silva (2023) realizou a modelagem geológica tridimensional do Complexo Turmalina, localizado no Greenstone Belt Pitangui, uma área conhecida por sua riqueza em depósitos auríferos. A modelagem desenvolvida por Silva (2023), permitiu uma análise detalhada da disposição das dobras e da geometria dos depósitos de ouro, além de estabelecer correlações importantes entre a geologia estrutural da região, as falhas presentes e os condutos mineralizantes. Este trabalho contribuiu significativamente para a compreensão da estruturação geológica do complexo e de sua influência na localização e concentração dos depósitos minerais, facilitando futuras iniciativas de exploração mineral e mineração.

Esses estudos ilustram como a modelagem geológica tridimensional tem sido aplicada de forma diversa em diferentes contextos geológicos, desde a otimização da exploração de recursos em bacias sedimentares até a educação geocientífica além de análise de complexos minerais. Em cada caso, o uso de modelos 3D tem se mostrado essencial para a compreensão da geologia local e para o desenvolvimento de estratégias eficazes tanto na exploração mineral quanto no entendimento das dinâmicas geológicas e ambientais.

1.1 Importância do potássio

O potássio, um mineral de significativa importância, desempenha um papel crucial no desenvolvimento vegetal e, conseqüentemente, na produção alimentar. Além disso, é um componente essencial na produção de outros produtos relevantes na agroindústria, como os biocombustíveis (Kulaif *et al.*, 2017).

No contexto da agricultura brasileira, o potássio assume uma relevância notável, devido as características particulares dos solos do país. Este mineral é fundamental para a fertilidade do solo e, conseqüentemente, para a produtividade agrícola (Nascimento *et al.*, 2008).

O Brasil, sendo um dos maiores produtores agropecuários do mundo, figura também como um dos principais importadores de potássio (Kulaif *et al.*, 2017). Esta realidade reflete a demanda interna elevada pelo mineral, impulsionada pela extensa atividade agropecuária do país.

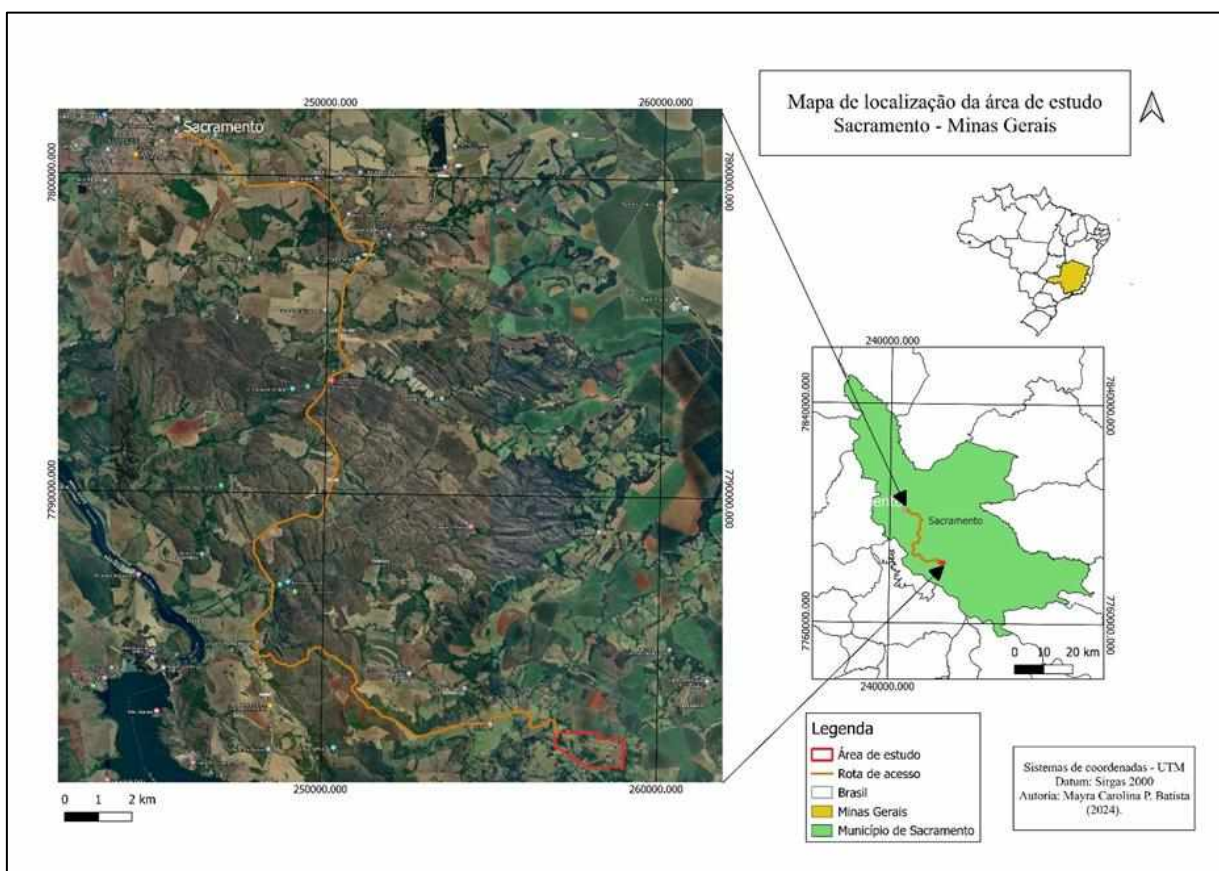
Conseqüentemente, o investimento em pesquisas e exploração do minério de potássio emerge como uma estratégia crucial para o Brasil. Esta estratégia tem o potencial de mitigar a atual dependência do país em relação às importações deste mineral essencial. Além disso,

garantir a segurança do suprimento de potássio. Ademais, esta iniciativa pode impulsionar o desenvolvimento econômico do país, reforçando sua posição no cenário econômico global.

1.2 Ocorrência “Verdetes”

A região da área em estudo está localizada aproximadamente a 45 quilômetros a oeste da cidade de Sacramento, no estado de Minas Gerais (Figura 01). Para acessar a área de estudo, recomenda-se inicialmente seguir pela rodovia estadual MG-428 em direção leste, até chegar ao cruzamento com a rodovia federal BR-464. A partir desse ponto, o trajeto segue rumo ao sudeste, em direção ao Desemboque, percorrendo uma estrada não pavimentada por cerca de 29 quilômetros até alcançar o povoado de Jaguarinho. A área objeto de estudo está localizada dentro dos limites da propriedade rural denominada Fazenda Água Santa.

Figura 1- Mapa de localização da área de estudo no município de Sacramento, estado de Minas Gerais, Brasil.



Fonte: A Autora.

Conforme discutido por Piza *et al.* (2011), as rochas denominadas "verdetes" representam uma classe de rochas metassedimentares notáveis pela sua alta concentração de potássio, predominantemente composta por glauconita. Sua distribuição ocorre em uma ampla extensão territorial dentro do estado de Minas Gerais, Brasil, com destaque para a região da Serra da Saudade, situada no município de Abaeté. Geologicamente, essas formações são associadas ao Cráton do São Francisco, especificamente ao Grupo Bambuí, dentro da Formação Serra da Saudade. Esta formação é caracterizada pela alternância entre folhelhos e camadas de verdetes, com espessuras variando de centímetros a metros, além de apresentar alguns horizontes de fosforita em sua porção superior, conforme destacado por Varelli *et al.* (1992).

Além das áreas mencionada acima, há uma região do Alto Paranaíba no município de Sacramento, Minas Gerais, a qual vem sendo objeto de estudo pela empresa K-Nutrisolo, visando a exploração de rochas com alta concentração de K₂O. Geologicamente, a região em questão está situada no domínio geotectônico da Bacia do Paraná, dentro da unidade litoestratigráfica do Grupo São Bento, pertencente à Formação Serra Geral (Veronez; Nóbrega, 2023). As rochas predominantes nesta região são basálticas, vulcânicas e vulcanossedimentares, caracterizadas pela presença significativa de minerais potássicos.

1.3 Importância dos furo de sondagens

Os levantamentos por furos de sondagem constituem uma ferramenta de suma importância na obtenção de informações diretas e precisas acerca das características geológicas e mineralógicas do subsolo em pontos específicos da região de interesse. Este método possibilita uma modelagem geológica mais minuciosa e detalhada em comparação com abordagens de mapeamento geológico de superfície, as quais podem ser limitadas pela presença de cobertura vegetal e pelas condições de exposição do terreno.

Os furos de sondagem viabilizam a coleta de amostras representativas do subsolo, as quais podem ser submetidas a análises laboratoriais visando a identificação e caracterização das mineralizações presentes. O procedimento revela-se fundamental para a avaliação do potencial econômico dos depósitos minerais e para a definição de estratégias de exploração mais eficazes.

Os dados obtidos por meio dos furos de sondagem desempenham um papel essencial na estimativa dos recursos minerais e na delimitação das reservas minerais dentro da área de estudo. A partir das informações geológicas e das características das amostras coletadas, é

possível desenvolver modelos tridimensionais que representam de forma precisa a distribuição e a qualidade dos depósitos minerais presentes.

A utilização da geofísica na etapa de mapeamento possibilita o mapeamento de grandes áreas, identificação de estruturas geológicas e fornecimento de imagens detalhadas do subsolo. Resultando na caracterização e delimitação de jazidas minerais, auxiliando na demarcação de furos de sondagem.

Utilizar a geofísica em atividades de mapeamento resulta em uma prospecção mineral mais eficiente, reduzindo custos e riscos (Silva, 2000). Técnicas geofísicas contribuem significativamente para ampliar a compreensão da continuidade e distribuição de unidades litológicas e estruturas (Borghetti; Philipp, 2016). Além disso, a aplicação desses métodos, integrada aos dados geológicos, desempenha um papel essencial na caracterização de contatos e na delimitação de corpos litológicos (França *et al.*, 2016).

2 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é promover uma maior proximidade entre a mineradora e os alunos concluintes do curso de Geologia, proporcionando aos estudantes a oportunidade de processar, modelar e interpretar os diversos dados provenientes das atividades de mineração. Com isso o trabalho apresenta um passo a passo para a aquisição de um modelo geológico tridimensional utilizando o *software Leapfrog*.

Atualmente, existe uma demanda significativa por profissionais especializados em integrações de dados, conforme proposto neste projeto. Nesse contexto, espera-se que, utilizando os dados já existentes da mineradora, os alunos possam se qualificar para as atividades de exploração mineral.

2.1 Objetivos Específicos

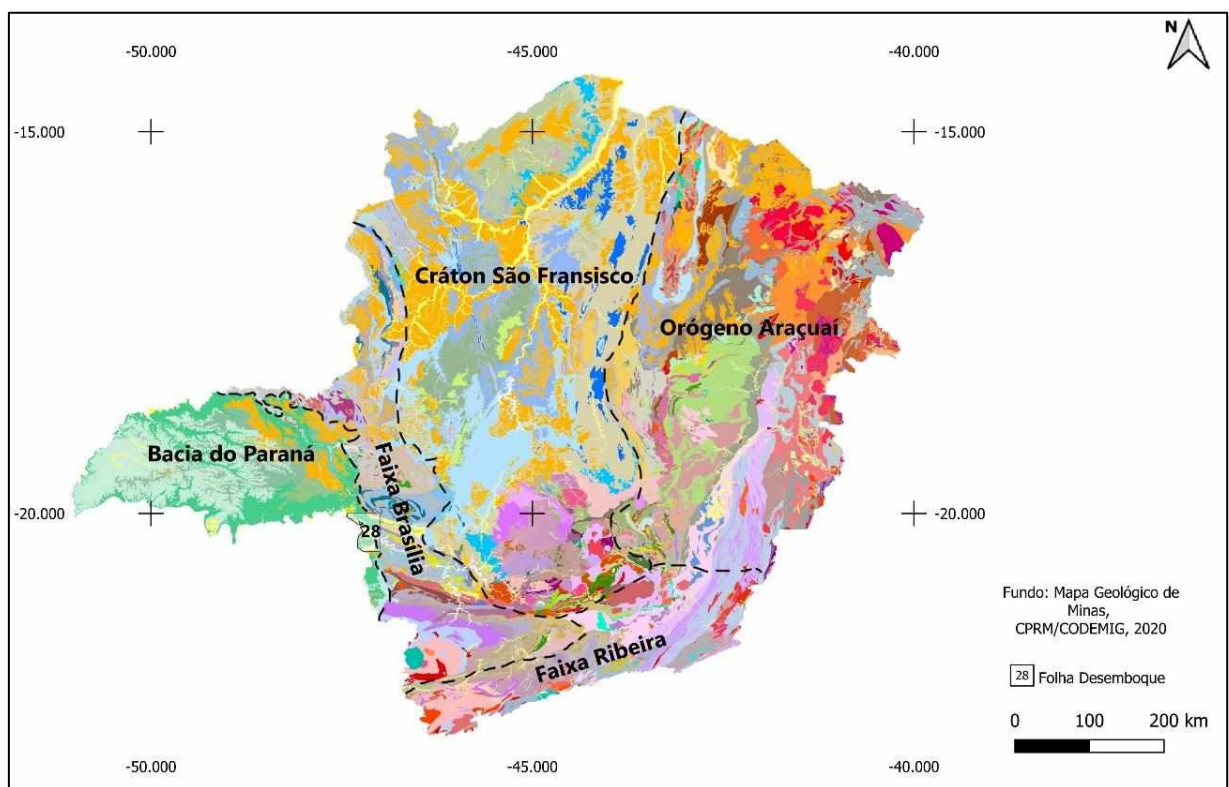
- Criar um banco de dados em Sistema de Informações Geográficas (SIG) utilizando os dados obtidos dos furos de sondagem;
- Desenvolver modelos geológicos tridimensionais (3D) a partir das sondagens realizadas;
- Delimitar áreas propícias para a prospecção e exploração mineral;
- Identificar alvos para a abertura de novas frentes de lavra.

