



Faculdade de Ciências
Departamento de Geologia

Relatório de Estágio

Análise da Confiabilidade dos dados Gerados em Modelos Geológicos
Da Mina Carvão Moatize, Secção 2B

Nome do candidato: Kelven António dos Santos Sendela

Curso: Cartografia e pesquisa geológica

KELVEN ANTÓNIO DOS SANTOS SENDELA

**Análise da Confiabilidade dos dados Gerados em Modelos Geológicos
Da Mina Carvão Moatize, Secção 2B**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
para obtenção de grau de Geólogo no Curso de
Cartografia e pesquisa Geológica da
Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade
de Ciências, Departamento de Geologia

Supervisor:

Mestre Eduardo Siquela

Maputo, 2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, cujo carinho e amor incondicional foram fundamentais em cada etapa da minha vida. Obrigado por acreditarem em mim mesmo nos momentos mais difíceis, por serem meu suporte e por me mostrarem, através do exemplo, o valor do esforço e da perseverança. Este é um pequeno reflexo do imenso impacto que vocês têm em minha vida. Este trabalho é, acima de tudo, para vocês.

E por fim dedico este trabalho a mim mesmo, por ter me mantido firme e por alcançar mais uma meta.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro agradeço a Deus Pai todo-poderoso pelo dom da vida e pelas bênçãos que me concedeu ao longo dos anos. Foi através da sua vontade e amor que muitas das minhas conquistas foram possíveis e foi acreditando nele que pude superar muitos desafios e barreiras. Por tudo isso mais ainda agradeço a Deus.

Quero agradecer aos meus pais, Santos António Sendela e Madalena António Rungo, cuja força, generosidade, paciência amor e carinho sempre iluminaram meu caminho, dedico meu mais sincero agradecimento. Vocês foram minha inspiração, meu porto seguro e meu incentivo nos momentos mais desafiadores. Sua confiança em mim foi essencial para que eu alcançasse várias metas inclusive está. Sou eternamente grato por me terem trazido a este mundo e pela orientação e acompanhamento que me moldaram na pessoa que sou hoje.

A minha tia e madrinha Cheila Rungo agradeço por ter me acolhido no seu lar. Também agradeço aos meus tios Teles Sendela e Farnezélia Sendela por terem-me acolhido na sua casa no período do meu estágio académico. Agradeço pela paciência, bons conselhos, amor, carinho e por ter sido um pilar integral para me moldar no homem que sou hoje.

Aos meus familiares agradeço a todos eles pelo suporte e força que me deram durante todos esses anos, me inspirando e motivando a dar o melhor de mim e a me tornar alguém que eles possam olhar com orgulho.

Aos meus amigos: Assane Juma, Dércio Sendela, Leu Balate, Ismael Nembire, Jepson Faife, Exon Miambo, Emenegildo Chirenga, Alberto António, Lizethe Magaia, Larissa Emília e muitos mais; agradeço por estarem ao meu lado em cada etapa, compartilhando risadas, desafios e histórias que tornaram essa jornada inesquecível. Sua amizade é um presente inestimável e sempre levarei comigo os momentos compartilhados.

Aos meus supervisores, Mestre Eduardo Siquela e Licenciado Manuel Fato, ofereço meu respeito e gratidão pelas valiosas contribuições ao desenvolvimento deste trabalho. Suas orientações, paciência e visão técnica foram fundamentais para que eu pudesse aprofundar meu entendimento e superar desafios. Também ofereço meus agradecimentos a todos os professores do Departamento de Geologia da Universidade Eduardo Mondlane, cujo ensinamento desde o primeiro, deixaram marcas duradouras em minha trajetória me inspirando a ser melhor na área que escolhi como carreira profissional.

Expresso também minha gratidão a empresa Vulcan Mozambique, que me concedeu a oportunidade de ter uma experiência prática única e enriquecedora de campo em mapeamento de mina e controle de frentes de exploração. Agradeço a todos os geólogos, engenheiros e colaboradores da área de exploração de geologia pela paciência e partilha de conhecimento. Agradecer especialmente o Geólogo Daniel Travasso por me receber na sua área e pela oportunidade que me disponibilizou e pela partilha sua partilha de conhecimento e pela paixão da área de geologia.

Aos meus colegas, em especial a toda geo-fam de 2019, minha sincera gratidão pelas trocas constantes de ideias e pelo apoio mútuo que moldaram essa experiência e a tornaram realmente única. Vocês foram companheiros de aprendizado, momentos de sorriso e de seriedade, juntos conseguimos superar obstáculos e celebrar conquistas.

Por fim agradeço a todos aqueles que mesmo não sendo mencionados contribuíram positivamente de uma forma ou de outra a minha vida e também para a realização deste trabalho. A todos vocês, meu mais sincero obrigado. Ao alcançar o término deste relatório, sinto-me profundamente grato a todos que contribuíram para que esta conquista fosse possível. Este trabalho não é apenas fruto de minha dedicação, mas também o reflexo do apoio e da colaboração de pessoas extraordinárias que marcaram essa jornada. Este trabalho não é apenas meu, mas também representa a influência positiva que cada um teve na minha vida e no meu aprendizado.

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, **Kelven dos Santos Sendela**, declaro, por minha honra, que o presente relatório de estágio académico é da minha autoria com o devido acompanhamento dos meus supervisores e que nunca foi submetido a nenhuma outra instituição académica nacional ou estrangeira ou para qualquer outro fim. O mesmo, é fruto da minha investigação sendo que todos os materiais bibliográficos consultados estão devidamente citados e referenciados.

Maputo, Abril de 2025

(Kelven António dos Santos Sendela)

RESUMO

Este relatório foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a aderência dos modelos geológicos aplicados à mineração de carvão na Bacia Carbonífera de Moatize, através de uma abordagem metodológica estruturada em etapas pré-campo, campo e pós-campo. Inicialmente, foi realizada uma extensa consulta bibliográfica para embasar teoricamente a caracterização dos carvões da região. Em seguida, o trabalho de campo, executado na concessão mineira 875C, envolveu mapeamento geológico detalhado – com levantamentos topográficos dos topos e bases das camadas de carvão e identificação das feições estruturais – e o acompanhamento topográfico dos furos de desmonte, empregando tecnologias como DGPS de alta precisão e perfilagem geofísica. Na fase de trabalho de escritório, os dados coletados foram integrados e analisados utilizando softwares especializados (Vulcan, QGIS e Excel), permitindo a interpretação dos perfis estratigráficos e a validação dos modelos geológicos existentes. A comparação entre as medições de campo e as previsões do modelo revelou diferentes níveis de aderência (boa, neutra e má), evidenciando que, embora o modelo reproduza adequadamente certas características, há discrepâncias significativas em áreas afetadas por falhas e complexidades geológicas. Os resultados apontam para a necessidade de aprimoramento dos métodos de coleta e integração de dados, bem como a constante recalibração dos modelos para mitigar incertezas e reduzir riscos operacionais, desperdício de recursos e custos excessivos. Assim, recomenda-se o aumento da densidade amostral, a incorporação de dados de múltiplas fontes – como geofísica de alta resolução e sensoriamento remoto – e o investimento em tecnologias de modelagem 3D, visando elevar a confiabilidade e a precisão das previsões geológicas para uma exploração mineral mais segura e eficiente.

Palavras-Chave: Modelo, Modelamento Geológico, Aderência, *Grid*, Camada, Sondagem, Desmonte, Corte.

ABSTRACT

This report was developed with the objective of evaluating the adherence of geological models applied to coal mining in the Moatize Carboniferous Basin, through a methodological approach structured in pre-field, field and post-field stages. Initially, an extensive bibliographical consultation was carried out to theoretically support the characterization of the region's coals. Next, the field work, carried out in the 875C mining concession, involved detailed geological mapping – with surveying the tops and bases of the coal layers and identification of structural features – and topographic monitoring of the blast holes, using technologies such as high-precision DGPS and geophysical profiling. In the office work phase, the collected data was integrated and analyzed using specialized software (Vulcan, QGIS and Excel), allowing the interpretation of stratigraphic profiles and the validation of existing geological models. The comparison between field measurements and model predictions revealed different levels of adherence (good, neutral and bad), showing that, although the model adequately reproduces certain characteristics, there are significant discrepancies in areas affected by faults and geological complexities. The results point to the need to improve data collection and integration methods, as well as the constant recalibration of models to mitigate uncertainties and reduce operational risks, waste of resources and excessive costs. Therefore, it is recommended to increase sampling density, incorporate data from multiple sources – such as high-resolution geophysics and remote sensing – and invest in 3D modeling technologies, aiming to increase the reliability and accuracy of geological predictions for safer and more efficient mineral exploration.

Keywords: Model, Geological Modeling, Adhesion, Grid, Layer, Survey, Dismantle, Cutting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema representativo de realização do relatório de estágio	6
Figura 2: Mapa da Secção 2B com as áreas de estudo no presente trabalho	8
Figura 3: Registro de um ponto da camada bananeiras “topo”	9
Figura 4: Corte do modelo no Software Vulcan.....	10
Figura 5: Selecção de Furos prioritários (a vermelho) no Software Vulcan	10
Figura 6: Furo de desmante com presença de carvão na pilha “camada Grande Falésia”	11
Figura 7: Processo de perfilagem geofísica em furo de sondagem	12
Figura 8: Caracterização geográfica do distrito de Moatize	17
Figura 9: Mapa Geológico da Província de Tete, representando os terrenos tectónicos.....	20
Figura 10: Mapa Geológico da área de estudo	21
Figura 11: Esboço da série produtiva em Moatize	22
Figura 12: Transformações sofridas pelo carvão durante a Carbonificação	24
Figura 13: Tipos de carvão mineral e principais usos	25
Figura 14: Corte A.....	32
Figura 15: Corte A1	33
Figura 16: Corte A2	34
Figura 17: Corte da camada Bnu_Sf	35
Figura 18: Corte B1	36
Figura 19: Corte B2	37
Figura 20: Corte da camada Bnu_Sr	38
Figura 21: Corte C1	40
Figura 22: Corte C2	41
Figura 23: Corte da camada Gf_Sf.....	42
Figura 24: Corte D1	43
Figura 25: Corte D2.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados de furos de sondagem (Fonte: Autor, 2024)	15
Tabela 2: Aderência do modelo geológico na camada Bnl_Sr	33
Tabela 3: Aderência do modelo geológico na camada Bnu_Sf	35
Tabela 4: Aderência do modelo geológico na camada Bnu-Sr	38
Tabela 5: Aderência do modelo geológico na camada Gf-Sf	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a) Abreviaturas e Acrónimos

GPS- Global Positioning System

DGPS- Differential Global Positioning System

EPI- Equipamento de Protecção Individual

GTK- Geological Survey of Finland

JORC- Joint Ore Reserves Committee

LOX- Limit of Oxidation

PA- Posto Administrativo

Pr.Tot- Profundidade total

Pr.Lit- Profundidade da Litologia

Proj- Projecto

Qgis- Quantum Geographic Information System

RCP- Representative Concentration System

RCS- Rock Classification Scheme

b) Símbolos

%- Percentagem

°C- Grau Centígrado

hab/km²- Habitação por Quilómetro quadrado

m- metro

mm- milímetro

SUMÁRIO

CAPÍTULO I: GENERALIDADES	1
1.1. Introdução	1
1.2. Classificação da pesquisa	2
1.2.1. Quanto a natureza	2
1.2.2. Quanto aos objectivos	2
1.2.3. Quanto a abordagem do problema	2
1.2.4. Quanto aos procedimentos técnicos	2
1.2.5. Quanto ao método de pesquisa	3
1.3. Objectivos	3
1.3.1. Objectivo Geral	3
1.3.2. Objectivo específico	3
1.4. Definição do problema	3
1.5. Relevância do estudo	4
1.5.1. Relevância Económica	4
1.5.2. Impacto Social	4
1.5.3. Importância Académica	4
CAPÍTULO II: MATERIAIS E METODOLOGIA DE TRABALHO	5
2.1. Materiais	5
2.1.1. Referentes a fase do escritório:	5
2.1.2. Referentes a fase do trabalho de campo	5
2.2. Metodologia de trabalho	6
2.2.1. Consulta bibliográfica	6
2.2.2. Trabalho de campo	7
2.2.2.1. Mapeamento Geológico Detalhado no campo	7
2.2.2.2. Acompanhamento dos projectos de desmonte	9
2.2.3. Trabalho de Escritório	12
2.2.4. Elaboração do relatório	16
CAPÍTULO III: CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	17

3.1. Enquadramento Geográfico	17
3.2. Geomorfologia e Solos	18
3.3. Clima	18
3.4. Enquadramento Geológico	18
3.4.1. Geologia Regional.....	18
3.4.2. Geologia local de Moatize.....	20
CAPÍTULO IV: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
4.1. Origem e composição do carvão mineral	24
4.2. Lavra a céu aberto.....	26
4.2.1. Método de lavra em tiras (<i>stripping mining</i>).....	26
4.3. Mapeamento Geológico-Estrutural.....	26
4.4. Modelamento Geológico	27
4.5. Avaliação do nível de aderência	28
CAPÍTULO V: APRESENTAÇÃO, DISCUSSÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	30
5.1. Apresentação dos dados.....	30
5.2. Aderência estrutural e litológica.....	31
5.2.1. Camada Bnl_Sr	32
5.2.2. Camada Bnu_Sf.....	34
5.2.3. Camada Bnu_Sr.....	37
5.2.4. Camada Gf_Sf.....	41
CAPÍTULO VI: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	45
6.1. Conclusões.....	45
6.2. Recomendações	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1.Introdução

Moçambique tem um enorme potencial em recursos minerais. Como resultado, a indústria mineira no país tem vindo a crescer e espera-se que cresça ainda mais nos próximos anos (ITIE Moçambique, 2018). A província de Tete tem um grande potencial em Carvão, Ouro, Prata, Ferro, entre outros.

A mineração é a primeira etapa para a utilização económica dos recursos minerais. Esta é definida como a extração de material do solo, a fim de obter um ou mais componentes do material extraído (Lottermoser, 2010). A mineração desempenha um papel crucial na economia global, e a precisão dos modelos geológicos é fundamental para orientar as operações na mineração. A mina de carvão de Moatize, secção 2B representa uma área de interesse significativo. No entanto, a confiabilidade dos dados gerados nos modelos geológicos nesta secção é uma preocupação importante devido à complexidade geológica e às incertezas inerentes.

A geologia é uma ciência de incerteza, e os modelos geológicos são sempre uma aproximação da realidade. Existem várias fontes de incerteza, como a variabilidade dos dados, a complexidade geológica e as limitações tecnológicas. Portanto, é importante reconhecer as limitações do modelo geológico e considerar a incerteza ao interpretar os resultados da exploração mineral.

Os modelos geológicos são gerados com base em furos de sonda devidamente validados (topografia e geofísica) e dados de mapeamento de superfície. No entanto, a confiabilidade desses dados pode variar significativamente, afetando directamente a precisão e utilidade dos modelos geológicos resultantes.

A questão da fidelidade do modelo geológico em relação às características reais do depósito mineral é crucial no campo da geologia económica e da mineração. Os modelos geológicos são essenciais para entender a distribuição espacial e a geometria dos depósitos minerais, o que é fundamental para a exploração e a extração eficientes de recursos naturais. No entanto, a precisão desses modelos é frequentemente questionada, especialmente quando se considera a complexidade dos processos geológicos e as limitações das técnicas de amostragem e interpretação.