3 CONFIGURAÇÃO GEOLOGICA

3.1 Geologia Regional

Para a elaboração deste capítulo, foi utilizada a Folha Desemboque (SF.23-V-A-II), em uma escala de 1:100.000 (Simões *et al.*, 2017). Na figura 2, é possível visualizar a representação da Folha Desemboque, destacada pela área 28.

Figura 2 – Mapa Geológico de Minas Gerais, onde a Folha Desemboque é representada pela área 28.



Fonte: Modificado de Seer e Moraes (2017).

De acordo com a pesquisa de Simões *et al.* (2017), a área correspondente à Folha Desemboque é caracterizada pela presença de quatro domínios litotectônicos principais, conforme ilustrado na Figura 3. Esses domínios são: a Bacia do Paraná, o Domínio Interno, o Domínio Externo e o Domínio Autóctone.

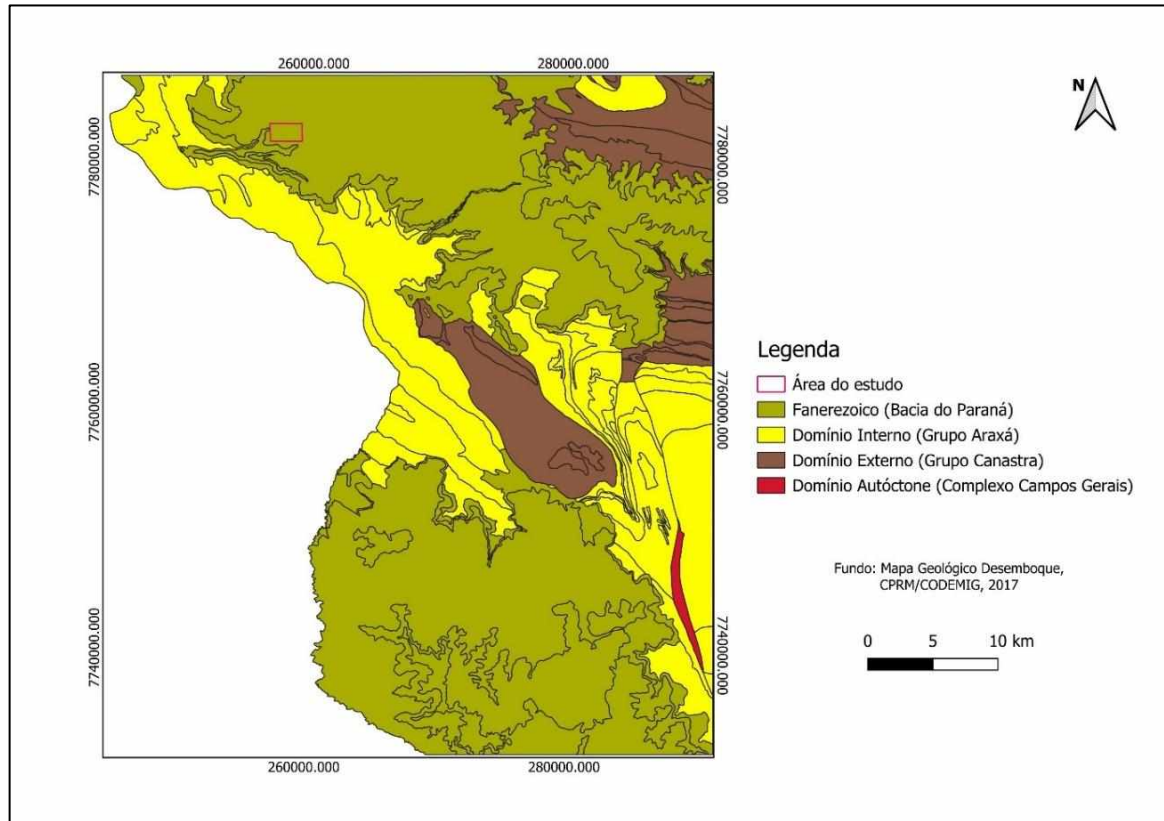
A Bacia do Paraná é composta por rochas fanerozoicas. A bacia é constituída por rochas sedimentares, com a Formação Aquidauana na base, seguida pelas Formações Botucatu e Serra Geral. Estas, por sua vez, são cobertas pelas rochas da Formação Marília.

O Domínio Interno contém rochas metassedimentares neoproterozoicas do Grupo Araxá. Este domínio é composto por duas escamas tectônicas que se sobrepõem às rochas do Domínio Externo. A primeira escama, é representada pela unidade Granada Xistos. A segunda escama é a Nappe de Passos apresentando-se complexamente dobrada e cortada por falhas tardias (Simões, 1995; Uhlein *et al.*, 2004; Simões *et al.*, 2017).

Por sua vez, o Domínio Externo é formado por metassedimentares neoproterozoicas do Grupo Canastra. As rochas do Grupo Canastra, estão distribuídas em três segmentos distintos: Segmento Tapira, Segmento Canastra e Segmento Represa de Estreito.

Finalmente, o Domínio Autóctone inclui rochas arqueanas a paleoproterozoicas, associadas ao embasamento do Cráton São Francisco e ao Complexo Campos Gerais. Essas rochas afloram entre as rochas da Nappe de Passos, formando uma lente tectônica ao longo da Falha de Cássia.

Figura 3 - Mapa geológico da Folha Desemboque (MG), mostrando o posicionamento da área de estudo em relação aos domínios geológicos da Bacia do Paraná e do Grupo Araxá



Fonte: Modificado de Simões *et al.* (2017).

A área do presente estudo, localizada na região de Sacramento, está situada na porção nordeste da bacia do Paraná, abrangendo rochas da Formação Serra Geral (Grupo São Bento).

De acordo com Almeida *et al.* (1977), a Província do Paraná, corresponde à bacia sedimentar do Paraná, uma das grandes sinéclises que se implantaram sobre a Plataforma Sulamericana a partir do Siluriano. A riqueza mineral da Província Paraná se associa às rochas sedimentares (carvão, pirobetume e calcário) e às magmáticas, notadamente as de filiação alcalina.

A Bacia do Paraná é uma vasta área sedimentar localizada na América do Sul, com uma área total aproximada de 1,5 milhão de quilômetros quadrados, abrangendo os territórios do Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai (Figura 4). A bacia possui uma feição ovalada e um eixo maior orientado no sentido norte-sul, seus contornos são influenciados por processos erosivos relacionados à geotectônica mesozoica e cenozoica (Milani *et al.*, 2007).

Figura 4 – Região da Bacia do Paraná, localizada na América do Sul.



Fonte: Modificado de Almeida e Lima (2021).

A parte leste da bacia, que vai do Sudeste brasileiro ao Uruguai, sofreu intensa erosão devido ao soerguimento crustal ligado ao rifte do Atlântico Sul, resultando na remoção de até 2.500 metros de sedimentos (Zanotto, 1993 *apud* Milani *et al.*, 2007). Na porção ocidental destaca-se uma estrutura positiva orientada norte-sul, resultante da pressão litosférica gerada pelo cinturão andino, onde se localizam o Pantanal Mato-Grossense e o Arco de Asunción (Shiraiwa, 1993 *apud* Milani *et al.*, 2007).

Ao sul e sudoeste, a bacia se estende até o Uruguai e a Argentina. A borda norte-nordeste aparenta ser um limite deposicional original, evidenciado pela predominância de sedimentos arenosos nas unidades geológicas dessa região (Milani *et al.*, 2007).

3.1.1 Grupo Itararé

3.1.1.1 Formação Aquidauana

De acordo com Milani *et al.* (2007), a unidade está inserida na Supersequência Gondwana I. A Formação Aquidauana é caracterizada pelos depósitos glaciogênicos da Bacia do Paraná, apresentando diamictitos que podem ser maciços ou estratificados (Seer; Moraes 2017). Esses depósitos contêm seixos e blocos de diversas litologias, refletindo a ação das geleiras que transportaram grandes volumes de sedimentos.

Segundo Simões *et al.* (2017), a Formação Aquidauana, é caracterizada principalmente por arenitos de diferentes granulações, também inclui siltitos, lamitos, ritmitos, diamictitos e conglomerados como componentes secundários, refletindo uma ampla variedade de fácies sedimentares.

Na região da Folha Desemboque, foram identificadas duas fácies sedimentares: uma fácies conglomerática na base, associada ao embasamento neoproterozoico, e uma fácies arenosa, composta por arenitos de diversas granulações (Simões *et al.*, 2017). O topo da camada da Formação Aquidauana está em contato com a Formação Serra Geral.

3.1.2 Grupo São Bento

3.1.2.1 Formação Botucatu

A Formação Botucatu é um vasto campo de dunas que se formou durante o Jurássico sobre o antigo continente Gondwânico (Fernandes; Carvalho, 2007). Posteriormente, no Eocretáceo, essa formação foi coberta pelo intenso vulcanismo intracontinental, evidenciado pela Formação Serra Geral.

De acordo com Simões *et al.* (2017), a Formação Botucatu é composta por arenitos finos a médios, apresenta colorações que variam de alaranjado a róseo, com grãos bem arredondados

e foscas. Ela exibe estratificações cruzadas, geralmente tabulares e de grande escala, caracterizando uma fácies típica de ambiente eólico. Os arenitos são altamente maduros, tanto textural quanto mineralogicamente, e possuem um bom grau de seleção.

3.1.2.2 Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral está presente na região sob a forma de derrames de basalto (Unidade Vulcânica) e como uma soleira de diabásio. Conforme Simões *et al.* (2017) a região de Sacramento engloba a Unidade Vulcânica. Geomorfologicamente, essa unidade localiza-se nas partes mais elevadas e no topo das vertentes.

Segundo Tamrat e Ernesto (1999), as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral sobrepõem-se à Formação Botucatu, datada do Jurássico-Cretáceo, a qual é constituída por arenitos eólicos que representam o topo da sequência Gondwana, já na porção norte são cobertos por sedimentos do Cretáceo Superior, predominando a Formação Bauru (Tamrat; Ernesto, 1999).

Os basaltos da região possuem características toleíticas, apresentando coloração que varia de cinza escuro a negro, e, quando intemperizados, tendem a assumir tonalidades arroxeadas ou cinza médio (Seer; Moraes, 2017). O plagioclásio é o mineral predominante, aparecendo sob a forma de micrólitos abundantes na matriz e, em alguns casos, como microfenocristais. Os piroxênios presentes são principalmente augita, com menor ocorrência de pigeonita, ambos podendo se manifestar tanto como micrólitos quanto como microfenocristais (Seer; Moraes, 2017).

Em alguns casos, há a presença de foliação primária, marcada pela orientação preferencial de cristais de feldspato e/ou vesículas, características que evidenciam o fluxo do magma durante sua solidificação (Simões *et al.*, 2017).

3.2 Geologia Local

A geologia da área estudada é composta principalmente por basaltos da Formação Serra Geral, que foram mais facilmente observadas ao longo das drenagens (Figura 5). Quando intemperizadas, essas rochas originaram solos com coloração variando do vermelho ao alaranjado e, em alguns casos, até arroxeada.

Figura 5 - Basalto intensamente alterado, apresentando estrutura friável e solo residual de coloração avermelhada, típico dos processos de intemperismo



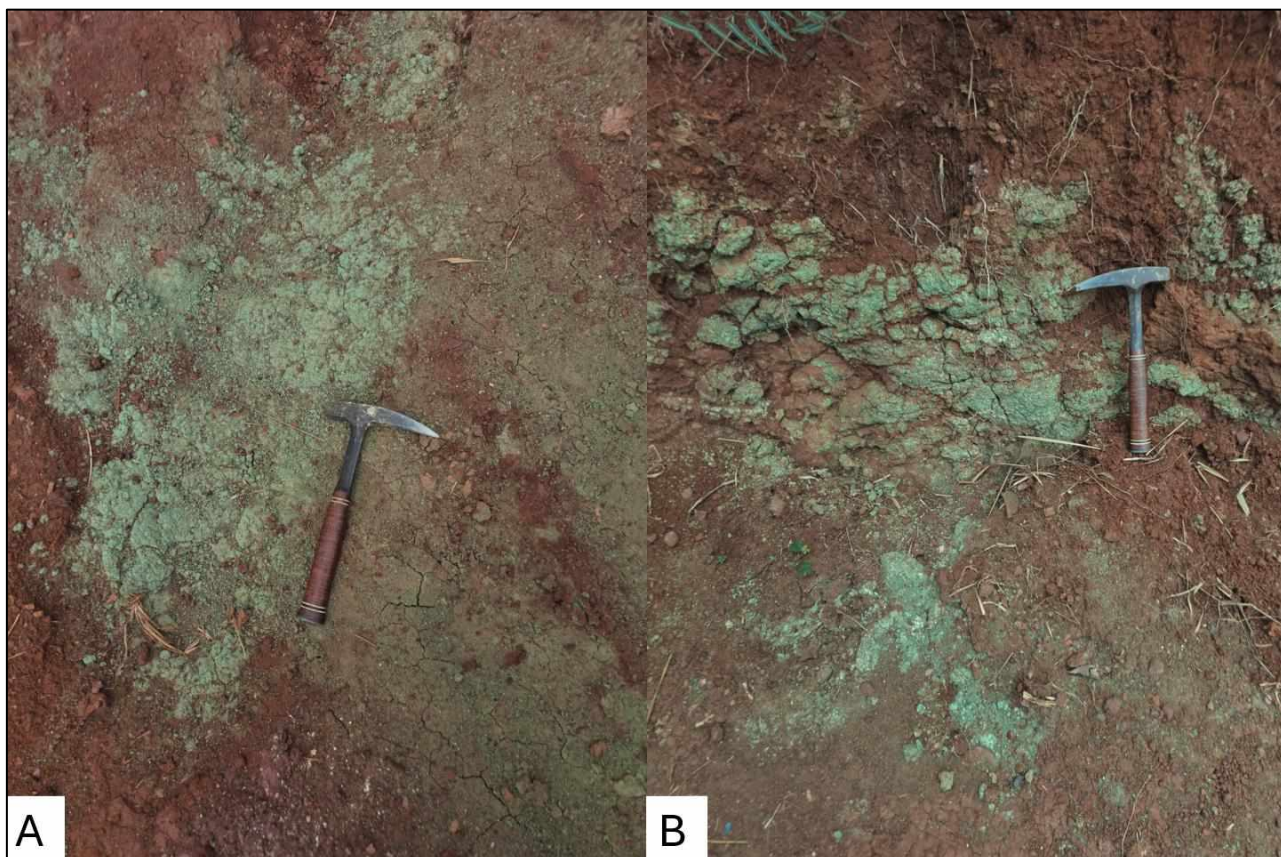
Fonte: A Autora.