A interpretação dos dados geológicos muitas vezes envolve um certo grau de subjectividade. Os geólogos precisam fazer inferências e assumir hipóteses ao construir modelos geológicos, o que pode introduzir erros. Essas incertezas e subjectividades podem ser exacerbadas quando se trabalha com depósitos minerais de natureza complexa, como depósitos hidrotermais de alta sulfetação ou depósitos sedimentares de origem multifásica.

Portanto, a análise da confiabilidade dos dados e sua aderência aos resultados empíricos é essencial para garantir a validade das interpretações geológicas.

Os modelos geológicos desempenham um papel crucial na compreensão da estrutura e composição de depósitos geológicos, fornecendo uma representação simplificada e interactiva das características geológicas do subsolo. No entanto, a precisão desses modelos é frequentemente questionada devido à complexidade dos processos geológicos, à incerteza dos dados e às limitações dos métodos de modelagem.

Portanto, a avaliação sistemática da precisão dos modelos geológicos é essencial para garantir a confiabilidade das inferências geológicas e a tomada de decisões informadas em diversas aplicações.

1.2. Classificação da pesquisa

1.2.1. Quanto a natureza

A pesquisa é classificada como aplicada e objectiva gerar conhecimentos para a aplicação prática dirigida à solução de problemas específicos, envolvendo verdades e interesses locais.

1.2.2. Quanto aos objectivos

No que se refere aos objectivos, foi empregado uma metodologia exploratória e descritiva, pois teve como finalidade proporcionar mais informações sobre o assunto investigado, isto é, procurou classificar e interpretar factos que ocorrem.

1.2.3. Quanto a abordagem do problema

A pesquisa é classificada como qualitativa, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las, de modo à verificar a aderência dos topos e das bases das camadas de carvão através de mapas e corte de perfis.

1.2.4. Quanto aos procedimentos técnicos

Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa é classificada como pesquisa bibliográfica e de campo, onde a pesquisa bibliográfica baseou-se na consulta de livros, internet e outros trabalhos

de pesquisa. A pesquisa de campo baseou-se na colecta de dados na instituição onde decorreu o estágio académico, designada Vulcan, baseada na Província de Tete na cidade de Moatize.

1.2.5. Quanto ao método de pesquisa

A presente pesquisa, classifica-se como método hipotético-dedutivo, que iniciou pela identificação de um problema ou lacuna no conhecimento científico, passando pela formulação de hipótese e por processo de inferência dedutiva, a qual testa a ocorrência de fenómenos abrangidos pela referida hipótese.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

- ✓ Analisar o nível de aderência dos modelos geológicos da Vulcan na secção 2B.

1.3.2. Objetivo específico

- ✓ Determinar a aderência dos dados gerados e usados no modelamento geológico na secção 2B;
- ✓ Compreender do impacto do nível de aderência na lavra;
- ✓ Controlar o nível de desvio do modelo em relação a mina.

1.4. Definição do problema

A modelagem geológica desempenha um papel fundamental na avaliação de depósitos minerais, permitindo estimar com precisão o teor dos minerais presentes e sua quantidade.

Este processo é comumente realizado por meio da interpolação de dados provenientes de furos de sondagem. Apesar da variedade de métodos disponíveis para o modelamento geológico, a validação do modelo gerado com os dados reais do terreno é essencial para garantir sua precisão e utilidade prática.

Modelos estruturais e de qualidade são construídos a partir de inferências e acomodam imprecisões que devem ser constantemente verificadas através do levantamento sistemático de dados geológicos-estruturais nas frentes de lavra.

No contexto da mineração de carvão na Mina 1, Secção 2B, surge o seguinte questionamento:

"Até que ponto o modelo geológico actualmente empregado reflecte fielmente as características reais do depósito mineral?"

1.5.Relevância do estudo

1.5.1. Relevância Econômica

A precisão do modelo geológico utilizado nas frentes de lavra dentro da concessão Mineira 875C com particular ênfase para a secção 2B, é crucial para a viabilidade econômica do projecto mineiro. Uma modelagem imprecisa pode resultar em estimativas errôneas de reservas minerais, levando a decisões operacionais inadequadas, desperdício de recursos e impactos financeiros negativos. Portanto, a validação do modelo geológico em relação às características reais do depósito é essencial para garantir a eficiência e sustentabilidade econômica das operações de mineração.

1.5.2. Impacto Social

Além dos aspectos econômicos, a precisão do modelo geológico também tem implicações sociais significativas. Uma modelagem imprecisa pode afectar de forma indirecta as comunidades locais, o meio ambiente e a segurança dos trabalhadores. A falta de alinhamento entre o modelo geológico e a realidade do terreno pode resultar em impactos ambientais adversos, conflitos com as comunidades locais e riscos à segurança dos trabalhadores. Portanto, a validação adequada do modelo geológico é essencial para promover práticas de mineração responsáveis e sustentáveis.

1.5.3. Importância Acadêmica

Do ponto de vista acadêmico, a comparação entre o modelo geológico e os dados reais no terreno utilizando a metodologia do mapeamento geológico estrutural representa uma contribuição significativa para o avanço da ciência geológica. Esse estudo não apenas aprimora as técnicas de modelagem geológica, mas também fornece pontos de vistas valiosos sobre a precisão e confiabilidade dos modelos utilizados na indústria da mineração. Além disso, ao investigar a aderência do modelo geológico em relação às características reais do depósito, este trabalho pode abrir novas perspectivas para pesquisas futuras e desenvolvimento de metodologias mais precisas e eficazes na área da geologia aplicada à mineração.

Portanto, a investigação proposta neste estudo não só tem implicações econômicas directas na viabilidade do projecto mineiro, mas também impacta positivamente os aspectos sociais e académicos relacionados à modelagem geológica na mineração de carvão.

CAPÍTULO II: MATERIAIS E METODOLOGIA DE TRABALHO

2.1.Materiais

Para o desenvolvimento do presente trabalho fez-se o uso dos seguintes materiais:

2.1.1. Referentes a fase do escritório:

Foi necessário o uso de softwares para registo, análise e obtenção dos resultados, sendo eles:

- ❖ QGIS, Microsoft Excel, Acquire e Maptek Vulcan com licenças autorizadas pelos proprietários. Também foi feito uso do Microsoft Word para registo e posterior elaboração do relatório final.

2.1.2. Referentes a fase do trabalho de campo

Durante o trabalho de campo, foi necessário ter um conjunto de equipamentos de proteção individual (EPI), que incluíram:

- ❖ Capacete com jugular;
- ❖ Óculos de proteção;
- ❖ Abafador de ouvido;
- ❖ Camisa refletora/colete refletor;
- ❖ Luvas;
- ❖ Botas com biqueira de metal;
- ❖ Protetor solar.

Para o processo de mapeamento, além dos EPI's, foi necessário dispor de:

- ❖ Uma viatura 4x4;
- ❖ Rádio de comunicação;
- ❖ GPS de mão e tablet marca mesa²/mapa impresso, para localização na mina, contendo:

- Principais feições geológico-estruturais actualizadas, obtidas a partir dos modelos geológicos e mapas geológicos anteriores;

- Superfícies topográficas em 3D mais actualizada, contendo a cota dos bancos de referência;

- Fotos aéreas orto-retificadas;

-Pontos geológicos produzidos em mapeamentos anteriores.

- ❖ Um DGPS de alta precisão de marca Trimble com variação da precisão de alguns centímetros a 1m;
- ❖ Uma câmara fotográfica;
- ❖ Bússola.

2.2. Metodologia de trabalho

O presente relatório de estágio foi feito seguindo uma série de etapas, sendo elas: a etapa pré-campo, campo e pós-campo. De forma, associada as referidas etapas têm diversos processos e procedimentos inerentes a realização do trabalho, como: consulta bibliográfica, organização e filtração de dados de furos, avaliação preliminar da área de mapeamento por meio de mapas e orto fotos (fotografias aéreas da área), processamento de dados, entre outros processos que serão apresentados no fluxograma na figura 1.



Figura 1: Esquema representativo de realização do relatório de estágio (Fonte: Autor, 2024)

2.2.1. Consulta bibliográfica

Esta etapa consistiu na revisão da literatura referente à área de estudo, relacionado à caracterização dos carvões da Bacia Carbonífera de Moatize. Durante a consulta bibliográfica teve ênfase estudos e publicações de trabalhos anteriormente desenvolvidos na área de estudo, bem como em minas de várias partes do mundo.

Foi feito o uso de livros e obras relacionados a mapeamento de minas de carvão não se restringindo a isso, e também fazendo o uso de Internet (World Wide Web) para consulta e obtenção de informação relevante.

2.2.2. Trabalho de campo

O trabalho de campo foi realizado dentro da concessão mineira 875C concedida a Vulcan, mina 1, Secção 2B em Moatize, sob orientação e supervisão dos geólogos de exploração. O mapeamento da área em estudo consistiu na identificação dos vários litotipos, levantamento dos topos e bases das camadas de carvão e as feições geológicas ali encontradas.

2.2.2.1.Mapeamento Geológico Detalhado no campo

O mapeamento geológico foi conduzido de maneira minuciosa, abrangendo a colecta de dados de campo e a aplicação de materiais de mapeamento. As etapas metodológicas incluíram:

- ❖ **Levantamento de campo:** realizou-se o levantamento geológico detalhado da área de estudo. Envolveu a colecta de informações sobre a geologia local, incluindo a identificação de camadas geológicas, estruturas e características geológicas relevantes. Utilizaram-se técnicas de campo, como descrição litológica, medição de espessura e registo de dados estruturais. Foi feito o levantamento do topo e base das camadas e mapeamento das falhas geológicas e das intrusões (diques e soleiras).
- ❖ **Utilização de tecnologias de mapeamento:** foram empregues tecnologias avançadas, como sistemas de posicionamento global (GPS), para colectar dados georreferenciados com alta precisão. Isso permitiu a criação de mapas geológicos detalhados.

Durante está fase do trabalho fez se a visita as frentes de lavra da mina 1 (secção 2B) como ilustra a figura 2, onde ocorreu a observação de vários taludes em diferentes frentes, tendo-se mantido ênfase nas paredes que apresentavam as camadas de carvão Bananeiras e Grande falésia.

As visitas tinham como objectivo a observação das feições geológicas presentes na secção 2B e observação do avanço das frentes durante o período de ocorrência do estágio, para confecção de um mapa geológico-estrutural que seria posteriormente usado para na análise do nível de aderência dos modelos geológicos e a realidade do campo.

Após uma análise minuciosa e sistemática, decidiu-se usar 3 frentes de trabalho sendo 2 delas na camada bananeiras e uma na camada grande falésia visto que apresentavam maior densidade de dados e também por serem as camadas em exploração.

A medição e registo dos topos (figura 3) e bases das camadas e das feições geológicas foram feitas usando o DGPS de alta precisão, garantindo assim um nível de confiança elevado nas coordenadas topográficas e levantadas. Após uma observação minuciosa na mina as áreas e/ou superfícies possíveis de serem mapeadas, houve a procura ao longo da mina, feições geológicas possíveis de efectuar o mapeamento. Somente feições geológicas *in situ* foram mapeadas. Feições geológicas deslocadas por motivos de desmonte por explosivos ou actividade mineira foram desconsideradas.



Figura 3: Registro de um ponto da camada bananeiras “topo” (Fonte: Autor, 2024)

2.2.2.2. Acompanhamento dos projectos de desmonte

Fez-se o acompanhamento dos projectos de desmonte nas várias frentes de lavra e fez-se o mesmo nas praças de sondagem presentes na secção 2B, para melhor compreensão sobre o processo de desmonte e uma compreensão melhor das litologias presentes na secção.

Foram definidos perfis, onde efectuaram-se cortes geológicos (como ilustra a figura 4) contendo a identificação da linha, número dos furos interceptados ao longo do corte, perfil estratigráfico e a cota topográfica dos mesmos, que podiam ser usados na interpretação das camadas na praça de sondagem.

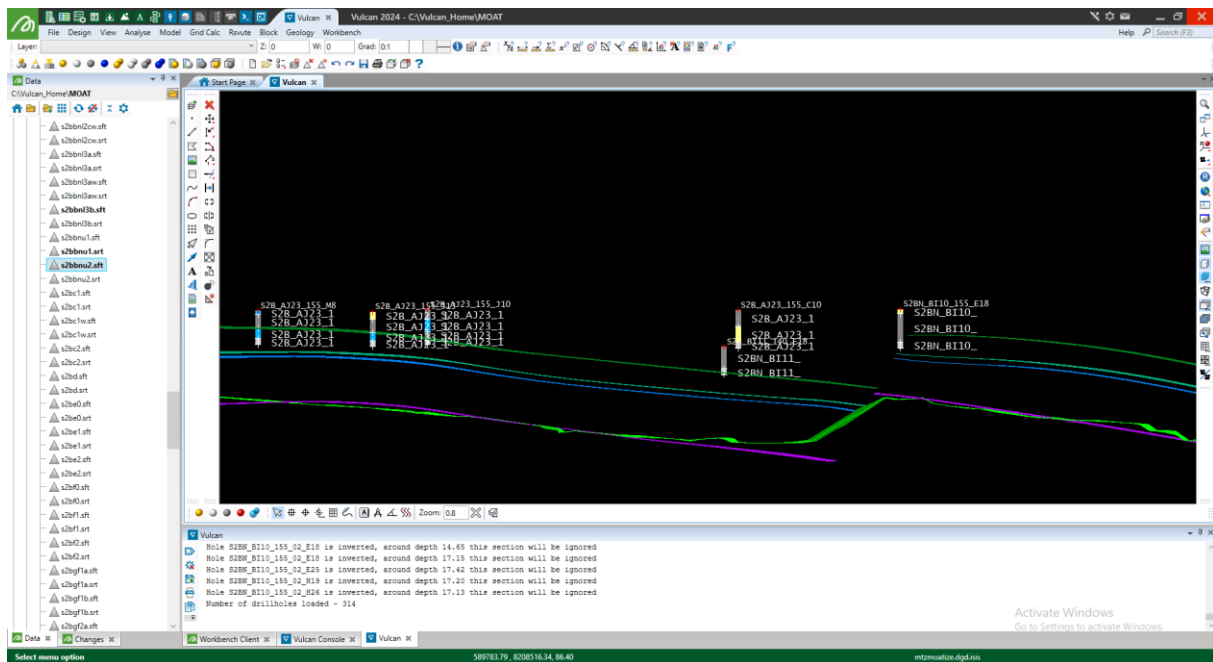


Figura 4: Corte do modelo no software Vulcan (Fonte: Autor 2024)

Usando dados geológicos do modelo actualizado foram seleccionados os furos prioritários a serem executados nos projectos de desmorte (figura 5). Escolhendo-se os furos para levantamento das suas coordenadas e que apresentavam carvão após a perfuração, segundo a previsão dos modelos, foram feitas as suas devidas marcações e registos.

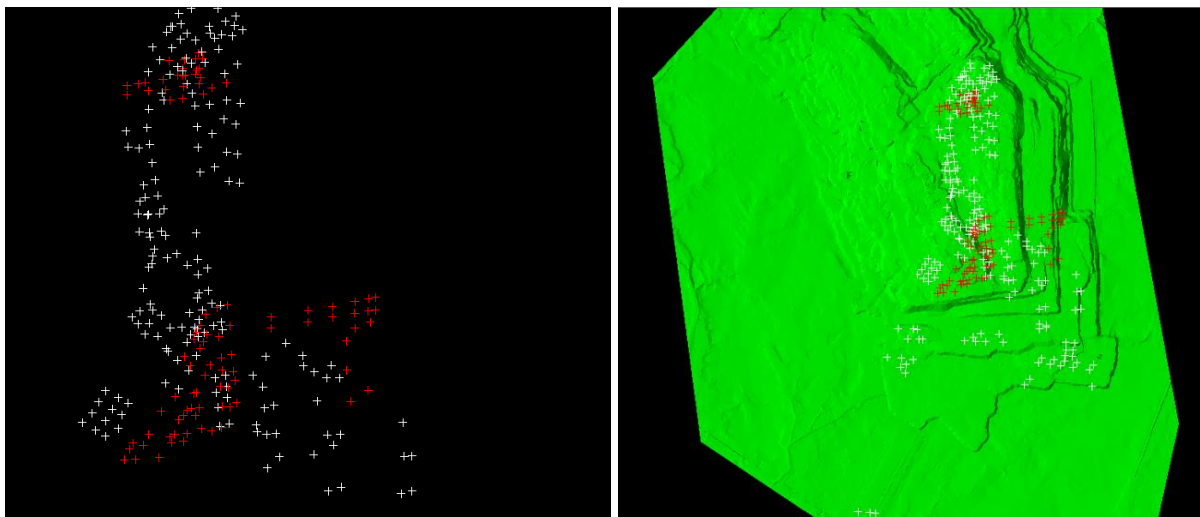


Figura 5: Selecção de furos prioritários (a vermelho) no software Vulcan (Fonte: Autor 2024)

Após a perfuração dos furos seleccionados, procedeu-se à descrição do material encontrado, tomando em conta a posição do material na pilha (figura 6), para estabelecer a sequência

litológica no furo. As principais litologias do furo foram anotadas, bem como sua posição relativa no furo (topo, base).



Figura 6: Furo de desmonte com presença de carvão na pilha “camada Grande Falésia”
(Fonte: Autor, 2024)

Também houve necessidade de fazer-se a perfilagem geofísica gama natural em alguns furos para identificação e confirmação das camadas e obtenção da profundidade real do contacto entre a camada de carvão e a camada de estéril.

Após a perfuração, a equipe da geofísica posicionou a unidade de leitura no furo para dar início a perfilagem geofísica, introduzindo o sensor de leitura da radiação gama natural (figura 7). Foi feita a impressão dos *logs* geofísicos pela empresa responsável pela geofísica.

As profundidades de cada unidade litológica foram determinadas posteriormente com auxílio de dados de perfilagem geofísica ou de parâmetros de perfuração como: taxa de penetrabilidade, força de penetração e profundidade do furo.



Figura 7: Processo de perfuração geofísica em furo de sondagem (Fonte: Autor, 2024)

2.2.3. Trabalho de Escritório

O estudo foi efectuado nos Escritórios da Área de Exploração, Planeamento e Estudos da Vulcan, onde participei de um estágio de 6 meses que teve início em Dezembro e teve a sua conclusão em Junho.

Foi também feito o uso de dados de furos (sondagem e desmonte) e de mapeamento da Vulcan obtidos previamente com o consentimento da Gerência da área de Geologia da Vulcan.

O desenvolvimento de estratégias de sequenciamento da lavra requer uma abordagem estruturada e baseada em dados geológicos sólidos. A metodologia incluiu:

- ❖ **Análise geológica e interpretação dos dados:** com base nos dados geológicos colectados, foi realizada uma análise para compreender a estratigrafia, as estruturas geológicas e a orientação das camadas na área de exploração. Também foi feita análise a dos furos de sondagem e a sua subsequente filtração escolhendo somente os que se relacionavam a área de estudo e as camadas de carvão estudadas;
- ❖ **Plotagem e estudo de modelagem de sequenciamento:** utilizando software de modelagem e simulação (Vulcan), foi feito o estudo do modelo previamente disponibilizado pela Gerência da Área de Exploração, Estudos e Projectos da Vulcan e

a plotagem dos furos disponibilizados para análise e interpretação e verificação da aderência dos furos em relação aos *grids* do modelo.

- ❖ **Elaboração do mapa:** fazendo uso dos software (Qgis) e dados disponibilizados foram elaborados os mapas geológicos estruturais.
- ❖ **Verificação do nível de aderência:** foi feita a comparação através do Excel, das cotas dos contactos litológicos do modelo geológico disponibilizado pela Gerência da Área de Exploração, Estudos e Projectos da Vulcan e as cotas dos contactos obtidos durante o mapeamento geológico.
- ❖ **Comparação do modelo e a realidade:** uma abordagem importante para avaliar a precisão do modelo geológico é a validação empírica, ou seja, comparar as previsões do modelo com os dados observados durante a exploração ou mineração. Se as previsões do modelo se desviarem significativamente dos dados observados, isso indica que o modelo pode não estar reflectindo fielmente as características reais do depósito mineral.

Foi feito uso dos furos de desmonte, para definição de perfis dos projectos de perfuração, tendo sido feita a escolha daqueles que podiam ser usados na interpretação das camadas na praça de sondagem. Após a definição dos perfis, efectuaram-se os cortes geológicos contendo a identificação da linha, número dos furos interceptados ao longo do corte e a cota topográfica dos mesmos.

Fez-se a reconciliação da descrição litológica do material perfurado com a resposta geofísica (*gama natural*) do furo para a identificação das profundidades de contacto entre diferentes litologias e definir a classificação (e posterior correlação) estratigráfica do furo.

Os dados obtidos dos projectos de desmonte foram registados em planilhas Excel, sendo cada furo devidamente identificado e agrupados em seus respectivos projectos de desmonte. As planilhas encontram-se abaixo nas tabelas do Capítulo V (mostrando a secção onde é colectada a informação; projecto; identificação do furo, coordenadas, profundidades, azimuth e inclinação).

O passo seguinte consistiu em comparar a cota z referente ao topo da camada, obtida por perfilagem geofísica e extraída do modelo geológico. Para tal, foi obtida a cota z, resultante das cotas x e y dos furos, através da superfície modelada correspondente ao do topo da camada. Obtidas as duas cotas foi necessário fazer-se a diferença entre elas e a subsequente análise dos mesmos para tomada de decisão sobre os níveis de aderência de acordo com os padrões estabelecidos na empresa Vulcan.

Fez-se também uso de furos de sondagem geológica nas proximidades para ajudar na interpretação dos resultados obtidos, sendo esses organizados também numa planilha Excel, como ilustra a tabela 1:

Tabela 1: Dados de furos de sondagem (Fonte: Autor, 2024)

Id do Furo	Este	Norte	rl	Pr.Tot	Pr.lit	site_n	site_t	site_s	proj
S2B_RCP0103	589987,625	8208664,963	200,516	83,87	83,87	S2B_RCS_ST_21_026	RCS	A	S2B
S2B_RCP0101	589919,231	8208661,739	203,828	95,93	95,93	S2B_RCS_ST_21_025	RCS	A	S2B
S2B_RCP0098	589783,466	8208585,106	202,011	75	75	S2B_RCS_ST_21_027	RCS	A	S2B
S2B_RCP0097	589846,586	8208645,128	203,21	90	90	S2B_RCS_ST_21_020	RCS	A	S2B
S2B_LOX613	589959,244	8208559,307	203,091	100,14	100,14	S2B_DS_19LNE_025_284	LOX	A	S2B
S2B_LOX611	589940,072	8208543,016	201,74	97,11	97,11	S2B_DS_19LNE_025_283	LOX	A	S2B
S2B_LOX609	589921,103	8208527,103	200,691	94,07	94,07	S2B_DS_19LNE_025_282	LOX	A	S2B
S2B_LOX607	589901,961	8208511,305	199,443	88,09	88,09	S2B_DS_19LNE_025_281	LOX	A	S2B
S2B_LOX606	589882,956	8208495,192	198,923	85,12	85,12	S2B_DS_19LNE_025_280	LOX	A	S2B
S2B_LOX604	589864,074	8208479,052	198,559	85,12	85,12	S2B_DS_19LNE_025_279	LOX	A	S2B
S2B_LOX544	589750,743	8208510,548	201,814	76,05	76,05	S2B_DS_19LNE_017_201	LOX	A	S2B
S2B_LOX543	589729,394	8208495,478	201,737	75,06	75,06	S2B_DS_19LNE_017_200	LOX	A	S2B
S2B_LOX541	589710,025	8208481,556	201,114	75,08	75,08	S2B_DS_19LNE_017_199	LOX	A	S2B
S2B_LOX539	589689,564	8208467,075	200,052	75,05	75,05	S2B_DS_19LNE_017_198	LOX	A	S2B
S2B_LOX245	590431,784	8208836,353	208,581	68	68	S2B_DS_18_LNE_13_243	LOX	A	S2B
S2B_LOX244	590406,999	8208826,098	208,439	59	59	S2B_DS_18_LNE_13_242	LOX	A	S2B
S2B_LOX232	590289,211	8208758,89	204,404	27,04	27,04	S2B_DS_18_LNE_13_234	LOX	A	S2B
S2B_LOX231	590309,194	8208770,428	204,43	31,03	31,03	S2B_DS_18_LNE_13_235	LOX	A	S2B
S2B_LOX229	590330,561	8208782,458	204,406	37,04	37,04	S2B_DS_18_LNE_13_236	LOX	A	S2B
S2B_LOX228	590355,556	8208796,901	205,637	43,03	43,03	S2B_DS_18_LNE_13_237	LOX	A	S2B
S2B_LOX227	590373,266	8208807,454	207,521	47,05	47,05	S2B_DS_18_LNE_13_238	LOX	A	S2B
S2B_RCP0078	589832,47	8209375,475	208,025	70,37	70,37	S2B_RC_ST_20_0042	RCP	A	S2B
S2B_RCP0059	589902,582	8209294,587	209,999	85,84	85,84	S2B_RC_ST_20_0015	RCP	A	S2B
S2B_RCP0058	589975,116	8209361,952	210,297	132,5	132,5	S2B_RC_ST_20_0014	RCP	A	S2B
S2B_RC561	589798,249	8209269,449	207,135	278,23	278,23	S2B_DS_19_236	RCS	A	S2B
S2B_RC527	589871,909	8209343,234	208,559	275,25	275,25	S2B_DS_19_204	RCS	A	S2B
S2B_LOX210	590015,58	8209299,599	211,803	33,04	33,04	S2B_DS_18_LNE_11_216	LOX	A	S2B
S2B_LOX209	589993,801	8209287,131	211,619	31,01	31,01	S2B_DS_18_LNE_11_214	LOX	A	S2B
S2B_LOX206	589972,728	8209274,619	211,164	27,03	27,03	S2B_DS_18_LNE_11_210	LOX	A	S2B

2.2.4. Elaboração do relatório

As informações colectadas e as análises realizadas nas fases anteriores deste trabalho foram consolidadas, organizadas e compiladas na forma de um relatório. Este relatório seguiu as directrizes e os formatos estabelecidos pelo Departamento de Geologia da Universidade Eduardo Mondlane para relatórios de estágio.

CAPÍTULO III: CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1. Enquadramento Geográfico

A área de estudo localiza-se no distrito de Moatize, Província de Tete, na zona centro de Moçambique. Este distrito encontra-se a cerca de 20km do Município de Tete, situando-se a NE da cidade capital provincial, entre os paralelos 15° 37' e 16° 38' de latitude sul e entre os meridianos 33° 22' e 34° 28' de longitude este (Mae, 2014).

O distrito de Moatize é limitado a Norte pelos distritos de Chiúta e Tsangano, a Este pela República do Malawi, a Sul pelos distritos de Tambara, Guro, Changara e Município de Tete pelo rio Zambeze e a Oeste pelos distritos de Chiúta e Changara (Mae, 2014). Administrativamente o distrito está dividido em três Postos administrativos: Moatize, Kambulatsitsi e Zóbuè que, por sua vez, estão subdivididos em nove localidades, a saber: Moatize, Benga, Mpanzu, Msungu, Kambulatsitsi, Mecungas, Zóbuè, Capridzanje e Ncodeze como ilustra a figura 8.

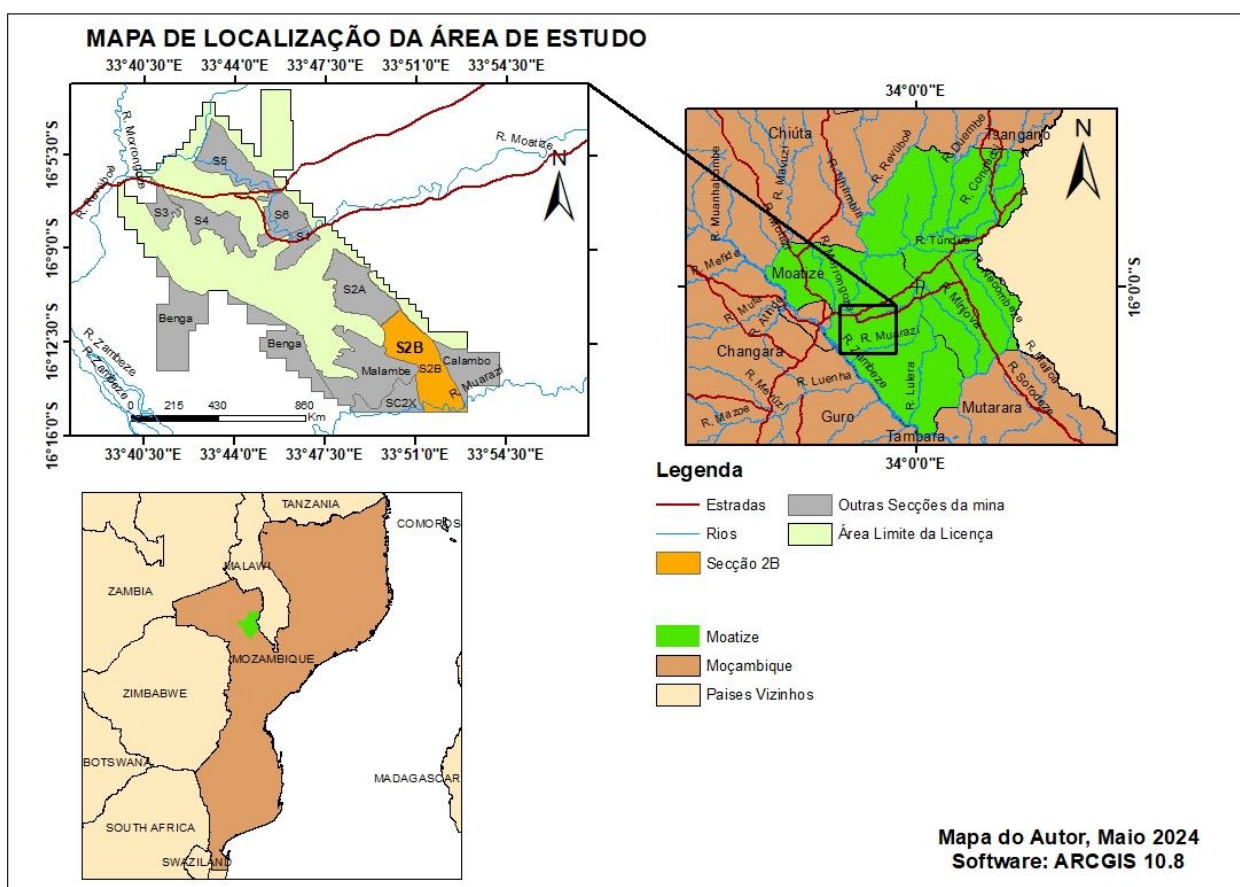


Figura 8: Caracterização geográfica do distrito de Moatize (Fonte: Autor, 2024)

3.2.Geomorfologia e Solos

Geomorfologicamente o distrito ocorre parcialmente no vasto complexo Gnaisso-Granítico do Mozambique belt (cinturão de Mocambique), onde sobressaem em forma de “Inselbergs” as rochas intrusivas do Pós-Karoo. Destas geoformas de terreno resultam vários agrupamentos de solo destacando-se: solos castanho-acinzentados, castanho avermelhados pouco profundos sobre rochas calcárias e os derivados de rochas basálticas, estes últimos, podendo ser avermelhados (Mae, 2014).