Também foi identificada na região a presença de rochas potássicas, ocorrendo em interação com os basaltos e o solo residual resultante do intemperismo do mesmo (Figura 6). Essas rochas foram mais facilmente reconhecidas em campo devido à sua coloração esverdeada característica, bastante distinta das demais unidades da área. Em trechos onde os afloramentos estavam melhor preservados, especialmente em cortes de estrada, foi possível observar com clareza o contato entre a rocha potássica e o basalto, o que contribuiu significativamente para a interpretação geológica da região.

No entanto, um desafio observado foi o fato de que grande parte dessas rochas potássicas se encontra frequentemente ocultas por uma camada de solo avermelhado, resultante do intemperismo, o que dificulta sua visibilidade direta. Esse solo, ao encobrir as rochas, pode sugerir que as áreas de ocorrência dos minerais potássicos se estendam além das regiões

mapeadas inicialmente. Por esse motivo, tornou-se essencial combinar as informações das observações de campo com os modelos geológicos e os dados de sondagem, a fim de delimitar com mais precisão as áreas com potencial mineral.

Figura 6 – A) e B) Rocha potássica em associação com o solo avermelhado originado dos basaltos.



Fonte: A Autora.

Durante o trabalho de campo, também foram observados fragmentos incluídos em matriz vulcânica, vesículas preenchidas por sedimentos e amígdalas contendo material de granulação muito fina, características que indicam um ambiente com influência vulcano-sedimentar (Figura 7).

Figura 7 - A) Rocha vulcânica exibindo amígdalas preenchidas por material afanítico, associadas a vesículas e matriz intensamente alterada; B) Fragmentos de rocha intemperizada mostrando amígdalas preenchidas, destacando a textura interna e a alteração da matriz.



Fonte: A Autora.

4 METODOLOGIA

4.1 Furos de sondagem

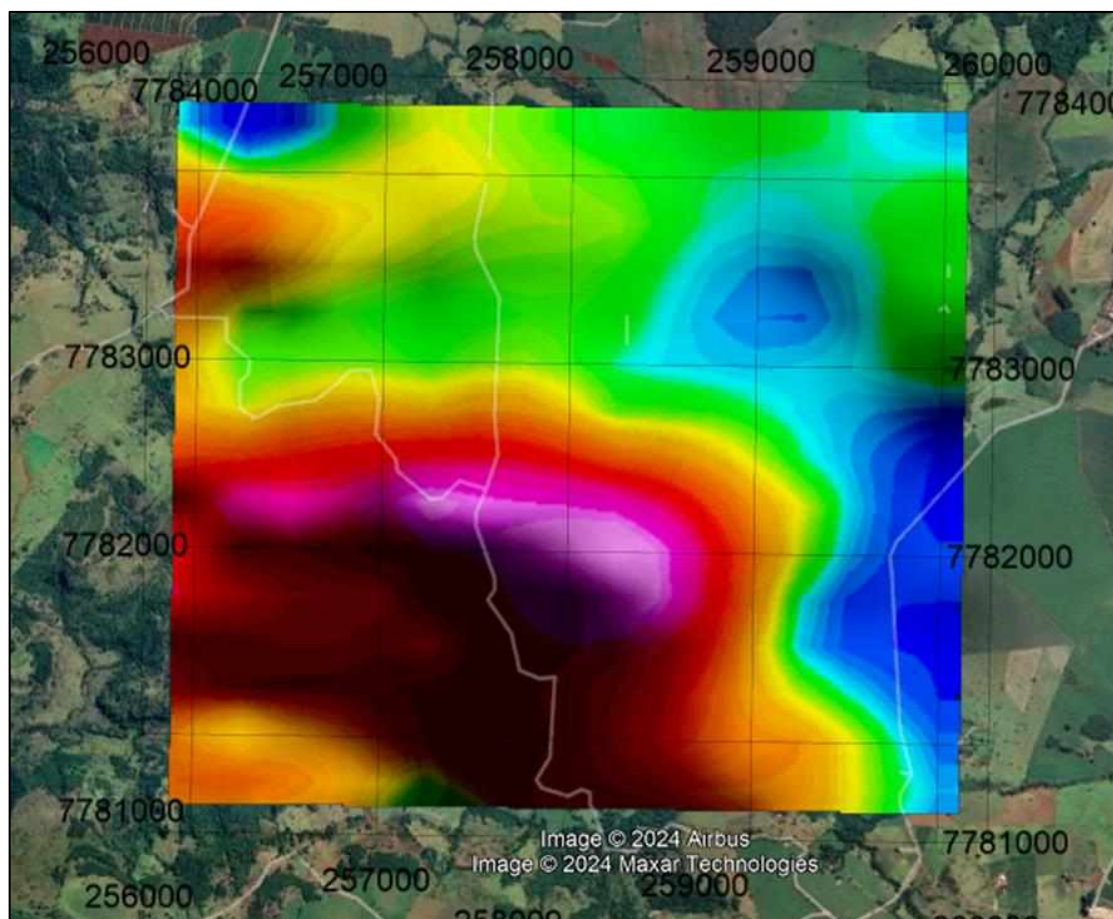
Com a finalidade de identificar regiões que pudessem revelar potenciais promissores em termos de mineralização, foram implementadas diversas metodologias que permitiram uma análise abrangente da região de estudo. Essas abordagens incluíram:

4.1.1 Elaboração de mapas aerogamaespectrométricos

Foram elaborados mapas aerogamaespectrométricos (Figura 8), com o intuito de identificar zonas anômalas associadas à presença de potássio (K). O canal correspondente ao

potássio foi o principal parâmetro analisado, permitindo a detecção de variações significativas na concentração desse elemento ao longo da área.

Figura 8 –Mapa aerogamaespectrométrico da região de Sacramento-MG, destacando a anomalia de potássio. As áreas em tons rosa e vermelho intenso indicam concentrações elevadas do elemento.



Fonte: A Autora.

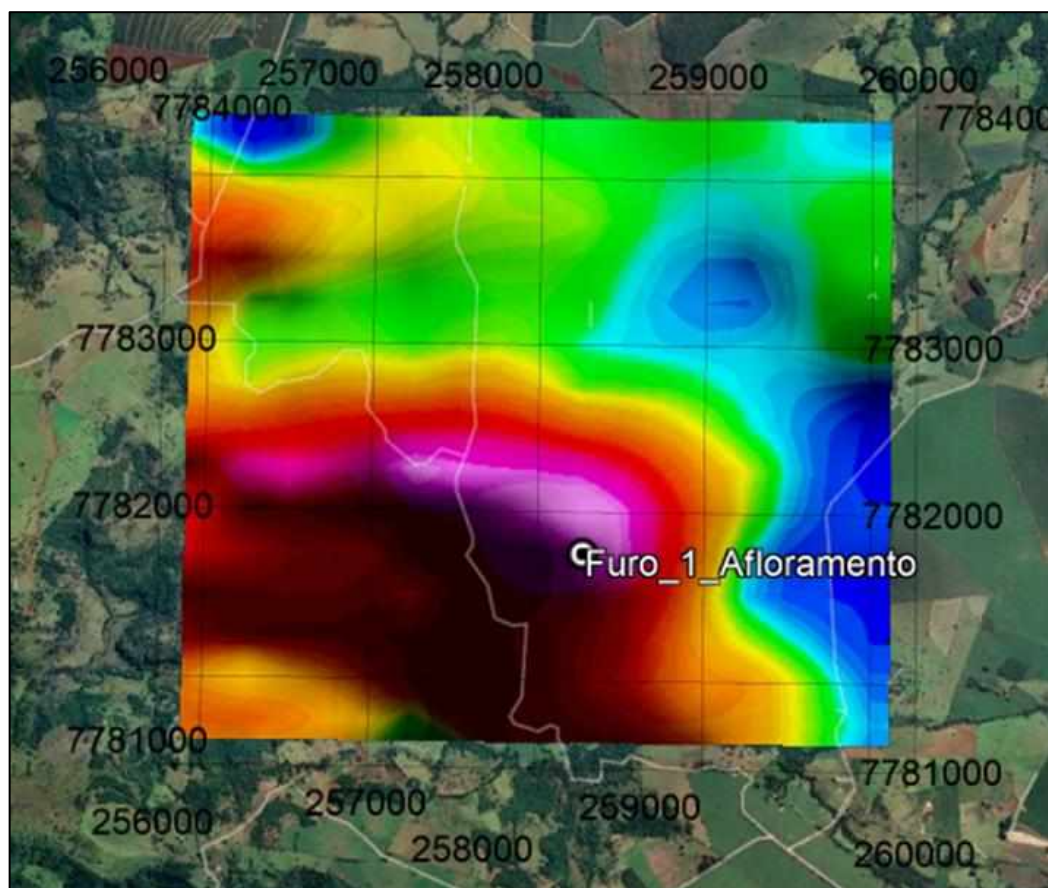
4.1.2 Validação em campo

Foi realizada uma visita técnica à área de estudo, com o objetivo de verificar, *in loco*, a existência de afloramentos mineralizados que pudessem corroborar as anomalias previamente identificadas nos dados aerogeofísicos. Com base na interpretação do mapa de anomalia de potássio, foram selecionados pontos que apresentavam forte indicação de mineralização. Nesses locais, registraram-se coordenadas geográficas específicas que serviram como referência para a execução dos furos de teste.

Esses furos teste foram fundamentais para validar as anomalias identificadas nos mapas aerogamaespectrométricos, uma vez que permitiram uma análise mais aprofundada da mineralização presente na região. A partir das coordenadas coletadas, foi elaborado um plano detalhado de sondagem, visando otimizar a exploração mineral e aumentar a eficiência dos trabalhos subsequentes.

A Figura 9 ilustra a localização das coordenadas obtidas em campo, que se encontram na borda de uma intensa zona anômala identificada no canal do potássio. Essa correspondência entre as observações de campo e os dados geofísicos reforçou a importância da integração entre as metodologias utilizadas, validando as anomalias detectadas e corroborando a hipótese de que a área possui potencial mineral.

Figura 9 - Mapa aerogamaespectrométrico da região, destacando a localização do "furo teste".



Fonte: A Autora.

4.1.3 Integração e planejamento dos furos de sondagem

A etapa de integração de dados consistiu em compilar todas as informações obtidas nos levantamentos anteriores, juntamente com os novos dados coletados durante a visita ao campo, para fundamentar o planejamento dos furos de sondagem. Esse processo foi essencial para garantir que todas as variáveis relevantes fossem consideradas, otimizando assim a eficácia da exploração mineral.

A Figura 10 ilustra o mapa que destaca a área anômala de potássio, acompanhada das linhas delineadas que representam o planejamento dos furos de sondagem diamantada. Com base na análise das informações integradas, foi possível desenvolver um plano de sondagem estratégico, focado na continuidade da delimitação da área mineralizada. Essa abordagem visou, em particular, aprofundar o conhecimento sobre a extensão e a distribuição da jazida.

Figura 10 - Área anômala de potássio com o plano de furos de sondagem delineado.



Fonte: A Autora.

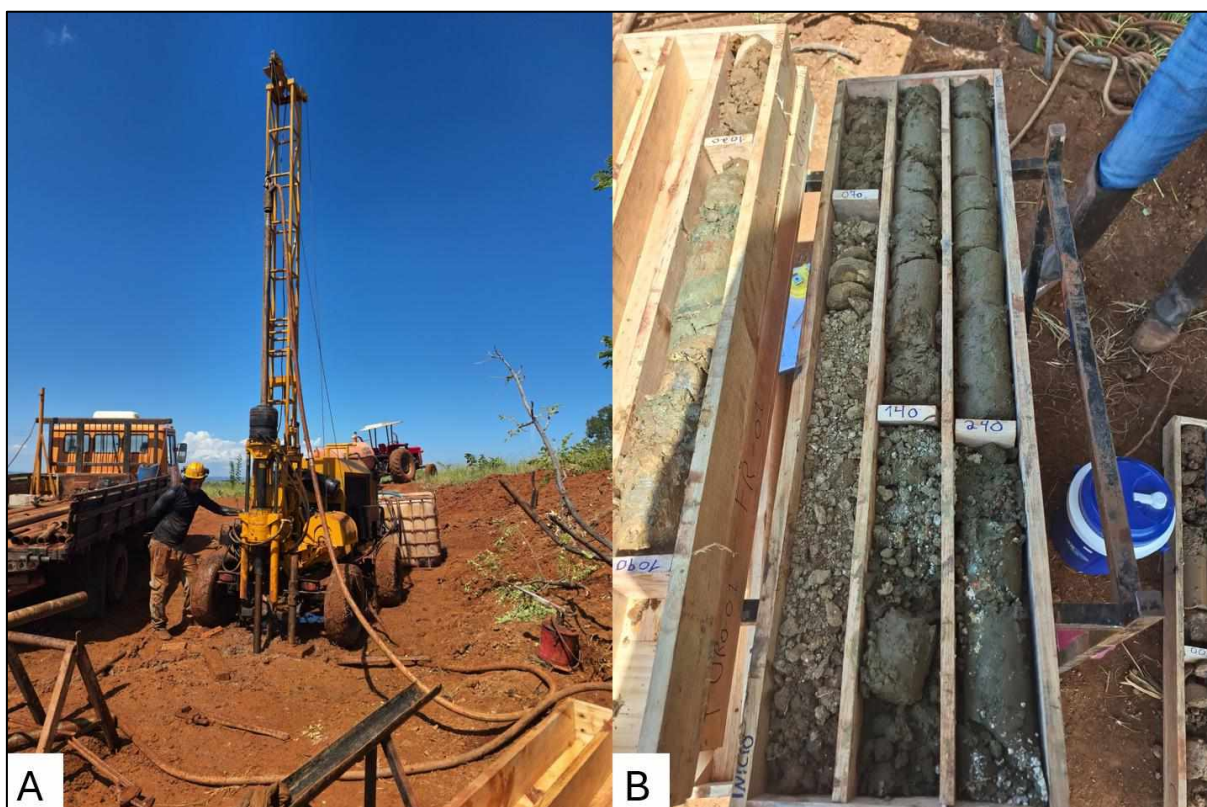
Essas etapas não apenas facilitaram a elaboração de um plano de sondagem mais robusto, mas também estabeleceram uma base sólida para as atividades subsequentes de

exploração. A combinação das informações obtidas em campo com as análises geofísicas permitiram uma compreensão mais ampla, essencial para a modelagem da jazida e para a avaliação do seu potencial econômico. Assim, cada fase se destacou como um passo fundamental no processo de exploração mineral, contribuindo para a identificação precisa das áreas com maior potencial para exploração.

4.1.4 Execução da sondagem e caracterização inicial das amostras

Após a realização do mapeamento geológico e a definição dos pontos estratégicos, iniciaram-se os furos de sondagem (Figura 11 – A), conduzidos de acordo com as normas técnicas atuais. Durante esse processo as amostras de testemunho foram coletadas e imediatamente acondicionadas em caixas apropriadas, fabricadas especificamente para esse fim (Figura 11 – B). Cada caixa foi devidamente identificada com o número do furo e sua sequência numérica, já que um único furo pode exigir várias caixas conforme a profundidade alcançada.

Figura 11 – A) Procedimento de perfuração de sondagem rotativa (B); Amostras de testemunho armazenadas em caixas, para posterior descrição e análise.



Fonte: A Autora.

Para garantir a organização e rastreabilidade das amostras, cada caixa foi marcada com informações detalhadas, como o início e o fim de cada intervalo amostrado e a metragem correspondente de cada avanço da perfuração. Esse controle minucioso permitiu um acompanhamento preciso ao longo de todo o processo.

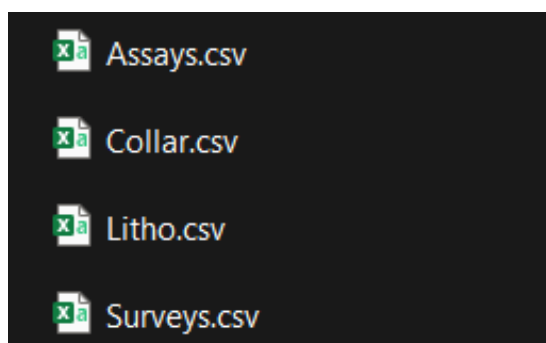
A análise preliminar das amostras foi realizada no local pelo geólogo responsável, observando aspectos macroscópicos como cor, textura e composição mineralógica. A porção mineralizada se destacou pela coloração esverdeada e textura argilosa, características típicas da presença de minerais de potássio.

4.2 Passo a passo da construção do modelo 3D

4.2.1 Organização dos dados de sondagem

Após o recebimento dos dados dos furos de sondagem, estes foram organizados em tabelas no formato *csv* (*Comma Separated Values*), contendo as informações essenciais para a construção do modelo geológico tridimensional. Os dados foram agrupados em quatro tabelas principais: *Collar*, *Survey*, *Lith* e *Assays* (Figura 12).

Figura 12 - Arquivos de entrada utilizados: "*Assays.csv*", "*Collar.csv*", "*Litho.csv*" e "*Surveys.csv*".



Fonte: A Autora.

A tabela *Collar* (Tabela 1), reúne as informações de identificação de cada furo (*Hole ID*), suas respectivas localizações geográficas (*east* e *north*), a elevação do furo de sondagem (*Elevation*) e a profundidade total perfurada (*Max Depth*). Os furos foram identificados com o prefixo PAS-FR-, seguido da numeração correspondente.

Tabela 1 – Exemplo dos dados registrados na tabela "Collar".

Hole ID	Local Easting	Local Northing	Elevation	Max Depth
PAS-FR-01	258322	7781858	979	30.51
PAS-FR-02	257911	7782026	974	32.2

Fonte: A Autora.

A tabela *Survey* (Tabela 2) apresenta os dados de orientação das sondagens, incluindo a identificação do furo (*Hole ID*), a profundidade de leitura (*Depth*), o ângulo de mergulho (*Dip*) e o azimute (*Azim*), informações que foram essenciais para a reconstrução espacial precisa dos trajetos dos furos no *software Leapfrog*.

Tabela 2 - Exemplo dos dados registrados na tabela "Survey".

Hole ID	Depth	Azim amg	Azim grid	Dip
PAS-FR-01	0	0	0	-90
PAS-FR-01	30.51	0	0	-90

Fonte: A Autora .

A tabela *Lith* (Tabela 3) reúne os dados litológicos descritos ao longo dos furos. Ela contém as colunas de identificação do furo (*Hole ID*), amostra (*Sample*), profundidade inicial e final de cada intervalo (*From* e *To*), bem como a litologia correspondente (*Lith*). Com base nesses dados, foi possível classificar os materiais encontrados durante a sondagem em sete principais unidades litológicas: solo, areia, arenito, argila, saprolito, basalto e mineralização. Essa classificação foi utilizada como base para a modelagem geológica, possibilitando a construção de superfícies que representam os contatos entre as unidades descritas.

Tabela 3 - Exemplo dos dados registrados na tabela "Lith".

Hole ID	Sample	From	To	Lith
PAS-FR-01	PAS-FR-01-AM-A	0	9	Mineralização
PAS-FR-01	PAS-FR-01-AM-B	9	14.3	Argila
PAS-FR-01	PAS-FR-01-AM-C	14.3	18.9	Mineralização
PAS-FR-01	PAS-FR-01-AM-D	18.9	21.8	Basalto
PAS-FR-01	PAS-FR-01-AM-E	21.8	27.2	Mineralização
PAS-FR-01	PAS-FR-01-AM-F	27.2	30.51	Arenito

Fonte: A Autora.

Por fim, a tabela *Assays* (Tabela 4) contém os dados de análise química dos teores de K₂O. Essa planilha apresenta as colunas de identificação de cada um dos furos (*Hole ID*), amostra (*Sample*), profundidade inicial e final da amostragem (*From* e *To*) e os respectivos teores de óxido de potássio (K₂O) obtidos por meio de análise laboratorial. Esses dados foram utilizados na interpolação dos teores e na geração do modelo de distribuição de K₂O na área de estudo, servindo como base para a avaliação do potencial mineral.

Tabela 4 - Exemplo dos dados registrados na tabela "*Assays*".

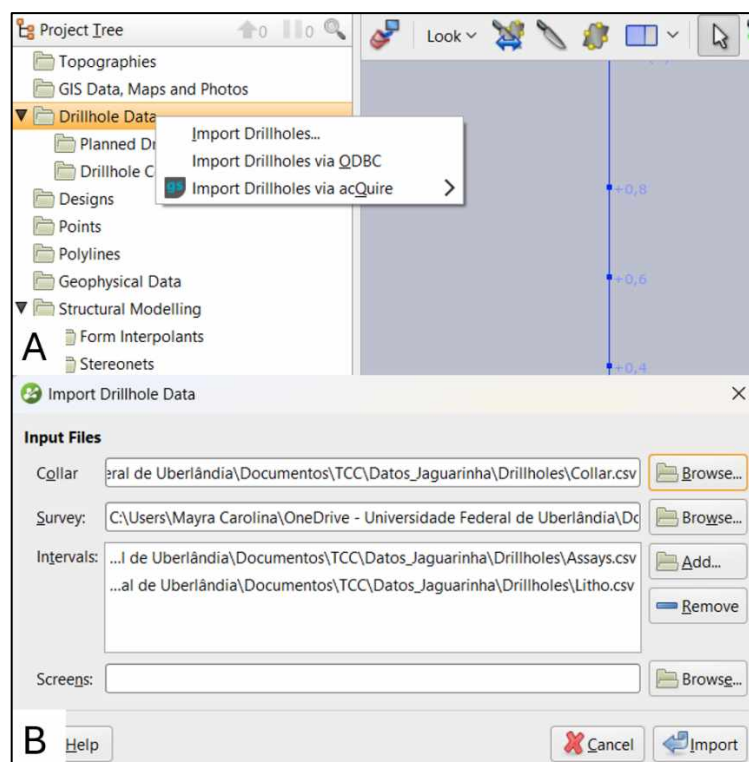
Hole ID	Sample	From	To	K2O
PAS-FR-01	PAS-FR-01-AM-01	4	4.2	4.52
PAS-FR-01	PAS-FR-01-AM-02	9	9.2	1.69
PAS-FR-01	PAS-FR-01-AM-03	13	13.2	1.9
PAS-FR-01	PAS-FR-01-AM-04	17	17.2	4.84
PAS-FR-01	PAS-FR-01-AM-05	23	23.2	6.54
PAS-FR-01	PAS-FR-01-AM-06	26.5	26.7	5.18

Fonte: A Autora.

4.2.2 Construção do Modelo 3D

Para iniciar-se o processo de modelagem, foi necessário importar os dados provenientes dos furos de sondagem. A primeira etapa consistiu em acessar a pasta denominada "*Drillhole Data*", onde foi selecionada a opção "*Import Drillholes*" (Figura 13 – A). Ao selecionar essa funcionalidade, foi aberta a aba "*Import Drillhole Data*", na qual foram inseridos os arquivos contendo as informações de localização, orientação, litologia e teor de potássio, nomeados como "*Collar*", "*Survey*", "*Lith*" e "*Assays*" (Figura 13 – B).

Figura 13 – Processo de importação dos dados de sondagem. A) Acesso à pasta "Drillhole Data" e seleção da opção "Import Drillholes"; B) Janela "Import Drillhole Data" aberta para a inserção dos arquivos "Collar", "Survey", "Lith" e "Assays".



Fonte: A Autora.

Durante o carregamento dos arquivos, foi necessário assegurar que as colunas de coordenadas espaciais estivessem corretamente mapeadas: *East* (X), *North* (Y) e *Elev* (Z), garantindo assim a precisão na localização dos furos dentro do modelo (Figura 14 – A). Na tabela "Assays", a coluna referente ao teor de K₂O foi configurada como tipo "Numeric", de modo a permitir a correta leitura dos valores pelo *software* (Figura 14 – B).

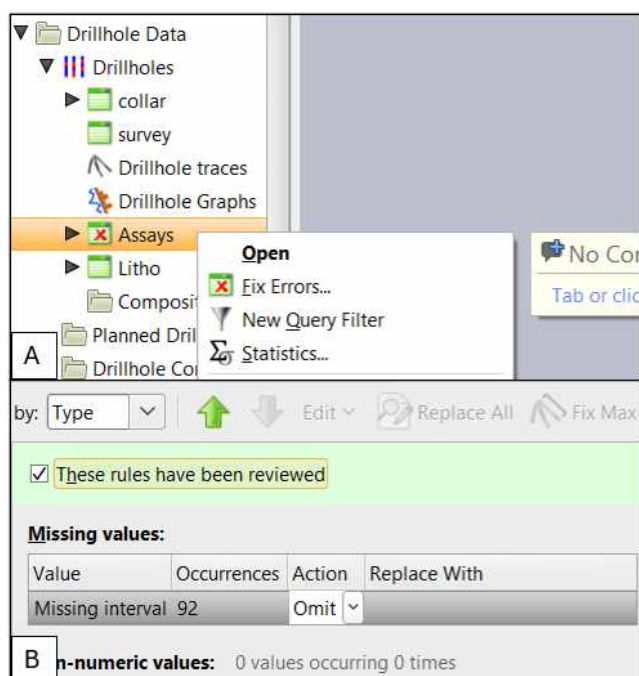
Figura 14 - A) Verificação das colunas do arquivo "Collar.csv", associando coordenadas *East* (X), *North* (Y) e *Elev* (Z); B) Importação da tabela "Assays.csv", configurando a coluna de teores de K₂O como valor numérico ("Numeric").

Column Summary		
Column	Import As	Import Name
Hole ID	Hole ID	holeid
Local Easting	East (X)	x
Local Northing	North (Y)	y
Elevation	Elev (Z)	z
Max Depth	Max Depth	maxdepth
A		
collar		
Column Summary		
Column	Import As	Import Name
Hole ID	Hole ID	holeid
Sample	Not Imported	
From	From	from
To	To	to
K2O	Numeric	K2O
B		
Assays		

Fonte: A Autora.

No entanto, como nem todas as metragens haviam sido amostradas, uma vez que apenas os intervalos considerados relevantes foram submetidos à análise, o sistema apresentou um aviso de erro durante a importação da tabela "Assays". Para solucionar esse problema, foi necessário acessar a aba "Fix Errors" (Figura 15 – A), selecionar a opção "Invalid Value Handling" e definir "Omit" no campo "Missing Values". Com a confirmação da opção "These rules have been reviewed" (Figura 15 – B), a importação foi concluída de forma adequada, permitindo a continuidade do processo sem interrupções.

Figura 15 - A) Acesso à ferramenta "Fix Errors" para correção de inconsistências na tabela "Assays"; B) Configuração de omissão de valores ausentes ("Omit") e confirmação das regras de tratamento, garantindo a integridade dos dados para a modelagem.