A Província de Tete tem uma topografia regional dominada pela intersecção do Lago Malawi (Vale do Grande Rift) e pelas Bacias Hidrográficas do Baixo Zambeze, que drenam numa direção Sudeste para a costa (ERM e Impacto, 2013).

A bacia carbonífera de Moatize, em termos de relevo situa-se num graben com uma largura variando de 2,5km a 8km e uma extensão de mais de 20 km, apresenta superfície plana a levemente ondulada, situada a uma altitude entre 140 à 220 metros acima do nível do mar.

3.3.Clima

Em Moçambique existem duas estações: estação quente e chuvosa e estação seca e fresca. A estação quente e chuvosa tem início no mês de Outubro e termina em Março. A estação seca e fresca vai de Abril a Setembro.

Ocorrem no distrito de Moatize dois tipos de climas nomeadamente o do tipo “Seco de Estepe com Inverno Seco - BSw” na parte Sul do Distrito e o do tipo “Tropical Chuvoso de Savana – AW” no Norte do Distrito (Mae, 2014). Os dois tipos de clima observam duas estações distintas, a estação chuvosa e a seca. A precipitação média anual na estação mais próxima (cidade de Tete) é cerca de 644 mm, enquanto a evapotranspiração potencial média anual está na ordem de 1.626mm. A maior queda pluviométrica ocorre sobretudo no período compreendido entre Dezembro de um ano a Fevereiro do ano seguinte, variando significativamente na quantidade e distribuição, quer durante o ano, quer de ano para ano, e a temperatura média está na ordem dos 26.5°C. As médias anuais máxima e mínima são de 32.5 e 20.5°C (Vasconcelos et al., 2009).

3.4.Enquadramento Geológico

3.4.1. Geologia Regional

A Província de Tete é composta por três grandes grupos de formações diferentes, as formações do Pré-Karoo, as do Supergrupo do Karoo (Carbonífero Superior-Jurássico Inferior) e, por fim,

as formações do Pós-Karoo com idades que variam do Jurássico até ao recente (GTK Consortium, 2006). As formações do Pré-Karoo tem idades Neoproterozoico e algumas formações ígneas do Câmbrio-Ordovícico. As formações do Karoo e do Pós-Karoo representam a cobertura Fanerozoica da região.

A bacia carbonífera de Moatize localiza-se na Província de Tete, com uma distância de 20 km a noroeste da capital Provincial, e a 6 km do aeroporto de Chingodzi, a vila de Moatize situa-se dentro da bacia carbonífera na estrada que interliga Tete e Malawi pelas fronteiras de Zâmbia e pela fronteira de Moçambique (GTK Consortium, 2016).

A partir do afluente de Zambeze, têm a sul, as rochas do complexo gabro - diorítico de Tete que se conectam à importante bacia de Moatize-Minjova que desde Tete, se prolonga até a fronteira com Niassalândia, na região N'Cuungas e Salambidua, onde se liga com a bacia carbonífera de Maniampa- Niassa.

É caracterizada por possuir rochas do Pré-câmbrio, do Karoo inferior e do Pós-câmbrio. A Formação do Pré-câmbrio apresenta em grande parte das rochas básicas limitadas por rochas sedimentares do sistema de Karoo, o exemplo de monte M'Pandí, que no seu complexo geológico, é caracterizada por diversificação de rochas, nomeadamente, gabros, gabros-anortositos, Gneisses, intrusões de quartzo-plagioclásio, calcopirita, pirita, micas moscovita e biotita, com ocorrências minerais de magnetita, e outras com mineralizações máficas (Fernando Real, 1966).

No entanto, do ponto de vista geológico (figura 9), entre a região de Moatize e a fronteira da Niassalândia dispõem-se importantes afloramentos da série produtiva que acompanham a sul, o maciço antigo constituído fundamentalmente por afloramento do complexo gabro-diorítico de Tete, as formações carbonosas reaparecem na região do rio khondédzi, a norte de Moatize.

De acordo com (GTK Consortium, 2006), "ocorre no Graben do médio Zambeze, orientado E-W, devido a sobreposição da tectónica extensiva do Cretácico, pode ser dividido nos grabens do Luia e Moatize com orientação NW-SE. O super grupo do Karoo nos Grabens de Moatize e do Luia consiste de uma sequência espessa de grés e argilitos com camadas de carvão perto da base".

Na mesma bacia carbonífera, (Fernando Real, 1966 e GTK Consortium, 2006), estudaram os afloramentos da formação de Moatize, concluíram que são encontradas ao longo do banco norte do Rio Zambeze, Moatize-Minjova, bem exposta no Vale do Rio Moatize, com a presença de

níveis de grés carbonosos e conglomeráticos entre os complexos carbonosos levando a confirmar a hipótese de serem jazigos alóctones. Dentro desta formação encontra depositada a Formação de Matinde, este compreende uma espessa sucessão intercalada de grés muito grosseiros e conglomerados, aflora sob derrame de lavas basálticas no núcleo do domo vulcânico da Serra Mavunge.

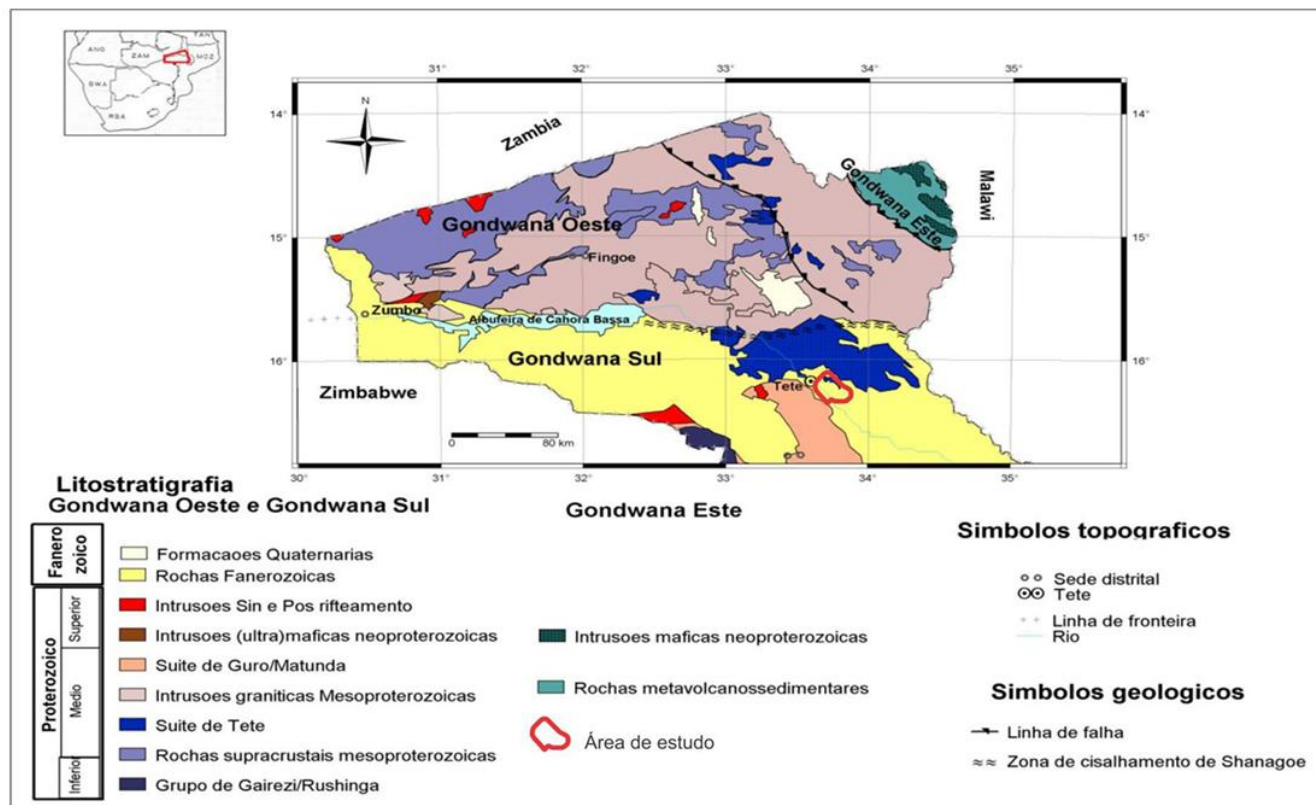


Figura 9: Mapa Geológico da Província de Tete, representando os terrenos tectónicos (Fonte: Morais, 2011 Apud MACIE, 2015)

3.4.2. Geologia local de Moatize

O depósito de carvão de Moatize é constituído por rochas de origem sedimentar, tais como, siltitos e arenitos que são as litologias correspondentes a rocha estéril (figura 10). O minério é composto por seis camadas inclinadas principais de carvão com a seguinte nomenclatura: André, Grande Falésia, Intermédia, Bananeiras, Chipanga e a camada Sousa Pinto, sendo apresentadas da camada mais recente, para a mais antiga (figura 11). A Secção 2B apresenta na sua estratigrafia as camadas de carvão Grande Falésia, Intermédia, Bananeiras e Chipanga. Também apresenta como estéreis na sua estratigrafia siltitos e arenitos.

Entre as camadas de carvão existe a presença de material estéril composto por siltitos e arenitos. As camadas de carvão apresentam características distintas quanto a sua composição química e consequentemente em diferentes valores económicos.

Na região de Moatize, superiormente à série produtiva, começa outra série sedimentar constituída por grão grosseiro à médio, grés arcósico e pequenas camadas lenticulares de seixos rolados e estratificação cruzada (F. Real, 1966).

A série produtiva é de grande interesse por nela estar englobada a importante camada de carvão. Esta série é caracterizada por possuir xistos, grés carbonosos, argilitos negros, por vezes piritosos. A idade desta série é de Pérmico Inferior, que, provavelmente se corresponde com o andar Ecca (A. Real, 1978).

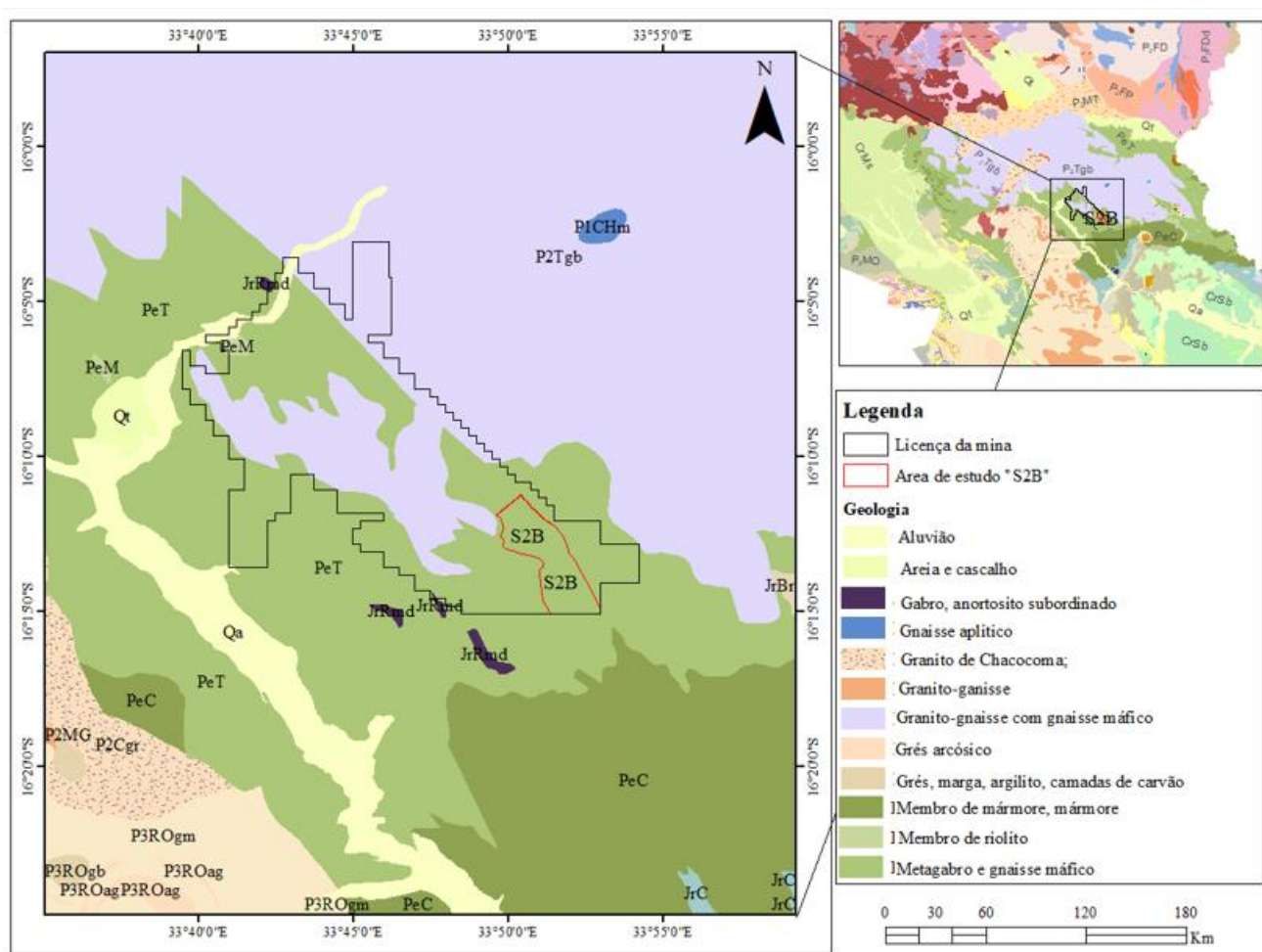


Figura 10: Mapa Geológico da área de estudo (Fonte: Autor, 2025)