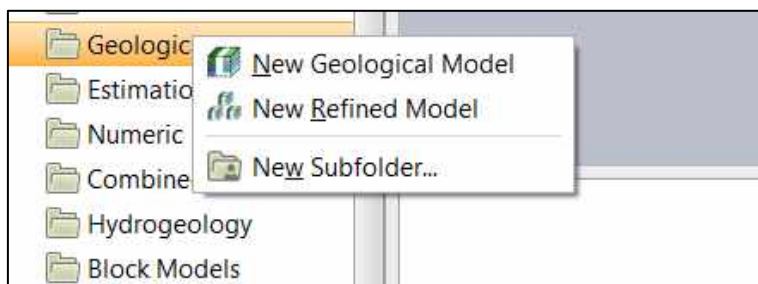


Fonte: A Autora.

Com os pontos topográficos integrados, a superfície do terreno foi gerada. A partir da pasta "Topographies", selecionou-se a opção "New Topography" e, na sequência, "From Points". A superfície resultante foi então adicionada ao cenário de visualização, proporcionando uma representação clara da morfologia da área e servindo como referência para as próximas etapas da modelagem.

Com a topografia estabelecida, foi iniciada a criação do modelo geológico. Para isso, acessou-se a pasta "Geological Models" e selecionou-se a opção "New Geological Model" (Figura 16). Na janela exibida, foi confirmada a coluna "Lith" como "Base Lithology Column", assegurando que os dados litológicos fossem corretamente reconhecidos. No campo "Enclose Object", foi indicada a própria tabela "Lith", restringindo o modelo à área em estudo e evitando extrapolações para fora do domínio de interesse.

Figura 16 - Criação do modelo geológico a partir da opção "New Geological Model".

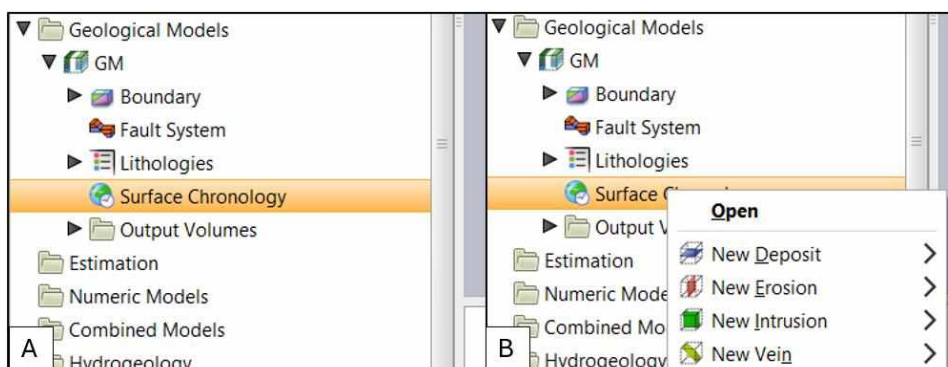


Fonte: A Autora.

A modelagem geológica foi realizada utilizando a ferramenta "*Surface Chronology*" (Figura 17 – A), que possibilita a construção de superfícies com base em uma sequência estratigráfica definida pelo próprio usuário. Para dar início a essa etapa, as litologias foram adicionadas individualmente, conforme a interpretação obtida a partir dos dados de campo.

A unidade solo, por representar uma camada superficial que recorta as formações inferiores, foi configurada como "*New Erosion*". As demais litologias, areia, argila, saprolito, arenito e basalto, foram inseridas como "*New Deposit*", respeitando sua posição relativa na sequência estratigráfica. A mineralização, por sua vez, foi modelada como "*New Vein*", devido à sua geometria mais restrita e ao comportamento geológico observado, mais compatível com veios do que com depósitos contínuos (Figura 17 – B).

Figura 17 - A) Modelagem geológica no Leapfrog utilizando a ferramenta "*Surface Chronology*"; B) Definição das litologias: solo como "*New Erosion*"; areia, argila, saprolito, arenito e basalto como "*New Deposit*"; e mineralização como "*New Vein*", devido à sua geometria mais concentrada.



Fonte: A Autora.

Durante essa etapa, cada litologia foi configurada com o tipo de contato mais apropriado em relação a sua posição estratigráfica (Figura 18). As unidades solo, areia, argila e saprolito

foram definidas com a opção "*Use Contacts Below*", por recobrirem outras camadas. Já o arenito e o basalto, por se tratarem de formações posicionadas nas porções inferiores da sequência, foram configurados com a opção "*Use Contacts Above*".

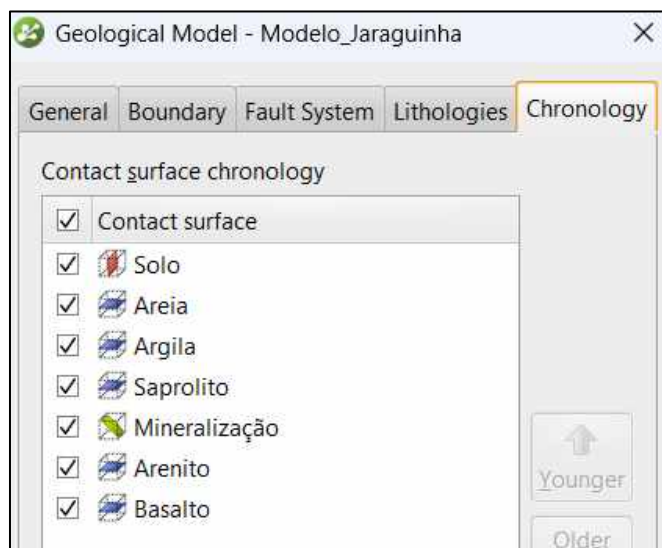
Figura 18 - Configuração dos contatos litológicos: Use Contacts Below para solo, areia, argila e saprolito; Use Contacts Above para arenito e basalto.

The screenshot shows a window titled "New Contact Points" with a close button (X) in the top right. It has two tabs: "Lithology" (selected) and "Compositing". Under the "Lithology" tab, there is a section "Contact in Column 'Lith' on Table 'Litho'". Below this, there is a "Query filter:" dropdown menu set to "None" and a checked checkbox "Inherit from GM". Below that is a section "Select primary lithology" with a dropdown menu set to "Solo". Underneath, there are two radio buttons: "Use contacts above" (unselected) and "Use contacts below" (selected). At the bottom, there are two lists: "Contacting/Avoided lithologie" and "Ignored lithologies:". The "Contacting/Avoided lithologie" list contains: Areia (1), Argila (2), Basalto (1), Mineralização (6), and Saprolito (2). The "Ignored lithologies:" list contains: Arenito (0).

Fonte: A Autora.

A finalização do modelo tridimensional foi realizada por meio da ferramenta "*Surface Chronology*". Nessa etapa, as litologias foram organizadas de acordo com a ordem cronológica interpretada a partir dos dados de sondagem, considerando o solo como a unidade mais recente, seguido por areia, argila, saprolito, mineralização, arenito e, por último, basalto, representando a unidade mais antiga. Essa sequência foi inserida na opção "*Contact Surface Chronology*", sendo posteriormente aplicada a função "*Contact Surface*" (Figura 19).

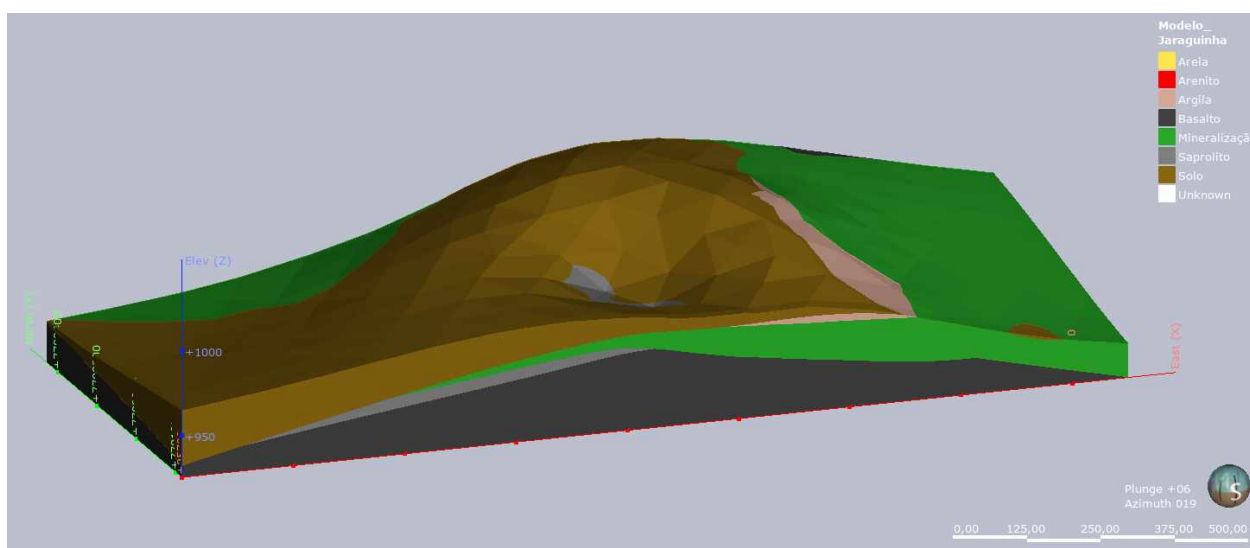
Figura 19 - Organização das litologias em ordem cronológica, da mais recente (solo) à mais antiga (basalto), e aplicação da função Contact Surface.



Fonte: A Autora.

Com todos os parâmetros configurados e revisados, o modelo geológico tridimensional foi então gerado e integrado ao cenário do projeto (Figura 20). A partir disso, tornou-se possível visualizar de forma clara e detalhada a distribuição das unidades litológicas na área de estudo, facilitando a interpretação espacial e a compreensão geral da geometria do depósito.

Figura 20 - Modelo geológico 3D final gerado.



Fonte: A Autora.

Com o modelo 3D já construído, foram acessados os dados de avaliação estatística disponíveis na seção "*Drillholes*", por meio da opção "*New Evaluation*". Essa funcionalidade permitiu visualizar as estatísticas associadas coerência entre as litologias do modelo e as descritas nos furos de sondagem. Por meio da aba "*Statistics*", foram obtidos os dados de correlação entre os comprimentos modelados e os dados reais de campo, o que permitiu avaliar a qualidade do modelo geológico gerado.

Na etapa seguinte, foi criada uma tabela combinada por meio da opção "*New Merged Table*". Nessa janela, foram selecionadas as tabelas "*Assays*", "*Lith*" e "*Evaluation*", permitindo integrar os dados litológicos, os teores de K₂O e os resultados estatísticos. tornou-se possível acessar ferramentas analíticas dentro da aba "*Statistics*", como a "*Table of Statistics*", o "*Scatter Plot*" e o "*Box Plot*". Esses gráficos e tabelas foram utilizados para aprofundar a análise dos dados e são apresentados e discutidos no capítulo de Resultados.

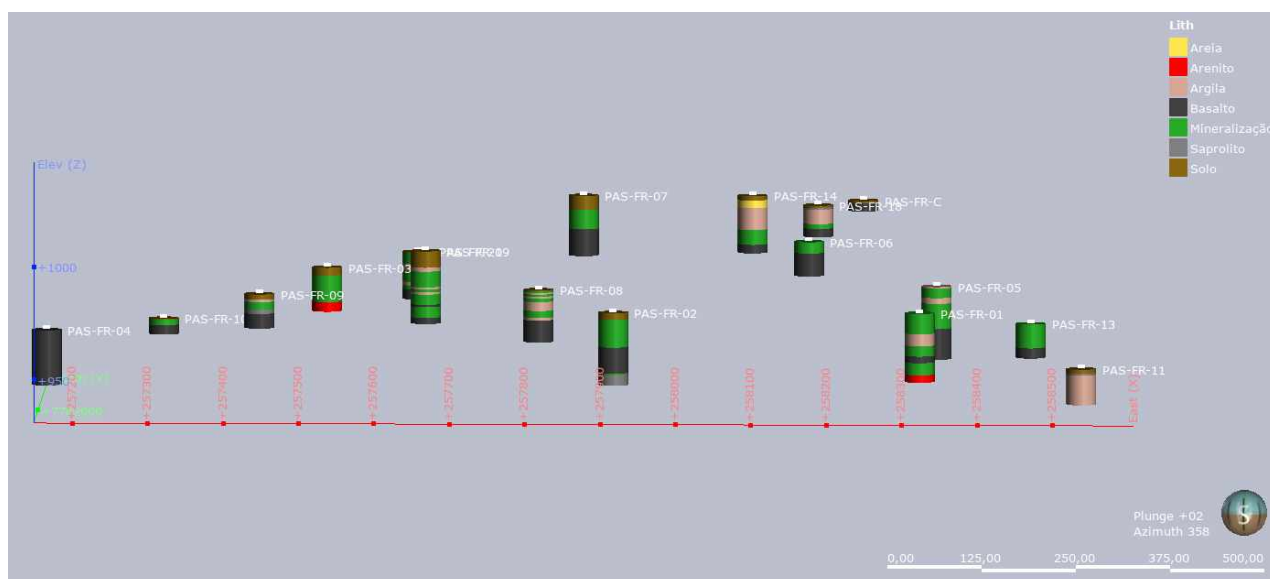
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise Modelo 3D

Os resultados obtidos a partir do modelamento geológico tridimensional da área em estudo, serão apresentados e discutidos de maneira aprofundada no presente capítulo. Neste capítulo, será detalhada a geometria das zonas mineralizadas que foram identificadas dentro do modelo, proporcionando uma compreensão mais clara das características geológicas da região.

Notou-se que os furos de maior espessura estão posicionados na região central do modelo, o que pode ser explicado pela morfologia de relevo acentuado, onde as altitudes variam de 1025 a 940 metros, resultando em um desnível de 85 metros ao longo de uma distância de 500 metros (Figura 21). Essa relação topográfica é crucial para entender a distribuição da mineralização na área.

Figura 21 - Distribuição dos furos evidenciando variações altimétricas.

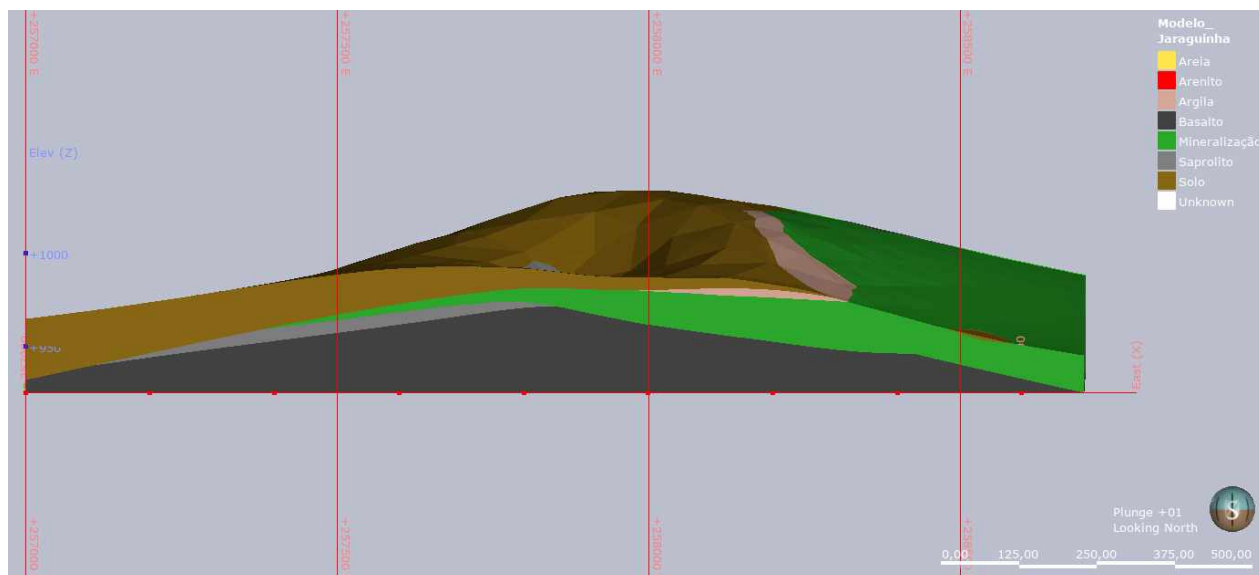


Fonte: A Autora.

A análise das imagens geradas a partir do modelo tridimensional possibilitou avaliar a distribuição espacial dos corpos mineralizados com base na modelagem das litologias descritas nos furos de sondagem. Essa visualização permitiu compreender a geometria, a disposição e a extensão dos volumes geológicos de interesse, ainda sem a incorporação dos teores de K_2O . Esta etapa teve como foco a identificação de padrões espaciais relevantes, que contribuíram para a definição das zonas com maior potencial mineral.

A partir do modelo gerado (Figura 22), foi possível observar de forma integrada a distribuição dos corpos modelados na área de estudo. Essa perspectiva panorâmica evidencia massas geológicas com geometrias variadas, distribuídas entre unidades consideradas estéreis, permitindo identificar com clareza as regiões com maior concentração das litologias de interesse.

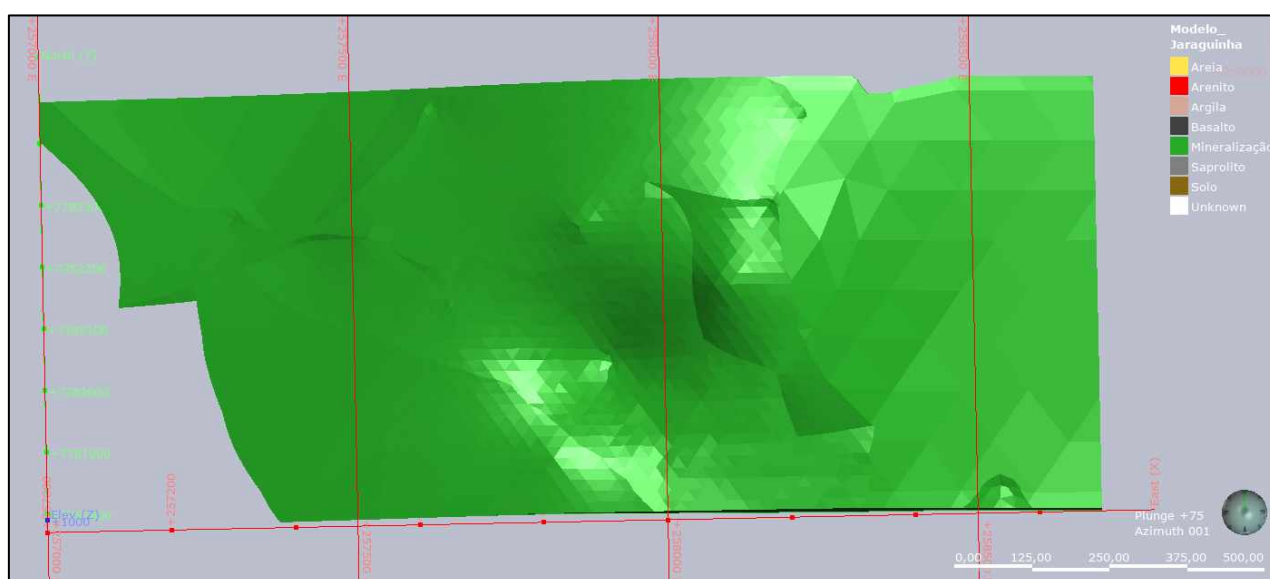
Figura 22 - Modelo 3D gerado, mostrando a distribuição dos corpos geológicos entre unidades estéreis e litologias de interesse.



Fonte: A Autora.

Na visualização superior do modelo, destaca-se a presença de corpos mineralizados com espessura considerável, distribuídos de maneira contínua ao longo da área (Figura 23). A mineralização ocorre em praticamente toda a extensão da imagem, com exceção de uma pequena porção sudoeste, onde não foi identificado porção mineralizada.

Figura 23 - Visualização superior evidenciando corpos mineralizados espessos distribuídos continuamente, com exceção da porção sudoeste.

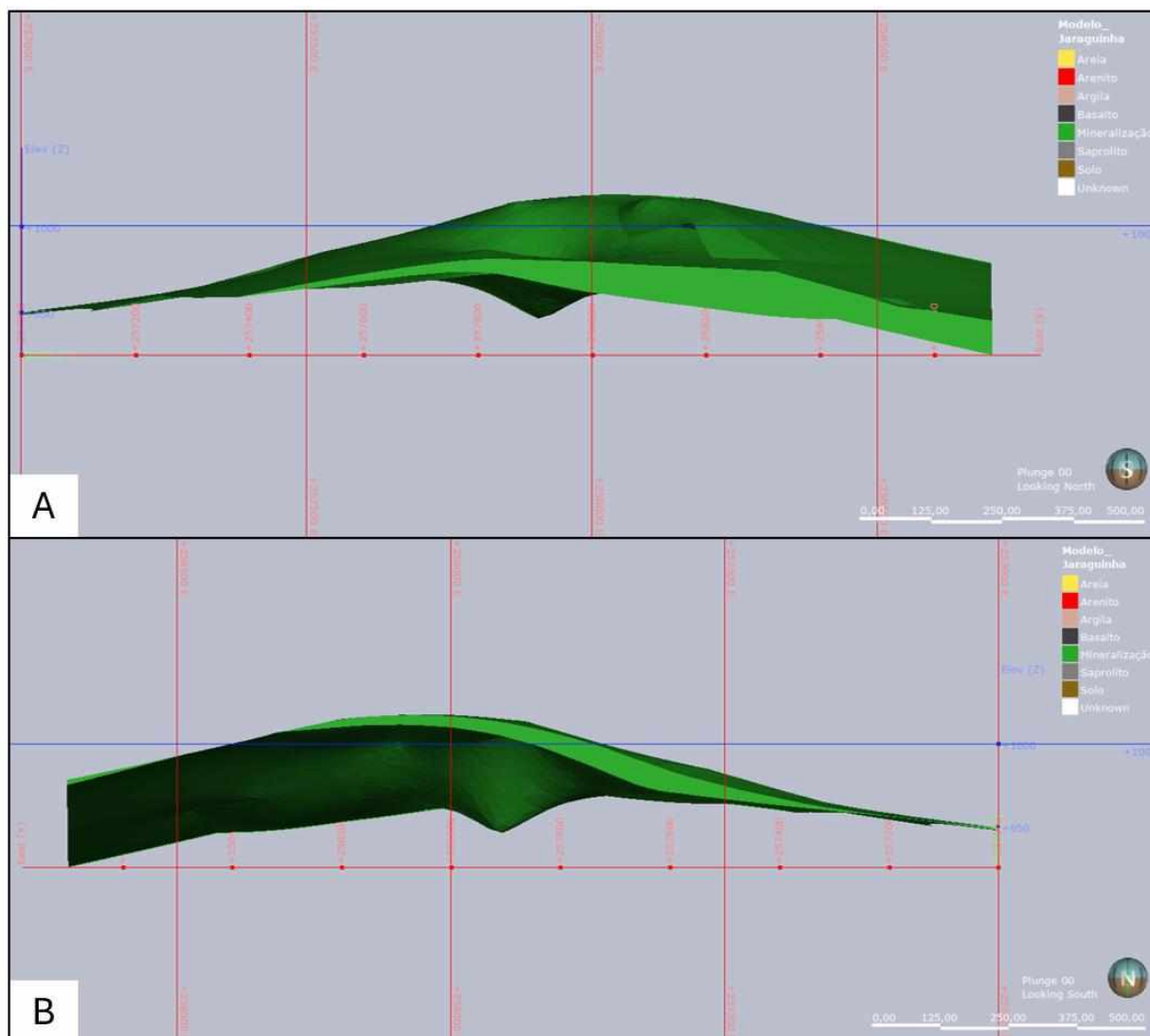


Fonte: A Autora.

O modelo geológico 3D elaborado evidenciou a presença de uma área com maior espessura de mineralização localizada no alto topográfico da região. Esse comportamento pode estar relacionado à configuração geomorfológica local, que favorece a concentração de minerais em porções mais elevadas.

Na porção Sul (Figura 24 – A), os corpos mineralizados apresentam maior espessura em comparação com a porção mais ao norte da imagem (Figura 24 – B), com destaque para a região sudeste, onde a espessura é mais significativa. Em relação à profundidade, observa-se que os corpos localizados na região central ao norte da imagem ocorrem em cotas mais elevadas, acima de 1000 metros. Na porção leste, os corpos estão posicionados em cotas intermediárias, em torno de 970 metros, enquanto na porção oeste, a mineralização ocorre em cotas um pouco mais baixas, aproximadamente 950 metros. A distribuição geral é relativamente contínua, com variação tanto lateral quanto vertical ao longo da imagem.

Figura 24 - A) Distribuição dos corpos mineralizados na porção Sul do modelo, com maior espessura; B) Porção Norte com corpos mais estreitos.

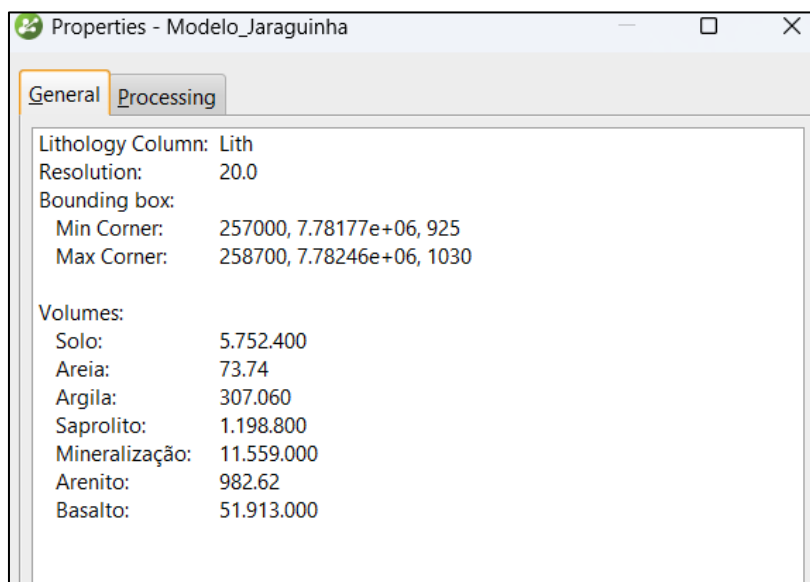


Fonte: A Autora.

Além da análise visual do modelo, a medição dos volumes das litologias ajudou a entender melhor a proporção de cada unidade presente na área de estudo (Figura 25). O basalto foi a unidade com maior volume modelado, somando cerca de 51.913.000 m³, o que mostra que ele ocupa grande parte da área. A mineralização aparece em seguida, com um volume estimado em 11.559.000 m³, distribuída de forma significativa ao longo do modelo, reforçando sua importância geológica e econômica. O solo também apresentou um volume expressivo (5.752.400 m³), seguido pelo saprolito (1.198.800 m³) e pela argila (307.060 m³). Já o arenito (982,62 m³) e a areia (73,74 m³) foram os menores volumes representados. Esses dados ajudam

a reforçar as interpretações feitas a partir da visualização do modelo, dando uma noção mais precisa de quais unidades são mais ou menos presentes na área.

Figura 25 - Volumes das litologias presente na área de estudo.



Fonte: A Autora.