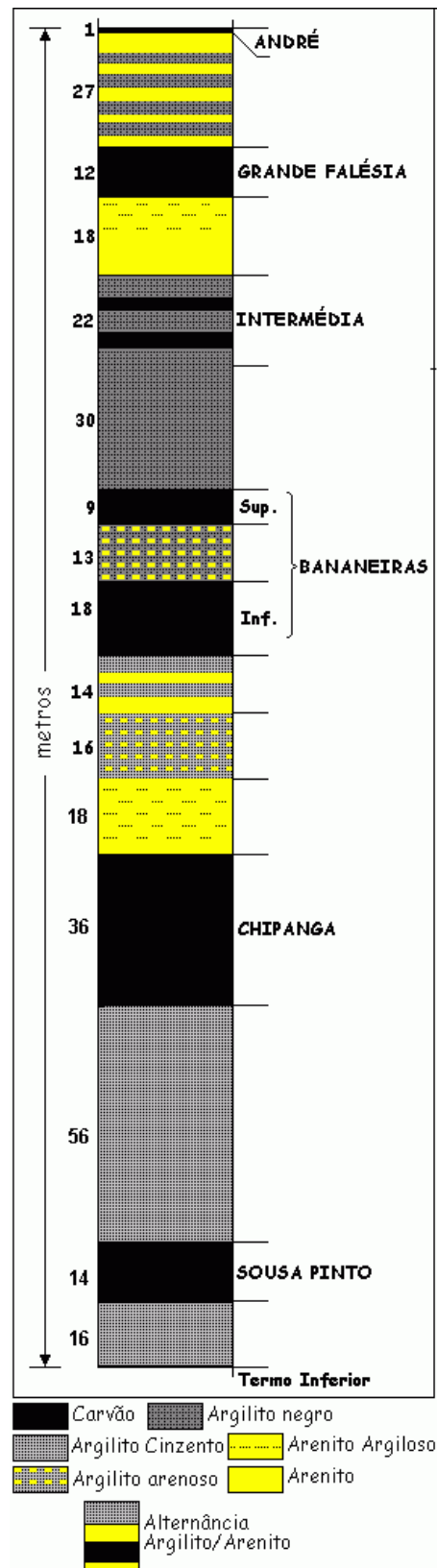


Figura 11: Esboço da série produtiva em Moatize (Fonte: Vasconcelos, 2005)

De acordo com Vasconcelos, (2005), na série produtiva são conhecidas camadas de diferentes espessuras e designadas a partir da mais recente, nomeadamente:

- 1. Camada Grande Falésia-** constituída por xistos argilosos e carvões com 12 m de espessura. Ocorre em toda a bacia, mas com exposição bastante limitada. Devido ao alto teor de cinzas que caracteriza esta camada, a sua exploração é considerada sub-económica (Vasconcelos, 1995).
- 2. Camada Intermédia** – formada por argilito negro e níveis de carvão muito pequeno, é uma camada bastante heterogénea e é composta de duas sub-camadas separadas por xisto negro. A sua espessura varia de 1.25 a 21 m e a sua composição é bastante irregular fazendo com que a sua exploração seja considerada sub-económica (RDMZ, 2006).
- 3. Camada Bananeiras** – a que corresponde a um complexo de xistos e carvão, esta camada é subdividida em duas sub-camadas, com uma espessura que varia de 9 m na superior e 18 m na inferior, ambas intercaladas por argilito arenoso (Vasconcelos, 1995).
- 4. Camada Chipanga** – a mais importante da série produtiva com uma camada basal de 2.5 a 3.6 de carvão, ou seja, uma espessura de 36 m. É a camada mais espessa da bacia, possui maior homogeneidade de distribuição ao longo da bacia. É composta por uma alternância de bancadas de carvão e de pelitos, havendo uma secção basal de carvão bastante homogénea com uma espessura média de 4-5m que contém, contudo, matéria mineral intercrescida muito fina. Na realidade, é esta secção basal que tem vindo a ser explorada ao longo de todos estes anos. A camada Chipanga tem uma espessura que varia de 24 m a 65 m, com um valor médio de 30 m. Acontece, no entanto, que em determinadas zonas da Bacia, a camada Chipanga sofre um *split*, havendo um *interburden* arenoso que pode atingir 50m de espessura (Vasconcelos, 1995).
- 5. Camada Sousa Pinto** – constituída por um complexo carbonoso com 14 m de espessura. É a camada que se encontra estratigraficamente no nível inferior da formação de Moatize. É constituída por uma alternância rítmica de bancadas de carvão e de estéréis heterogeneamente distribuídas ao longo de toda a bacia. As bancadas de carvão não são constituídas por carvão com poucas impurezas minerais, sendo sim formadas por intercalações de carvão e argilito carbonoso. O estéril é formado por pelitos que podem atingir 2m de espessura. A espessura da camada Sousa Pinto varia de 1.22 m a 85.60 m (Vasconcelos, 1995).

CAPÍTULO IV: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Origem e composição do carvão mineral

O carvão mineral é uma rocha sedimentar combustível e tem sua gênese ligada a restos vegetais em diferentes estados de conservação que sofreram soterramento e compactação (Flores, 2014).

A qualidade do carvão mineral está ligada ao estágio de maturação da matéria orgânica. Com o passar do tempo ocorre a evolução através de transformações nesta matéria orgânica, tendo lugar o processo chamado de carbonificação, que é o enriquecimento do teor de carbono decorrente dos agentes da geodinâmica interna da matéria orgânica, o qual proporciona o aumento da pressão e da temperatura na ausência de oxigênio, (Hamm, 2012).

A carbonificação é uma transformação química da matéria orgânica não sendo um processo pontual, mas sim um processo gradual, onde matéria orgânica acumulada e soterrada passa por transformações, inicialmente bioquímicas e posteriormente químicas (figura 11), onde os processos termodinâmicos associados, ou seja, o aumento da pressão e da temperatura, durante o tempo geológico, vão transformando a matéria orgânica original, passando pelos estágios de turfa, lenhito, carvão sub-betuminoso, carvão betuminoso até antracito, (Flores, 2014).

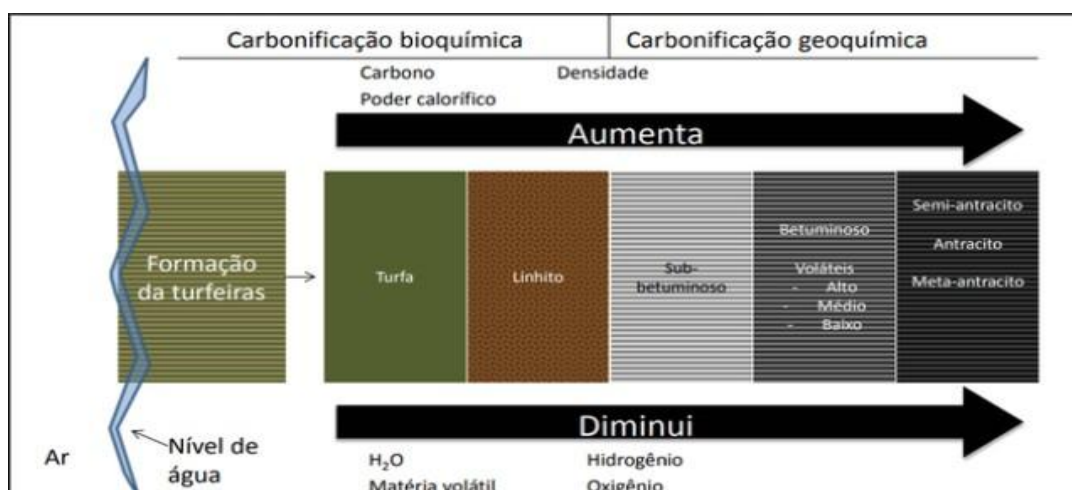


Figura 12: Transformações sofridas pelo carvão durante a Carbonificação (Fonte: Harttmann, 2017)

A turfa tem baixo teor carbonífero, pois é um dos primeiros estágios do carvão constituindo um combustível de baixa qualidade, com teor de carbono entre 55% e 60%. O estágio seguinte é o lenhito, com teor entre 61% e 78%, seguido do carvão betuminoso, com teor entre 79% e 90%. Por fim, o carvão mais puro é o antracito, com teor superior a 90% (Sousa, et al 2012). Esses diferentes carvões possuem diferentes aplicações. A figura

12 apresenta os principais usos de cada tipo. Os carvões menos nobres (carvões com menores teores de carbono e maior teor de cinzas) são chamados carvão-vapor e utilizados principalmente em fornos de usinas termelétricas para geração de eletricidade, enquanto o destino do carvão mais nobre é industrial e por isso é chamado de carvão metalúrgico.

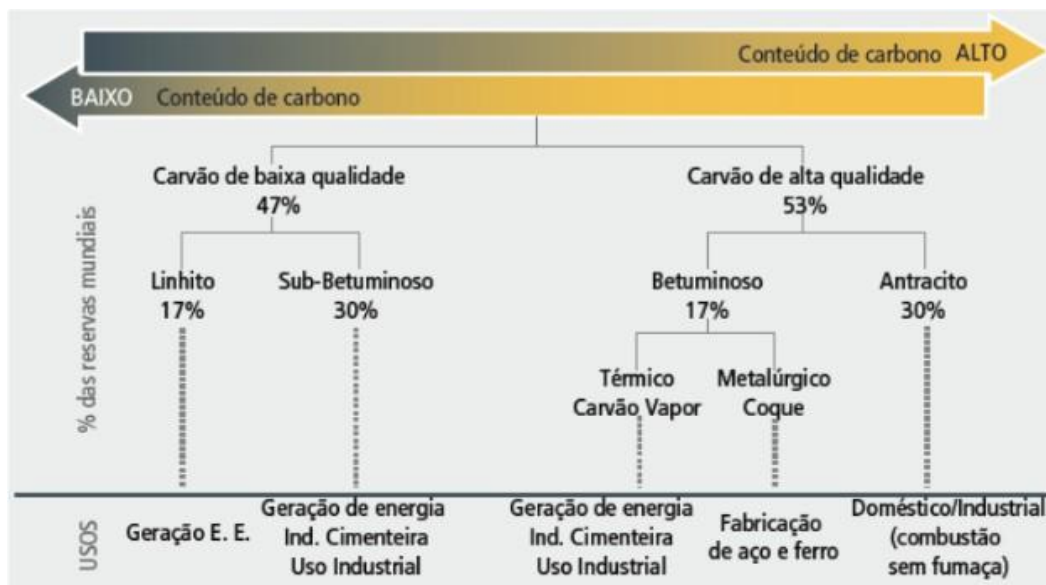


Figura 13: Tipos de carvão mineral e principais usos (Fonte: Tolmasquim, 2016)

Quanto à composição do carvão, este contém carbono fixo, humidade, voláteis e material mineral que ao final da combustão se transformam em cinzas e um grande número de diferentes hidrocarbonetos que volatilizam quando a combustão é iniciada (Glassman e Yetter, 2008).

De acordo com Suárez-Ruiz e Crelling, (2008), um carvão de alta qualidade é um carvão com baixo teor de matéria mineral e um alto teor de matéria orgânica.

O carvão incorpora uma quantidade de matéria mineral durante a sua formação. Estas impurezas podem estar na composição vegetal da qual o carvão deriva ter origens externas. Fisicamente a matéria mineral pode ser classificada como matéria mineral inerente e matéria mineral estranha.

A matéria mineral inerente é aquela que teve sua origem nos constituintes orgânicos da planta que deu origem ao leito do carvão, esta tem uma distribuição uniforme dentro do carvão. A matéria mineral estranha que foi trazida para o depósito por meios exteriores, geralmente se origina do material geológico que circundava as reservas de carvão, esta se apresenta em grandes pedaços dentro da estrutura do carvão (Bryers, 1998).

A matéria mineral inerente é aquela que teve sua origem nos constituintes orgânicos da planta que deu origem ao leito do carvão, esta tem uma distribuição uniforme dentro do carvão. A

matéria mineral estranha que foi trazida para o depósito por meios exteriores, geralmente se origina do material geológico que circundava as reservas de carvão, esta se apresenta em grandes pedaços dentro da estrutura do carvão (Bryers, 1998).

4.2.Lavra a céu aberto

Mineração a céu aberto refere-se ao método de extração de rochas ou minerais da terra por sua remoção de um poço aberto ou de uma escavação em empréstimo. O termo é usado para diferenciar esta forma de mineração dos métodos extrativos que requerem perfuração de túneis na terra - mineração subterrânea (Alrawashdeh, 2021).

4.2.1. Método de lavra em tiras (*stripping mining*)

De acordo Dyer e Hill (2011), o método de lavra em tiras possui grande adequação para depósitos com geometria tabular, que possuem estruturas dispostas em camadas horizontais ou com pequenos gradientes de inclinação e que não estejam dispostos em grandes profundidades. Ainda segundo os autores, a aplicação desta metodologia engloba produtos principalmente relacionadas com o carvão mineral.

Ainda segundo os autores, o método de tiras ou Strip Mining é um tipo de lavra a céu aberto que envolve escavar o solo, rochas ou outro material para expor o campo de minério tabular, em camadas ou lenticular, ou seja, corpos relativamente horizontais. Este é um método utilizado principalmente para mineração de camadas pouco profundas, sub-horizontais e com grande extensão e volume.

A mina de carvão a céu aberto da Vulcan Moçambique em Moatize, utiliza o método de lavra a céu aberto. Nesse método é empregue o método de lavra em tiras (*strip mining*), onde a camada de carvão é extraída através da remoção de grandes quantidades de terra e rocha que cobrem o depósito de carvão. Isso permite o acesso mais fácil ao carvão e é adequado para depósitos de carvão que estão próximos da superfície.

4.3.Mapeamento Geológico-Estrutural

O mapeamento geológico-estrutural é uma actividade essencial no contexto da mineração, pois permite compreender a distribuição espacial das rochas, estruturas tectônicas e outras feições geológicas relevantes em uma determinada área (CPRM, 2014; Marini et al., 2005). O principal produto desse processo é o mapa geológico-estrutural, que reúne as informações obtidas em campo, representando litologias, estruturas, minerais e zonas de alteração, servindo como base para a construção de modelos geológicos tridimensionais.

Mapas estruturais em escala regional e de detalhe são pré-requisitos indispensáveis para qualquer empreendimento mineral, uma vez que orientam desde a exploração até o planejamento da lavra (Silva et al., 2012). No caso da região carbonífera de Moatize, principal produtora de carvão mineral de Moçambique, a complexidade estrutural decorrente de eventos tectônicos impõe desafios à modelagem geológica, exigindo um profundo conhecimento da geologia estrutural local para garantir a viabilidade técnica e económica da extração (Fernandes, 2018).

A mineração a céu aberto na região é realizada pelo método strip mining, o que torna ainda mais crucial o entendimento detalhado das estruturas geológicas, sobretudo falhas e zonas de fraturamento intenso, pois estas podem afectar significativamente a estabilidade das escavações e o aproveitamento do carvão (Souza & Almeida, 2010). A identificação e caracterização dessas zonas são etapas críticas para o planejamento e a segurança da lavra.

A análise estrutural por meio de imagens de satélite e a interpretação de dados geológicos obtidos por furos de sondagem permitem a construção de modelos tridimensionais e de mapas estruturais detalhados, que auxiliam na identificação de zonas de risco e na previsão de deslocamentos das camadas de carvão. Essas informações são fundamentais antes do início da mineração, para determinar a direção, extensão, deslocamento e características geotécnicas das falhas de forma precisa, garantindo assim maior controle técnico sobre a operação (Lisboa et al., 2016).