De modo geral, o modelo geológico 3D permitiu uma visualização clara e detalhada das unidades que compõem a área de estudo, além de oferecer uma melhor compreensão sobre como a mineralização está distribuída no espaço. A combinação entre os aspectos do relevo, os volumes modelados e a forma dos corpos mineralizados ajudou a construir uma base sólida para as próximas análises. Entender essa distribuição é essencial não só para avaliar o potencial econômico da área, mas também para guiar futuras etapas de exploração. A partir de agora, serão apresentados os resultados relacionados aos teores de K_2O , o que permitirá integrar as informações espaciais do modelo com os dados analíticos obtidos nos furos de sondagem.

5.2 Análise teor de K_2O

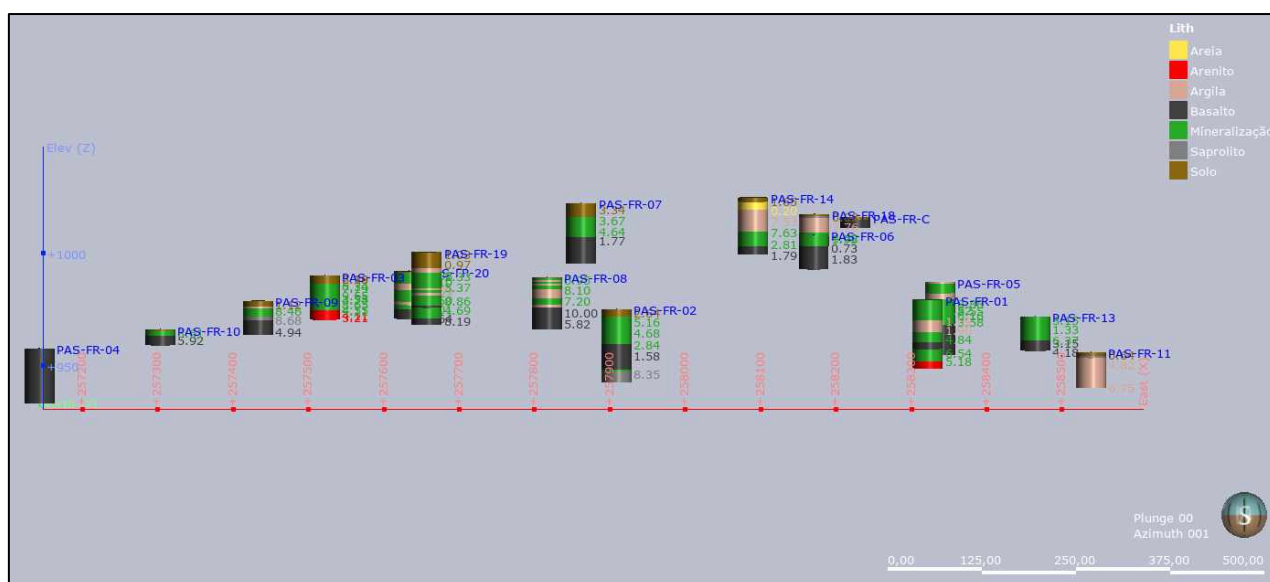
A avaliação dos teores de K_2O é uma das etapas mais importantes deste estudo, já que está diretamente ligada ao potencial de aproveitamento econômico da área analisada. Após a construção do modelo geológico tridimensional e a definição das litologias, os dados de teor foram integrados, com foco especial na unidade de mineralização, que representa o principal

alvo para a extração de potássio. A partir dessa integração, foi possível analisar o comportamento dos teores ao longo dos furos de sondagem, identificar os intervalos com maior potencial e entender como esses teores estão distribuídos dentro da área estudada.

Com base nos intervalos mineralizados identificados nos furos de sondagem (Figura 26), foi possível calcular a metragem total de cada furo e comparar os respectivos teores máximos de K_2O . Considerando como viável a extração em teores iguais ou superiores a 4%, os resultados demonstram que o Furo 19 apresentou a maior metragem mineralizada, totalizando 17,55 metros, com teor máximo de 8,8%. No entanto, o Furo 01 se destacou por apresentar 16,3 metros de mineralização com todos os intervalos dentro da faixa economicamente viável, variando entre 4,5% e 6,5%, o que o torna o mais promissor em termos de regularidade e qualidade do minério.

Outros furos, como o Furo 05, com 15,35 metros e teor máximo de 8,8%, o Furo 03, com 11,8 metros e teor de até 9,65%, e o Furo 20, com 11,81 metros e teor máximo de 7%, também apresentaram resultados relevantes e indicam bom potencial.

Figura 26 – Furos de sondagem e os teores de K_2O .



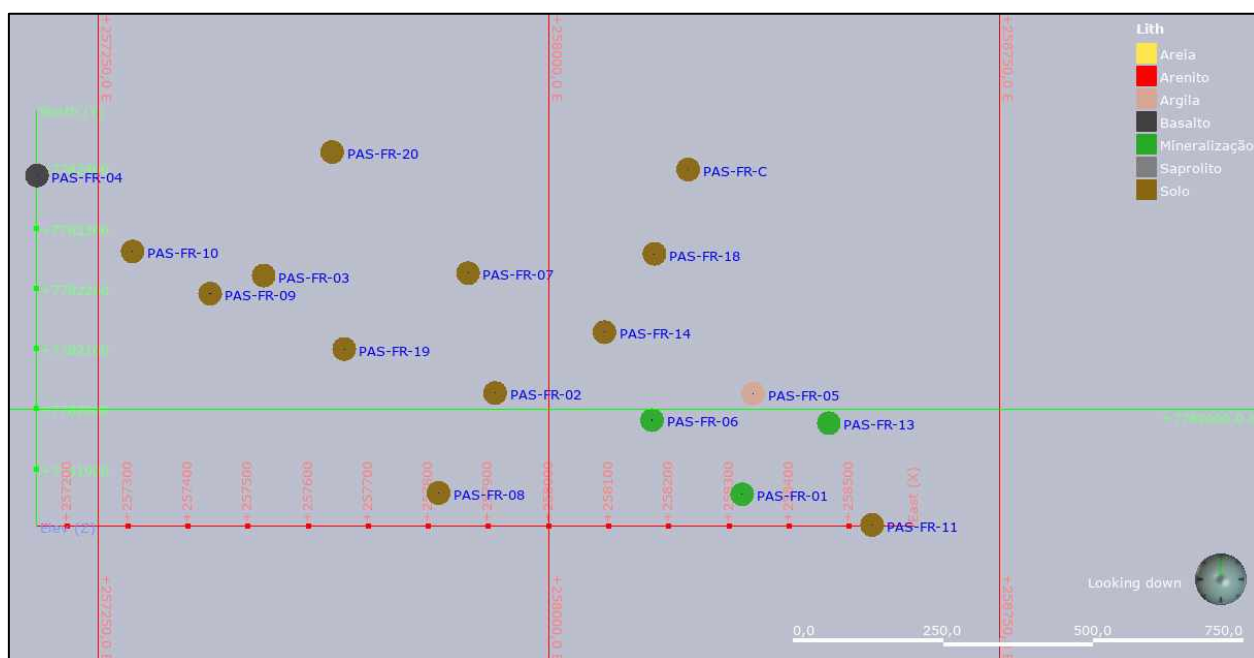
Fonte: A Autora.

Com base nos dados de sondagem e na disposição espacial apresentada na Figura 27, observou-se que os furos considerados mais promissores, Furo 01, Furo 19, Furo 05, Furo 03 e Furo 20, estão distribuídos em diferentes porções da área de estudo. O Furo 01, que apresenta

uma mineralização regular e inteiramente acima do limite mínimo de viabilidade, está localizado na porção sudeste da área. Próximo a ele, na mesma porção, encontram-se também os Furos 05 e 13, que reforçam o potencial concentrado de extremidade sudeste.

Por outro lado, o Furo 19, que registrou a maior metragem mineralizada (17,55 metros), localiza-se na porção centro-oeste da imagem, evidenciando que zonas com elevado volume mineralizado não se limitam a um único setor do modelo. Já o Furo 03, posicionado na porção central-norte, e o Furo 20, mais ao noroeste, demonstram que há outros pontos relevantes espalhados por diferentes áreas do modelo.

Figura 27 - Distribuição espacial dos furos na área de estudo.



Fonte: A Autora.

Os resultados obtidos demonstram teores expressivos, o valor médio de K_2O é de 5,106%, superando o valor de 4%, considerado o mínimo para viabilidade econômica da exploração (Figura 28). Os teores variam de 1,33% a 9,65%, evidenciando tanto áreas com baixa concentração quanto zonas de significativo enriquecimento. A mediana de 4,74% reforça que mais da metade das amostras analisadas nesta unidade estão acima do valor mínimo de interesse, o que confirma o potencial promissor da região para fins de aproveitamento mineral.

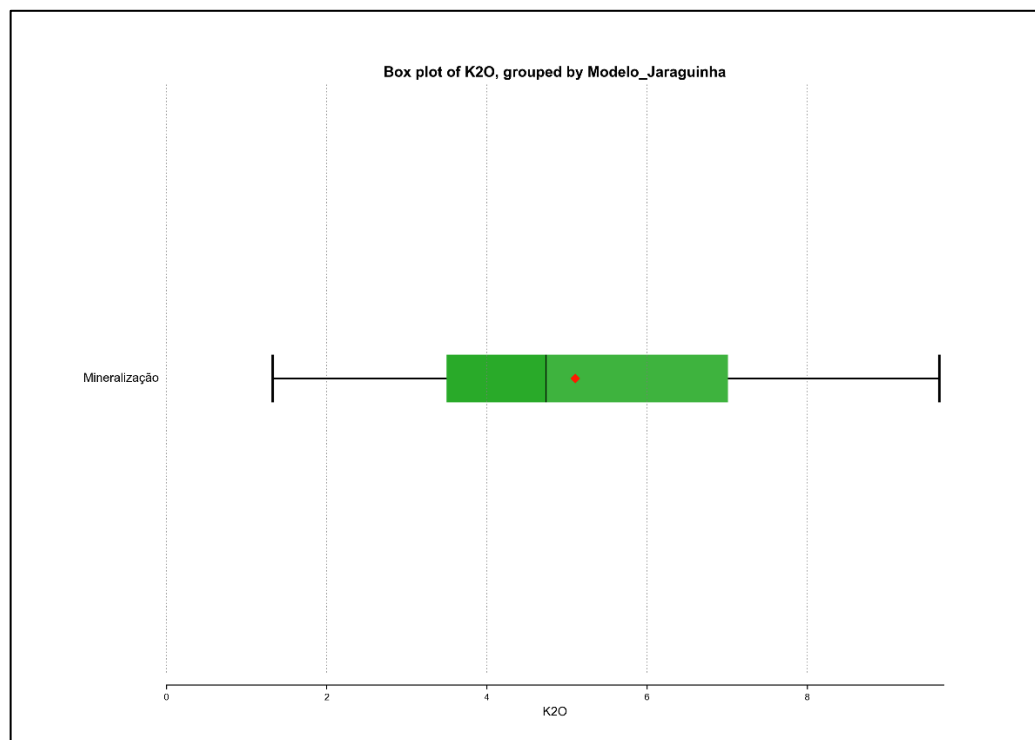
Figura 28 - Tabela estatística com dados de comprimento e teores de K₂O nas diferentes litologias modeladas.

Name	Count	Length	Mean	Std. dev.	Coeff. var.	Variance	Minimum	L. quartile	Median	U. quartile	Maximum
▼ Areia	3	0.6									
K ₂ O	1	0.2	0.200	#ERR	#ERR	#ERR	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
▼ Arenito	3	2.3									
K ₂ O	1	0.2	4.110	#ERR	#ERR	#ERR	4.110	4.110	4.110	4.110	4.110
▼ Argila	5	7.0									
K ₂ O	0	0.0									
▼ Basalto	42	108.8									
K ₂ O	14	2.7	4.544	2.842	0.625	8.074	0.730	1.830	3.640	5.920	10.000
▼ Mineralização	136	195.3									
K ₂ O	49	9.4	5.106	2.249	0.440	5.058	1.330	3.500	4.740	7.010	9.650
▼ Sapolito	4	4.6									
K ₂ O	1	0.2	8.680	#ERR	#ERR	#ERR	8.680	8.680	8.680	8.680	8.680
▼ Solo	30	25.3									
K ₂ O	8	1.6	1.871	1.655	0.884	2.739	0.080	0.970	1.120	2.180	5.390
▼ Unknown	0	0.0									
K ₂ O	0	0.0									
▼ *Inactive	19	10.2									
K ₂ O	4	0.8	1.743	1.110	0.637	1.232	0.950	1.030	1.650	3.340	3.340

Fonte: A Autora.

O box plot da litologia de mineralização evidência essa concentração de valores elevados, com a maior parte das amostras agrupadas acima de 4% (Figura 29). Observa-se ainda que há poucos pontos fora da faixa economicamente relevante, o que indica certa uniformidade na distribuição dos teores em relação ao potencial de aproveitamento. Essa distribuição é importante, pois demonstra que os altos teores não estão concentrados em apenas uma ou duas amostras isoladas, mas ocorrem de forma mais consistente ao longo do conjunto analisado.

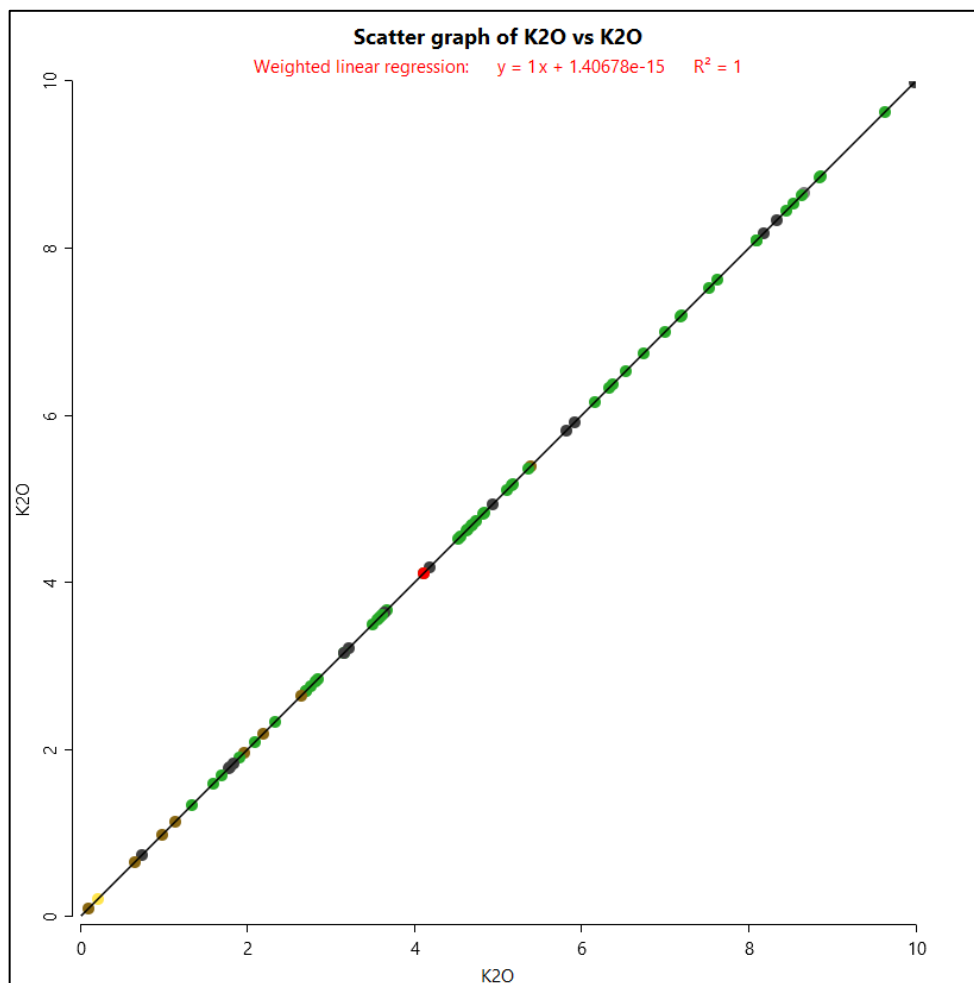
Figura 29 - Box plot da mineralização evidenciando a concentração de amostras com teor de K_2O acima de 4%.



Fonte: A Autora.

Já o gráfico de dispersão (K_2O vs. K_2O) mostra uma distribuição ampla dos dados, porém com uma clara tendência de concentração dos pontos entre os intervalos de 4% a 8% (Figura 30). Isso reforça a interpretação de que a maioria das amostras concentra-se em uma faixa economicamente viável e até superior ao mínimo exigido. A visualização dos dados nesse gráfico também permite perceber que os pontos estão bem distribuídos, sem formação de aglomerados extremos ou espaçamentos irregulares, o que sugere uma variação contínua e natural dos teores dentro da unidade.

Figura 30 - Gráfico de dispersão K₂O vs. K₂O mostrando tendência de concentração entre 4% e 8%.



Fonte: A Autora.

Outro ponto relevante é que os valores mais altos acima de 7% ocorrem em número considerável, o que pode representar áreas com potencial ainda mais significativo para fins de exploração. A presença de teores elevados em uma parcela das amostras reforça a importância de investigações mais detalhadas nessas zonas, a fim de delimitar melhor os volumes com maior potencial de aproveitamento.

De maneira geral, a análise dos teores de K₂O confirmou o potencial promissor da unidade de mineralização. A presença frequente de valores acima de 4% e a distribuição relativamente constante desses teores ao longo dos furos indicam uma mineralização consistente, o que é positivo do ponto de vista econômico. Os gráficos e indicadores estatísticos ajudam a visualizar melhor esses resultados e reforçam a importância da área para futuras etapas

de pesquisa e detalhamento. Esses dados oferecem uma base segura para decisões sobre a continuidade dos estudos e possíveis investimentos em exploração mineral.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo principal a construção e análise de um modelo geológico tridimensional voltado à prospecção de potássio na região de Sacramento–MG, a partir da integração entre dados litológicos, topográficos e teores de K_2O . A partir do modelo geológico desenvolvido, é possível concluir que a área de pesquisa apresenta potencial para mineralizações de potássio. Foi viabilizada a criação de um banco de dados utilizando o Sistema de Informações Geográficas (SIG), o qual permitiu integrar os dados obtidos a partir dos furos de sondagem, possibilitando, assim, a geração de um modelo geológico que proporciona uma visão mais clara das possíveis mineralizações.

Com o auxílio do software Leapfrog, foi possível representar com clareza a distribuição das litologias presentes, destacando-se a unidade de mineralização, que apresentou volume expressivo e boa continuidade lateral. O uso de ferramentas digitais modernas e a união de diferentes tipos de informações geológicas foram essenciais para alcançar os objetivos do estudo. Além disso, essa experiência ajudou no desenvolvimento de habilidades práticas importantes para quem deseja atuar na área de geologia voltada à mineração.

Por outro lado, é importante considerar os impactos ambientais que a atividade mineral pode causar na região. Um dos principais problemas é a retirada da vegetação, sem essa cobertura natural, o solo fica mais exposto, aumentando os riscos de erosão e afetando o fluxo de água na região. Além disso, a retirada da vegetação pode comprometer o equilíbrio ecológico, impactando diretamente os habitats da fauna e flora locais.

Outro ponto que merece atenção é a influência da atividade no regime hídrico. As plantas têm um papel essencial na absorção e infiltração da água no solo, ajudando a manter o equilíbrio dos cursos d'água. Com a retirada da vegetação, pode haver um aumento no escoamento superficial, o que favorece o assoreamento dos rios e compromete a qualidade dos recursos hídricos próximos.

Diante desses desafios, algumas medidas podem ser adotadas para minimizar os impactos ambientais. A revegetação das áreas degradadas, a delimitação de zonas de preservação e o monitoramento constante da região são ações essenciais para reduzir os danos.

Além disso, a implementação de boas práticas ambientais pode ajudar a equilibrar a exploração dos recursos minerais com a conservação do meio ambiente, garantindo um futuro mais sustentável para a área estudada.

Conclui-se, portanto, que a região estudada apresenta um bom potencial geológico para depósitos de potássio, sendo promissora para projetos de exploração mineral e para o aprofundamento de pesquisas científicas. Além da relevância técnica, este trabalho tem grande importância para o meio acadêmico, pois contribui com um exemplo prático de aplicação do software Leapfrog em modelagem geológica, servindo como base e referência para futuros trabalhos. Ao documentar de forma clara as etapas do processo e integrar diferentes tipos de dados, o estudo ajuda a fortalecer a formação de novos profissionais e a estimular o uso de tecnologias modernas no ensino e na pesquisa em geociências.

7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Fernando Flávio Marques de; HASUI, Yociteru; NEVES, Benjamim Bley de Brito; FUCK, Reinardt Adolfo. Províncias estruturais brasileiras. **VII Simpósio de Geologia do Nordeste**, [s. l.], p. 363-391, 1 jan. 1977.

ALMEIDA, Lorena Tuane Gomes de; LIMA, Sidney Gonçalo de. A aplicação da técnica multivariada (pca) na correlação do paleoambiente deposicional da formação irati (bacia do paraná) por meio de dados de biomarcadores. *In*: COSTA, Luis Ricardo Fernandes da. **Geociências: A história da terra**. [S. l.]: Atena, 2021. cap. 1, p. 1-14.

BATISTA, Jociane Dias. **Análise comparativa entre métodos de modelamento geológico**. 2015. 21 p. Trabalho de conclusão de curso (Tecnólogo em Mineração.) - Curso Superior de Tecnologia em Mineração, Universidade Federal do Pampa, [S. l.], 2015.

BORGHETTI, Cristiano; PHILIPP, Ruy Paulo. Geologia e geofísica do greenstone belt Vila Nova, porção NE do Cráton Amazônico, Amapá, Brasil. **Revista do Instituto de Geociências - USP**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 109 - 127, 10 out. 2016. DOI 10.11606/issn.2316-9095.v17-372. Disponível em: www.igc.usp.br/geologiausp.

FERNANDES, Marcelo Adorna; CARVALHO, Ismar de Souza. A Formação Botucatu (Bacia do Paraná) no Estado de São Paulo: Inferências Paleoambientais e Paleoicnológicas. **4º Simpósio sobre Cronoestratigrafia da Bacia do Paraná**, [s. l.], 2007.

FRANÇA, Rafaela Henrique Mendes; FERREIRA, Valdez Pinto; BEZERRA, João Pedro Santana; BIONDO, Vanessa Ribeiro. CONTRIBUIÇÃO DA GAMAESPECTROMETRIA AO ESTUDO DA GEOLOGIA DO BATÓLITO ÁGUAS BELAS –CANINDÉ: REGIÃO A NORTE DE SANTANA DO IPANEMA, ALAGOAS. **Estudos Geológicos**, [s. l.], v. 26, ed. 1, p. 38 - 50, 2016. DOI 10.18190/1980-8208/estudosgeologicos.v26n1p38-50. Disponível em: www.ufpe.br/estudosgeologicos.

KULAIF, Yara et al. Potencial Mineral do Brasil: Potássio no Brasil. *In*: RICCOMINI, Claudio et al. **Recursos Minerais no Brasil problemas e desafios**. [S. l.: s. n.], 2017. cap. I, p. 84-95.

MACHADO, Daniel Monteiro. **Proposta de modelagem geológica 3d da cidade do Rio de Janeiro ao longo da Trilha Transcarioca**. 2019. 72 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2019.

MILANI, Edison José; MELO, José Henrique Gonçalves de; SOUZA, Paulo Alves de; FERNANDES, Luiz Alberto; FRANÇA, Almério Barros. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências - Petrobras**, [s. l.], p. 265-287, 1 jan. 2007.

NASCIMENTO, Marisa; MONTE, Marisa Bezerra de Mello; LOUREIRO, Francisco Eduardo Lápido. Agrominerais: Potássio. *In*: LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Antonio Freitas. **Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações**. 2. ed. [S. l.]: CETEM – Centro de Tecnologia Mineral, 2008. cap. 8, p. 175-203.

PIZA, Patricia d'Almeida de Toledo; BERTOLINO, Luiz Carlos; SILVA, Adriana de Aquino Soeiro da; SAMPAIO, João Alves; LUZ, Adão Benvindo da. VERDETE DA REGIÃO DE CEDRO DE ABAETÉ (MG) COMO FONTE ALTERNATIVA PARA POTÁSSIO. *Geociências*, [s. l.], v. 30, ed. 3, p. 345-356, 2011.

ROBERTO, Thaiane Kamila Alves. **Modelagem de dados geológicos e geofísicos com leapfrog, campo terrestre da Bacia Potiguar**. 2022. 64 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Geologia) - Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [S. l.], 2022.

SEER, Hildor José; MORAES, Lucia Castanheira de. Geologia Regional do Triângulo Mineiro. **Projeto Triângulo Mineiro**, [S. l.], p. 2-123, 2 jun. 2017.

SILVA, Alessandro Henrique Medeiros. **Modelagem Geológica e Estocástica da Porção NE da Mina de Morro do Ouro, Paracatu (MG)**. 2000. 120 p. Dissertação (Mestre em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, [S. l.], 2000.

SILVA, Mayara Dayane Marinho da. **Modelagem Geológica 3D dos Depósitos Auríferos do Complexo Turmalina no Greenstone Belt Pitangui, usando o software leapfrog**. 2023. 55 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2023.

SIMÕES, Luiz Sergio Amarante. **Evolução tectonometamorfica da nappe de Passos, sudoeste de Minas Gerais**. 1995. 183 p. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, [S. l.], 1995.

SIMÕES, Luiz Sérgio Amarante; SILVA, Alex Joaquim Choupina Andrade; VALERIANO, Cláudio de Morisson; SILVA, Carlos Humberto da; JUNIOR, Washington Barbosa Leite; PEREZ, Andres Isquierdo; HARTUNG, Rafael Francisco. Folha Desemboque: SF.23-V-A-I. **Projeto Triângulo Mineiro**, [S. l.], p. 1-106, 2 jun. 2017.

SIMÕES, Luiz Sérgio Amarante; SILVA, Alex Joaquim Choupina Andrade; VALERIANO, Cláudio de Morisson; SILVA, Carlos Humberto da; JUNIOR, Washington Barbosa Leite; PEREZ, Andres Isquierdo; HARTUNG, Rafael Francisco. **Projeto Triângulo Mineiro: Folha Desemboque - SF.23-V-A-I**. [S. l.]: CODEMIG, 2017. Mapa Geológico.

TAMRAT, Endale; ERNESTO, Marcia. Magnetic fabric and rock-magnetic character of the Mesozoic flood basalts of the Paraná Basin, Brazil. *Journal of Geodynamics*, [S. l.], v. 28, p. 419-437, 18 fev. 1999.

UHLEIN, Alexandre; FONSECA, Marco Antônio; SEER, Hildor José; DARDENNE, Marcel Auguste. Tectônica da Faixa de Dobramentos Brasília – Setores Setentrional e Meridional. **O desvendar de um continente: a moderna geologia da América do Sul e o legado da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**, [S. l.], p. 575-593, 10 out. 2004.

VALARELLI, José Vicente; NOVAIS, Roberto Henrique; MELO, Marco Tadeu Vaz de; LEAL, Emmanuel Dutra. Ardósias verdetes de Cedro do Abaeté na produção de termofosfato potássico fundido e sua eficiência agrônômica. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 65, 343-375.

VERONEZ, Bruno de Oliveira; NÓBREGA, André Leonardo da. Relatório técnico levantamento geofísico para pesquisa mineral no município de Sacramento/MG. **Greenfield - Consultoria ambiental e geológica**, [s. l.], 2023.