4.4. Modelamento Geológico

A modelagem geológica é o processo de converter e reconstruir a geologia em um modelo computadorizado 3D. Esse modelo inclui dados estruturais, litológicos e químicos.

A modelagem geológica envolve o desenvolvimento de descrição detalhada de um volume de rochas, considerando tipos de rochas, deformações e estruturas quebradiças ou dúcteis. Sem um modelo conceitual básico, a modelagem geológica seria impossível. É desenvolvida através da colecta de dados em campo por meio de descrições detalhadas e furos de sondagem, utiliza-se softwares especializados para criar o modelo 3D, levando sempre em conta a integração dos dados para representar a geologia de forma coerente e real.

Um modelo geológico é uma representação simplificada da composição e estrutura de um sistema geológico, baseado em dados colectados no campo e/ou via sensores remotos. O

conceito de aderência do modelo relaciona-se à capacidade do modelo em reproduzir os padrões reais encontrados no ambiente geológico.

De acordo com Jensen et al. (2015), os modelos geológicos devem equilibrar simplicidade e complexidade, permitindo que sejam compreensíveis e úteis sem sacrificar sua precisão. Eles propõem que os modelos aderentes são essenciais para prever riscos geológicos e para a exploração eficiente de recursos.

4.5.Avaliação do nível de aderência

A avaliação do nível de aderência de modelos geológicos é um processo essencial que integra múltiplas disciplinas para determinar a eficácia de representações geológicas no contexto de exploração, mineração e gerenciamento de recursos naturais. Esse processo envolve métodos rigorosos de validação e aplicação prática.

Os factores-chave que influenciam a aderência incluem:

- Qualidade e quantidade dos dados colectados;
- Métodos de interpolação utilizados para criar o modelo;
- Experiência e interpretação dos profissionais envolvidos.

A avaliação da aderência pode ser feita por meio de métodos quantitativos e qualitativos, divididos em categorias principais:

a) Estatísticos

Métodos estatísticos envolvem análises de dados numéricos para medir discrepâncias entre o modelo e os dados reais. Por exemplo, Smith (2020) destaca o uso de regressões lineares e análise de variância (ANOVA) como ferramentas para quantificar a precisão de modelos geológicos.

b) Computacionais

Com o avanço da tecnologia, sistemas computacionais sofisticados, como inteligência artificial e aprendizado de máquina, estão sendo aplicados na comparação entre modelos e dados de campo. Brown et al. (2019) discute o uso de simuladores para prever variações em depósitos minerais e para validar modelos estruturais.

c) Visuais

A interpretação visual, embora subjectiva, é amplamente utilizada para validar modelos. Geólogos experientes frequentemente comparam mapas e diagramas gerados com observações do campo. Isso é particularmente útil em regiões onde os dados quantitativos são limitados.

d) Técnicas Híbridas

Segundo Garcia et al. (2023), a combinação de métodos estatísticos e computacionais gera resultados mais confiáveis, especialmente em projectos de grande escala.

A aderência de modelos geológicos tem aplicações práticas em várias áreas:

- Mineração: estima a localização e a qualidade de depósitos minerais, otimizando operações e reduzindo custos.
- Engenharia Geotécnica: identifica zonas instáveis para construção e infraestrutura.

Apesar de suas amplas aplicações, há desafios que limitam a eficácia de modelos geológicos. Liu et al. (2021) apontam que a falta de dados de alta precisão e a complexidade geológica de algumas regiões tornam a validação de modelos uma tarefa difícil e sujeita a erros.

CAPÍTULO V: APRESENTAÇÃO, DISCUSSÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A geologia é uma ciência incerta, e os modelos geológicos são sempre aproximados.

A análise da aderência dos modelos geológicos aos dados observados é essencial para garantir a confiabilidade e utilidade desses modelos em processos de programação e operação de lavra. Este estudo contribui para uma compreensão mais completa das limitações e potenciais melhorias nos métodos de modelagem geológica, visando avançar a precisão e confiabilidade das interpretações geológicas.

Para melhor compreensão, organização e interpretação, os dados das análises e mapeamento das frentes e o dos furos para desmonte serão apresentados separadamente.

5.1. Apresentação dos dados

Segundo a Vulcan para determinação da aderência é necessário mencionar os critérios escolhidos como representantes dos diferentes tipos de aderência.

Uma boa aderência (-1.5 à 1.5) é indicada quando há uma correspondência estreita entre o modelo e os dados observados, tanto estrutural quanto litologicamente.

Os critérios de uma boa aderência são:

- Correspondência entre as estruturas modeladas (falhas, diques, etc.) e observadas;
- Precisão na distribuição de litologias;
- Novos dados validam o que já estava constatado no modelo.

Isso sugere que os métodos de modelagem empregados foram eficazes na captura das características geológicas representadas nos mapas, o que pode aumentar a confiança na precisão dos modelos.

A aderência neutra (-3 à -1.51 e de 1.51 à 3) indica uma correspondência intermediária, onde o modelo não é nem altamente consistente nem altamente discrepante em relação aos dados observados.

Os critérios de uma aderência neutra são:

- Correspondência parcial entre estruturas modeladas e observadas;
- Precisão moderada na distribuição de litologias;

- Novos dados tem validação parcial ou inconclusiva quando comparado com o modelo.

Dados neutros de aderência podem ser resultados de diferenças na resolução espacial, metodologia de mapeamento ou interpretação geológica entre os dados modelos e os mapas existentes.

Uma má aderência (-3.01 à $-n$ e de 3.01 a $+n$) ocorre quando há discrepâncias significativas entre o modelo e os dados observados.

Os indicadores incluem:

- Discrepâncias substanciais nas estruturas modeladas versus observadas;
- Diferenças notáveis na distribuição de litologias;
- Dados novos contradizem o modelo.

Mau nível de aderência entre o modelo e os mapas indica uma discrepância substancial entre os dados modelados e os dados observados. Isso pode ser atribuído a uma série de factores, como falta de dados de mapeamento e furos ou actualização dos mesmos, ou limitação na qualidade ou quantidade dos dados usados na sondagem.

A discrepância entre o modelo geológico e os mapas geológico-estruturais existentes podem ser atribuídos a diferenças na interpretação geológica.

Esses casos ilustram a diversidade de resultados que podem ser encontrados em relação à aderência dos modelos geológicos às características reais dos depósitos minerais.

Em suma, a avaliação da aderência dos modelos geológicos às características reais dos depósitos minerais é essencial para garantir uma exploração e extração eficientes e responsáveis dos recursos naturais. Isso requer uma abordagem holística, que leve em consideração tanto os aspetos técnicos quanto as incertezas inerentes aos dados e às interpretações geológica.

5.2.Aderência estrutural e litológica

A aderência estrutural e litológica é uma consideração crucial na construção e interpretação de modelos geológicos. Ela se refere ao grau de consistência e compatibilidade entre os dados geológicos observados no campo e o modelo geológico gerado. Uma boa aderência implica que o modelo geológico reproduz com precisão as estruturas e litologias observadas, enquanto uma má aderência indica discrepâncias significativas.

Para o estudo da aderência escolheram-se as camadas Bananeiras (BNL e BNU) e Grande Falésia. Para a camada BNL estudou-se o seu *roof* (topo) e para camada BNU estudaram-se tanto o *roof* como o *floor* (topo e base) e para a camada GF estudou-se somente a *floor* (base).

5.2.1. Camada Bnl_Sr

O *grid* da base da camada Bananeira *Lower* (figura 13), apresenta carvão em alguns pontos previstos e outros não, isso indica uma aderência neutra no modelo, com acertos e erros na previsão da distribuição do minério.

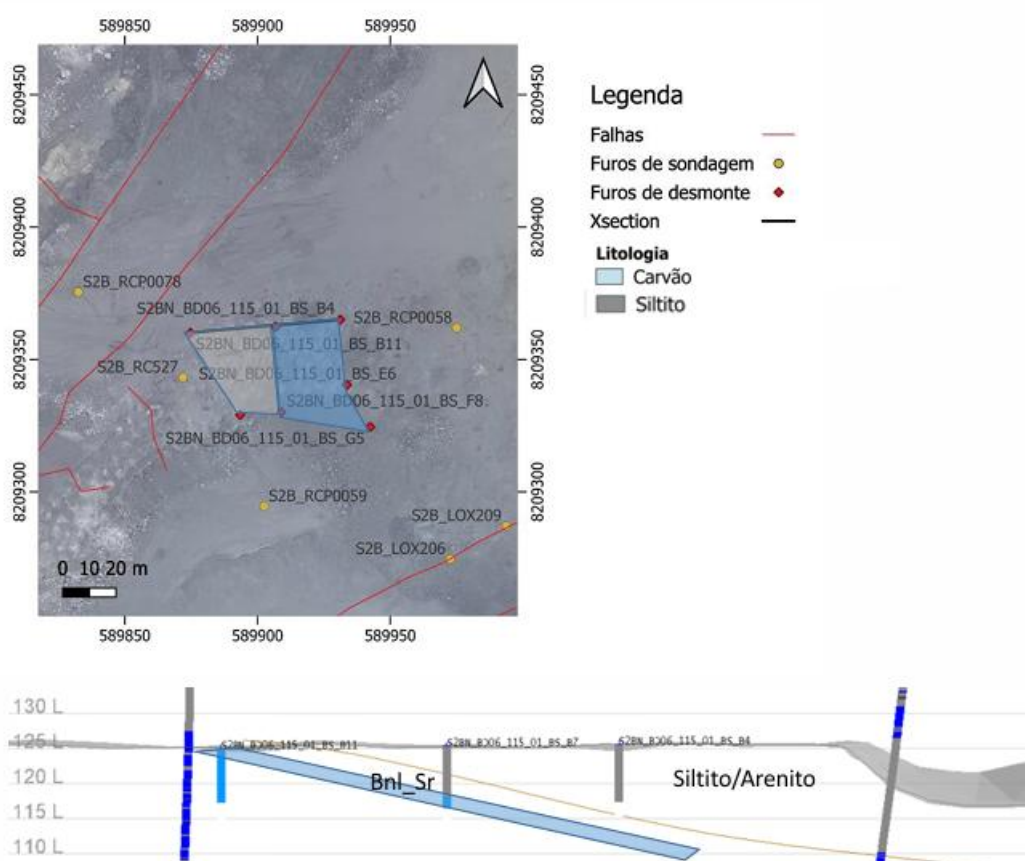


Figura 14: Corte A (Fonte: Autor, 2024)

Essa aderência neutra do modelo sugere que, embora o modelo possa fornecer informações úteis, ele também possui limitações e incertezas que precisam ser consideradas como ilustra a tabela 3. Isso destaca a necessidade de abordagens mais integradas e multidisciplinares, bem como uma avaliação cuidadosa das incertezas associadas aos modelos geológicos.

Tabela 2: Aderência do modelo geológico na camada Bnl_Sr

ID	X	Y	Z_min a	Z_modelo	Z_dif	Aderênc ia
S2BN_BD06_115_01_BS _B7	589906. 84	8209362. 31	118.06	121.31790 8	- 3.25790 8	Má
S2BN_BD06_115_01_BS _B11	589874. 78	8209360. 1	124.99	124.99	0	Boa
S2BN_BD06_115_01_BS _F10	589893. 49	8209329. 06	119.23	122.90986 6	- 3.67986 6	Má
S2BN_BD06_115_01_BS _F8	589908. 98	8209330. 13	117.51	120.00440 9	- 2.49440 9	Neutra

Fonte: Autor, 2024

Feita a análise com base nos furos de desmonte, houve a necessidade de recorrer a furos de sondagem, através de corte transversais na aplicação Vulcan, foi possível ver a discrepância entre a topografia da camada Bnl_Sr na mina (destacada pela cor cinzenta nas figuras 14 e 15) e a do modelo (destacada pela cor azul) garantindo assim uma maior confiabilidade nos resultados obtidos.

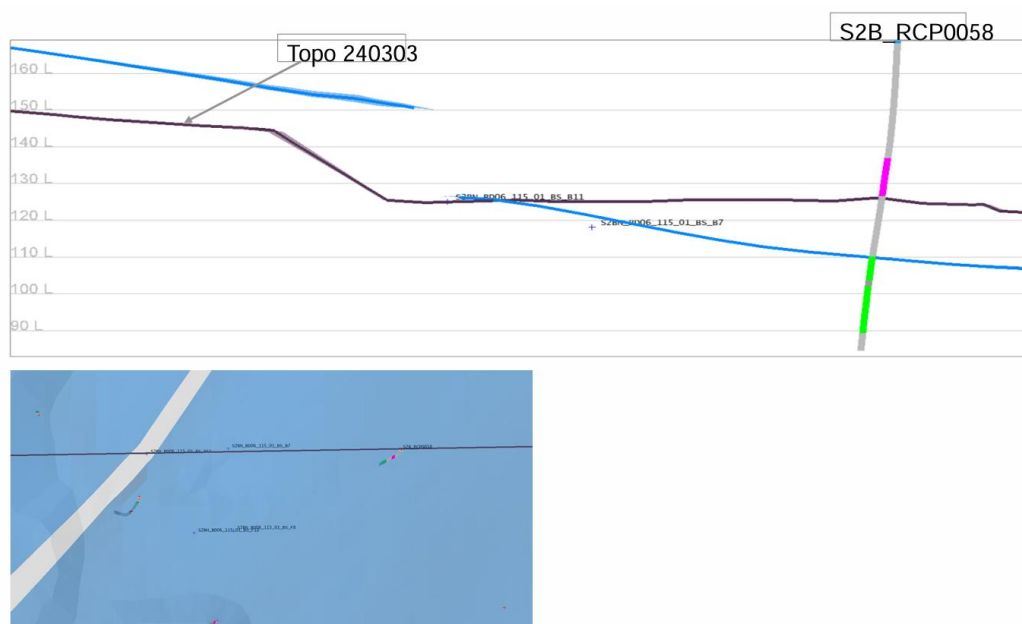


Figura 15: Corte A1 (Fonte: Autor, 2024)

Corte em que é possível observar claramente a descida do muro devido a uma falha não prevista no modelo.

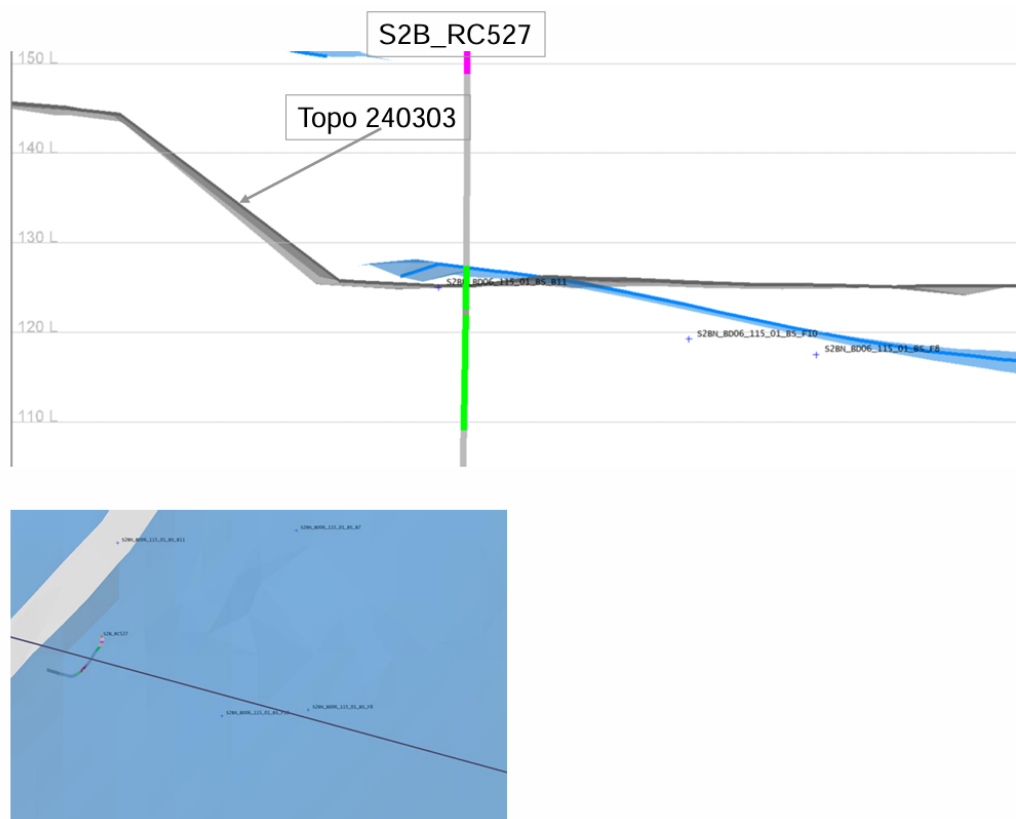


Figura 16: Corte A2 (Fonte: Autor, 2024)

Corte em que é possível observar a diferença das cotas da camada Bnl_Sr na mina e no modelo.

5.2.2. Camada Bnu_Sf

Os *grids* do topo e base da camada Bananeira *Upper* foram desenvolvidos com base em uma extensa campanha de sondagem. Esse modelo previa a presença de zonas de minério de carvão em uma formação geológica específica. Após a implementação do modelo, a mina conseguiu identificar e explorar com sucesso áreas com existência de carvão, confirmando a precisão do modelo em reflectir as características reais do depósito mineral (tabela 4). Mas mesmo sendo esse o caso houve locais em que a disparidade entre o modelo e a realidade na mina (S2BN_BE07_140_D5) foram extremos e isto deveu-se provavelmente a presença de formações tectónicas (falhas) na camada Bnu_Sf. Já é um facto que a presença de intrusões e deformações dificultam a previsão correcta da realidade, para casos desses, é necessário mais trabalho de sondagem e de mapeamento de formações geológicas e tectónicas.

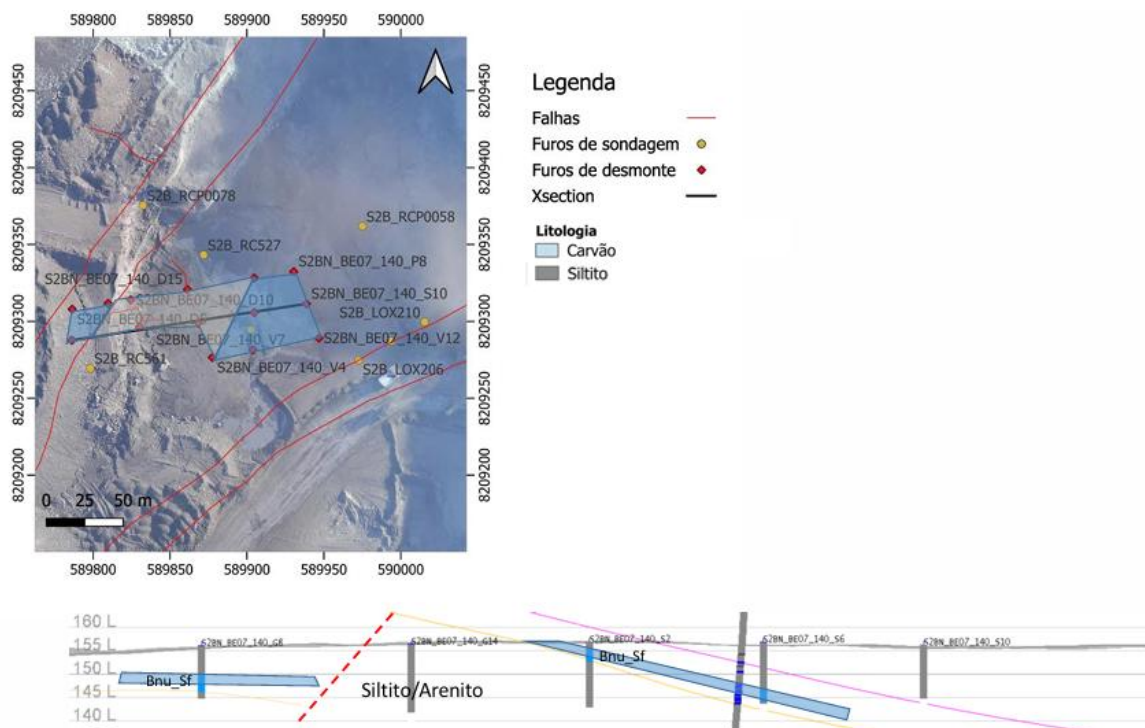


Figura 17: Corte da camada Bnu_Sf (Fonte: Autor, 2024)

Tabela 3: Aderência do modelo geológico na camada Bnu_Sf

ID	X	Y	Z_min a	Z_model o	Z_dif	Aderênc ia
S2BN_BE07_140_V4	589877.5 52	8209276.4 96	153.38 7	149.1631 57	4.22384 3	Má
S2BN_BE07_140_G8	589786.2 57	8209287.7 31	149.97 4	149.974	0	Boa
S2BN_BE07_140_D5	589786.4 22	8209307.9 07	150.08 7	207.3832 74	- 57.2962 74	Má
S2BN_BE07_140_D15	589861.3 64	8209320.7 81	156.76 9	155.6495 23	1.11947 7	Neutra
S2BN_BE07_140_P5	589904.8 19	8209328.1 46	146.19 3	141.2035 63	4.98943 7	Má
S2BN_BE07_140_S2	589868.3 32	8209298.9 72	155.22 6	152.7798 96	2.44610 4	Neutra
S2BN_BE07_140_S6	589904.8 92	8209305.6 88	146.91 6	142.3066 08	4.60939 2	Má
S2BN_BE07_140_V7	589903.9 04	8209281.4 24	147.50 9	143.0750 05	4.43399 5	Má

Fonte: Autor, 2024

Através de cortes transversais (figura 17 e 18) feitos usando os furos de sondagem foi possível confirmar a legitimidade dos resultados, tendo a camada Bnu_Sf na mina representada pela cor cinzenta e a no modelo pela cor verde.



Figura 18: Corte B1 (Fonte: Autor, 2024)

Corte transversal em que é possível observar o falhamento e inclinação da camada Bnu_Sf na mina e no modelo.

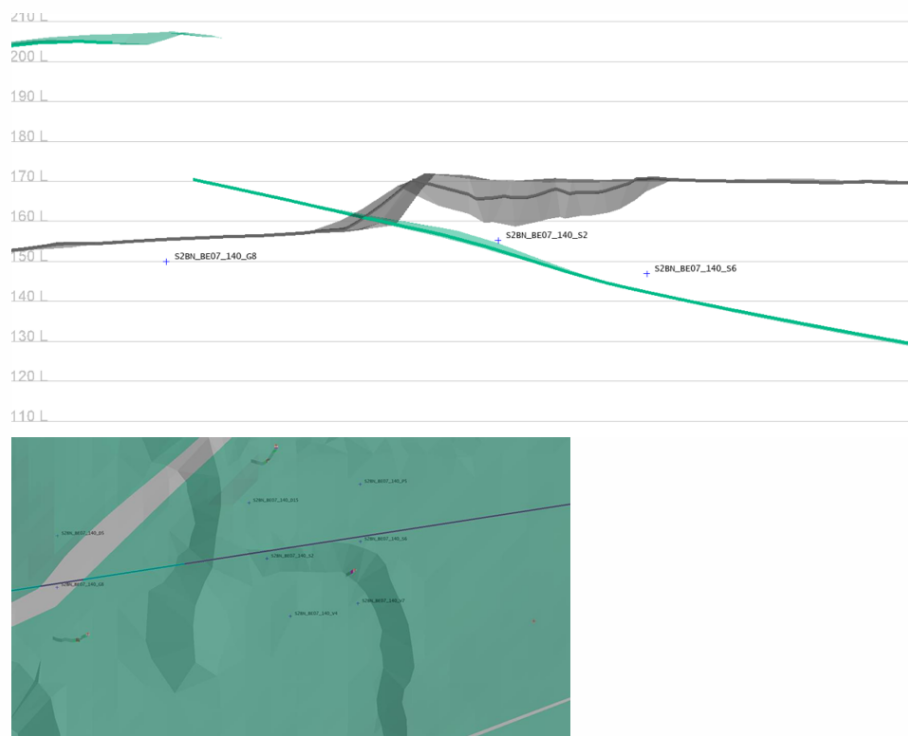


Figura 19: Corte B2 (Fonte: Autor, 2024)

Corte transversal em que é possível observar a inclinação da camada Bnu_sf na mina e no modelo.

5.2.3. Camada Bnu_Sr

No caso do perfil do topo da camada Bananeira *Upper* a boa aderência do modelo geológico (tabela 5) foi atribuída à utilização de dados de alta qualidade e à aplicação de técnicas avançadas de modelagem. Houve também a previsão correcta de falhas (figura 19) que muitas das vezes possibilitam a tomada de decisões para melhor mineração e consequentemente rentabilidade. Isso ressalta a importância de investir em colecta de dados precisa e na adoção de metodologias robustas para construir modelos geológicos mais confiáveis.

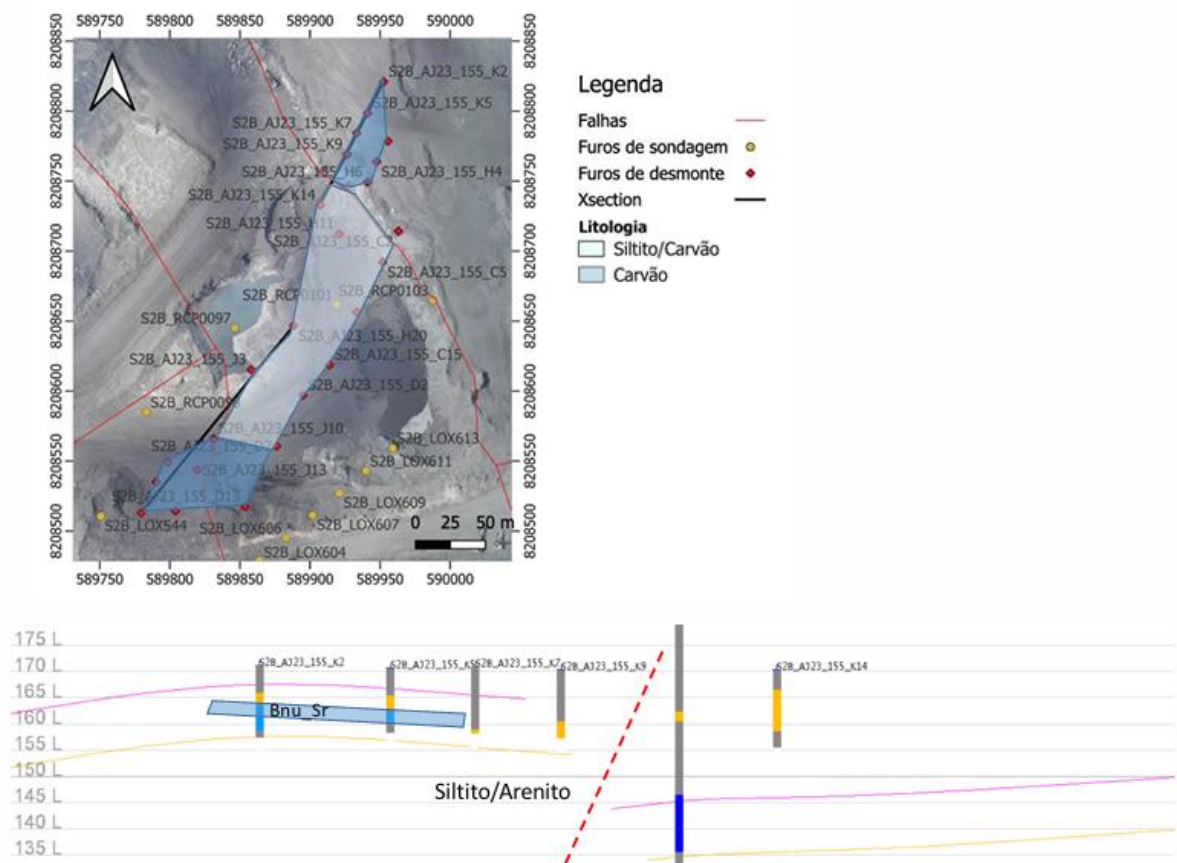


Figura 20: Corte da camada Bnu_Sr (Fonte: Autor, 2024)

Tabela 4: Aderência do modelo geológico na camada Bnu-Sr

ID	X	Y	Z_min a	Z_model o	Z_dif	Aderên cia
S2B_AJ23_155_H2	589955.7 38	8208778.5 51	161.47 6	164.2833 65	- 2.80736 5	Neutra
S2B_AJ23_155_K2	589952.6 57	8208820.8 54	163.71 4	167.4647 28	- 3.75072 8	Má
S2B_AJ23_155_K5	589941.2 98	8208798.5 34	162.85 8	166.7142 03	- 3.85620 3	Má
S2B_AJ23_155_J10	589831.4 57	8208565.9 7	167.19 7	158.8729 52	8.32404 8	Má
S2B_AJ23_155_J13	589819.5 65	8208543.6 94	161.01 1	160.4628 93	0.54810 7	Boa
S2B_AJ23_155_M8	589779.5 08	8208512.9 32	162.86 3	163.1117	-0.2487	Boa
S2B_AJ23_155_M3	589798.5 3	8208549.1 38	163.51 6	163.5619 25	- 0.04592 5	Boa

S2B_AJ23_155_M5	589790.1 98	8208535.0 62	163.13 5	163.6885 48	- 0.55354 8	Boa
S2B_AJ23_155_J17	589804.0 36	8208514.4 08	160.76 2	161.0106 63	- 0.24866 3	Boa
S2B_BI11_140_B7	589912.8 97	8208568.4 93	146.26 9	147.7608 25	- 1.49182 5	Boa
S2B_BI11_140_B12	589932.0 29	8208606.8 74	143.59 1	144.0883 45	- 0.49734 5	Boa
S2B_BI11_140_E7	589886.5 72	8208566.4 32	148.91 3	150.5056 4	-1.59264	Neutra
S2B_BI11_140_E12	589905.1 81	8208606.2 22	147.02 3	147.3697 49	- 0.34674 9	Boa
S2B_BI11_140_D14	589921.8 2	8208622.0 38	145.35 2	144.9349 89	0.41701 1	Boa
S2B_BI11_140_B5	589905.5 76	8208551.4 31	148.83 1	149.0014 02	- 0.17040 2	Boa
S2B_BI11_140_B14	589939.1 14	8208622.5 39	143.12 9	142.8503 8	0.27862	Boa
S2B_BI11_140_E5	589879.6 93	8208549.3 19	150.53 9	151.1225 12	- 0.58351 2	Boa

Fonte: Autor, 2024

Em certos furos não foi possível encontrar carvão, mesmo encontrando-se nas mesmas cotas topográficas e a menos de 25m dos furos que apresentavam carvão, isto deveu-se a presença de falhas geológicas ou a uma perturbação externa no evento deposicional no passado, que provavelmente terá sido interrompido ou causado a não deposição de matéria orgânica naquela área ou em várias outras áreas.

Através de cortes transversais (figura 20 e 21) feitos usando os furos de sondagem foi possível verificar os resultados, tendo a camada Bnu_Sr na mina representada pela cor cinzenta e a no modelo pela cor verde-claro.

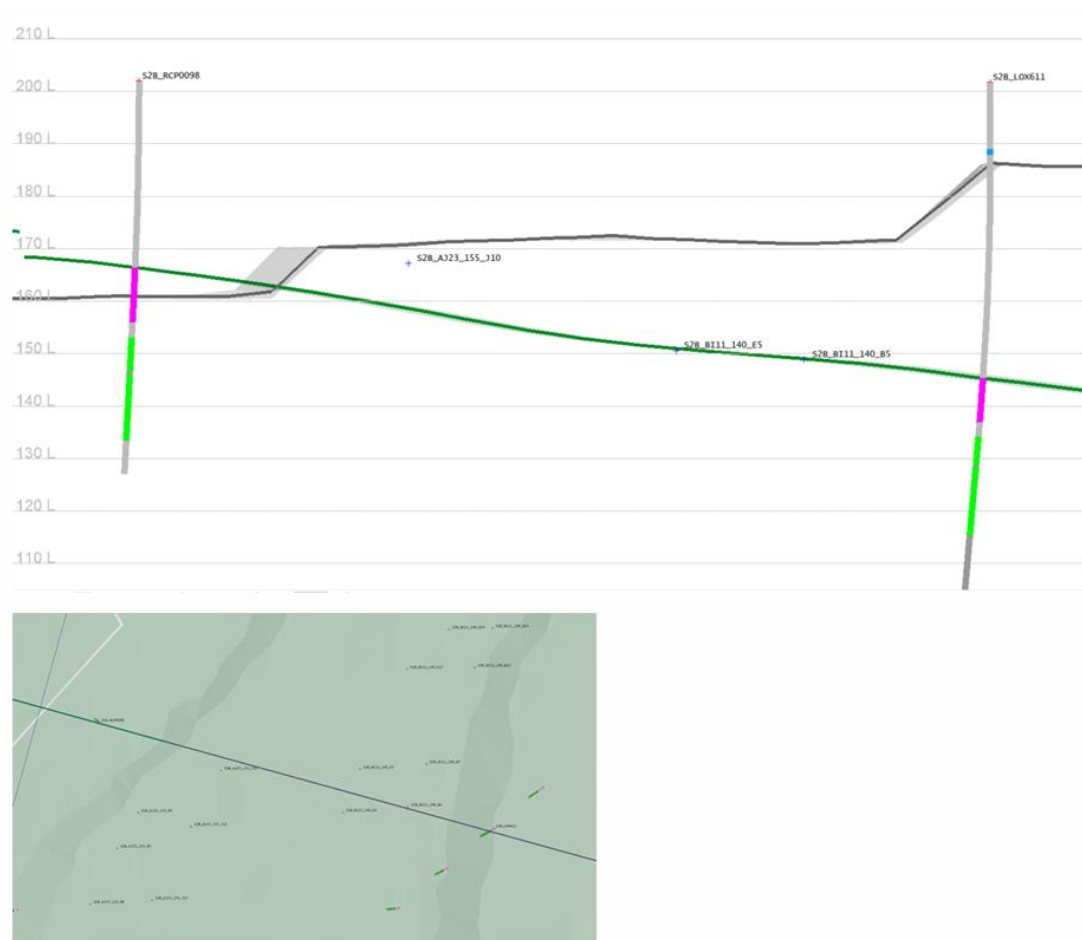


Figura 21: Corte C1 (Fonte: Autor, 2024)

Corte transversal em que é possível observar da discrepância da camada Bnu_sr no modelo e na mina.

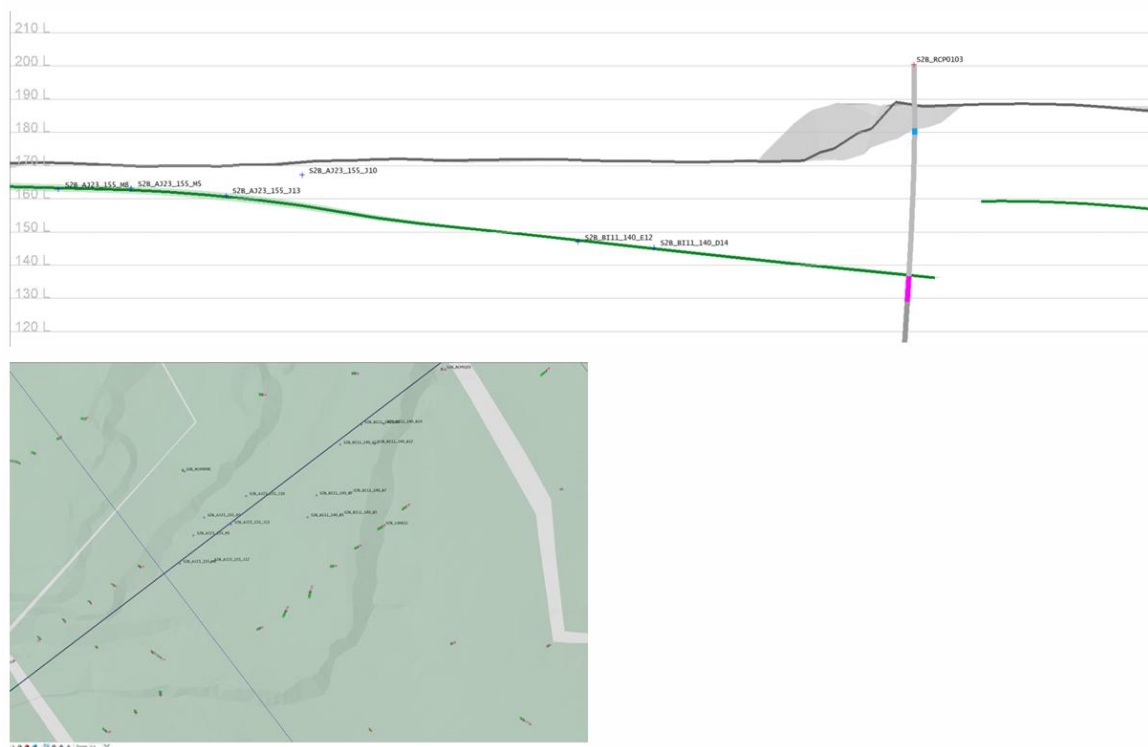


Figura 22: Corte C2 (Fonte: Autor, 2024)

Corte transversal em que é possível observar da discrepância da camada Bnu_sr no modelo e na mina mais também da interpretação correcta da falha.

5.2.4. Camada Gf_Sf

O *grid* da base da camada Grande Falésia foi desenvolvido com base em dados históricos de sondagem e interpretações geológicas (figura 22). O modelo previa a presença de camadas de carvão de espessura uniforme em toda a área da mina. No entanto, após a implementação do modelo, foi verificado que a distribuição do carvão era altamente irregular, com variações significativas na espessura e na qualidade do carvão em diferentes partes da mina.

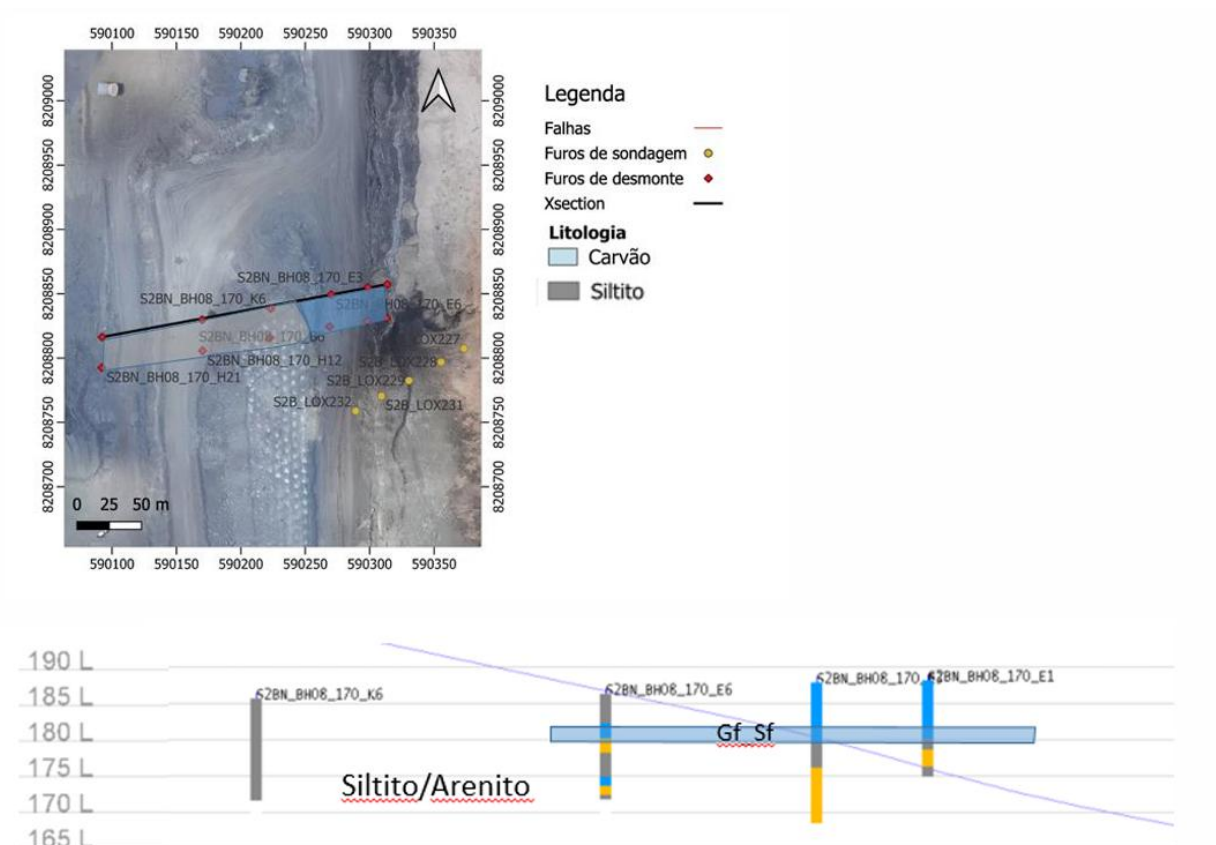


Figura 23: Corte da camada Gf_Sf (Fonte: Autor, 2024)

A má aderência do modelo (tabela 6) ressalta os riscos de confiar cegamente em modelos geológicos simplificados ou mal actualizados. Isso destaca a importância de validar e reactualizar constantemente os modelos com dados adicionais e observações de campo, especialmente em ambientes geológicos complexos.

Tabela 5: Aderência do modelo geológico na camada Gf-Sf

ID	X	Y	Z_min a	Z_model o	Z_dif	Aderênci a
S2BN_BH08_170_E1	590313,76	8208857,4	180,336	176,06287	4.27313	Má
S2BN_BH08_170_E6	590270,14	8208849,3	173,716	186,71429	-12.99829	Má
S2BN_BH08_170_B3	590298,01	8208828,7	176,167	182,70639	-6.539392	Má
S2BN_BH08_170_B1	590313,59	8208830,9	176,595	178,13094	-1.535936	Neutra
S2BN_BH08_170_E3	590298,66	8208855	179,583	180,23892	-0.655918	Boa

Fonte: Autor, 2024

Recorrendo-se aos furos de sondagem, através dos cortes transversais (figura 23 e 24) na aplicação Vulcan, foi possível ver a discrepância entre a topografia da camada Gf_Sr na mina (destacada pela cor cinzenta) e a do modelo (destacada pela cor azul-claro) confirmando-se assim a má aderência do modelo.

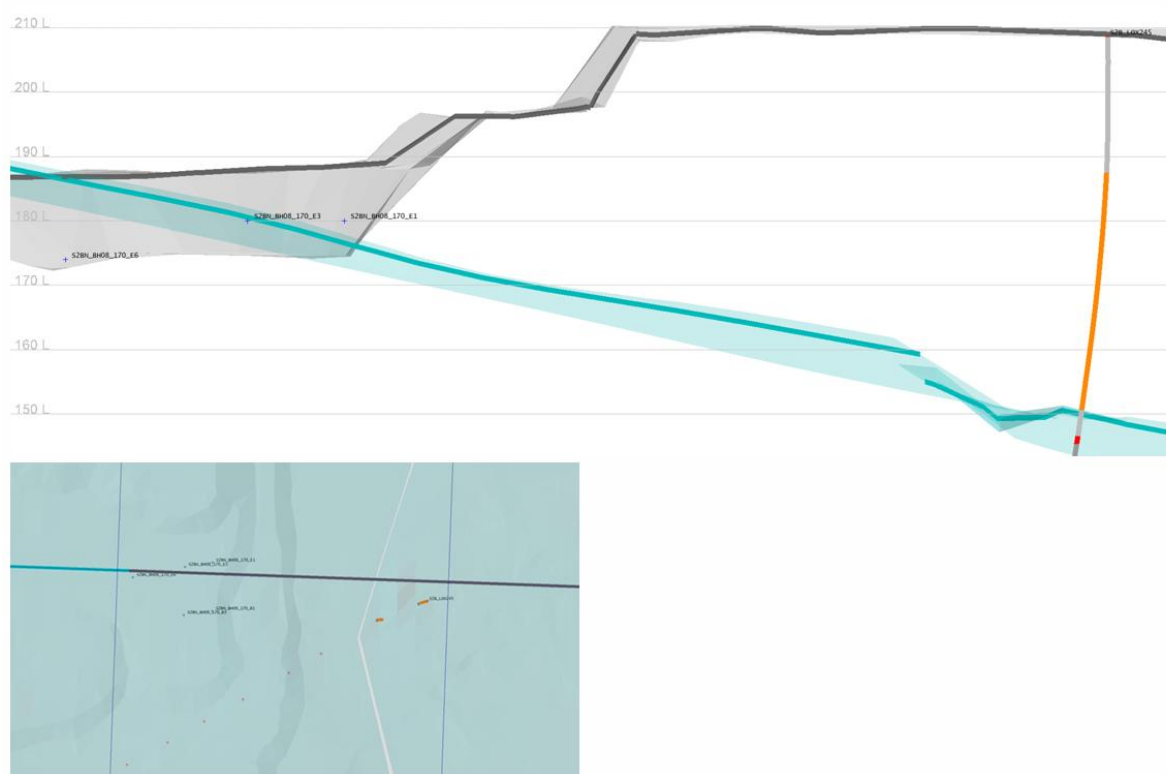


Figura 24: Corte D1 (Fonte: Autor, 2024)

Corte transversal mostrando a inclinação da camada GF_Sf na mina e no modelo.

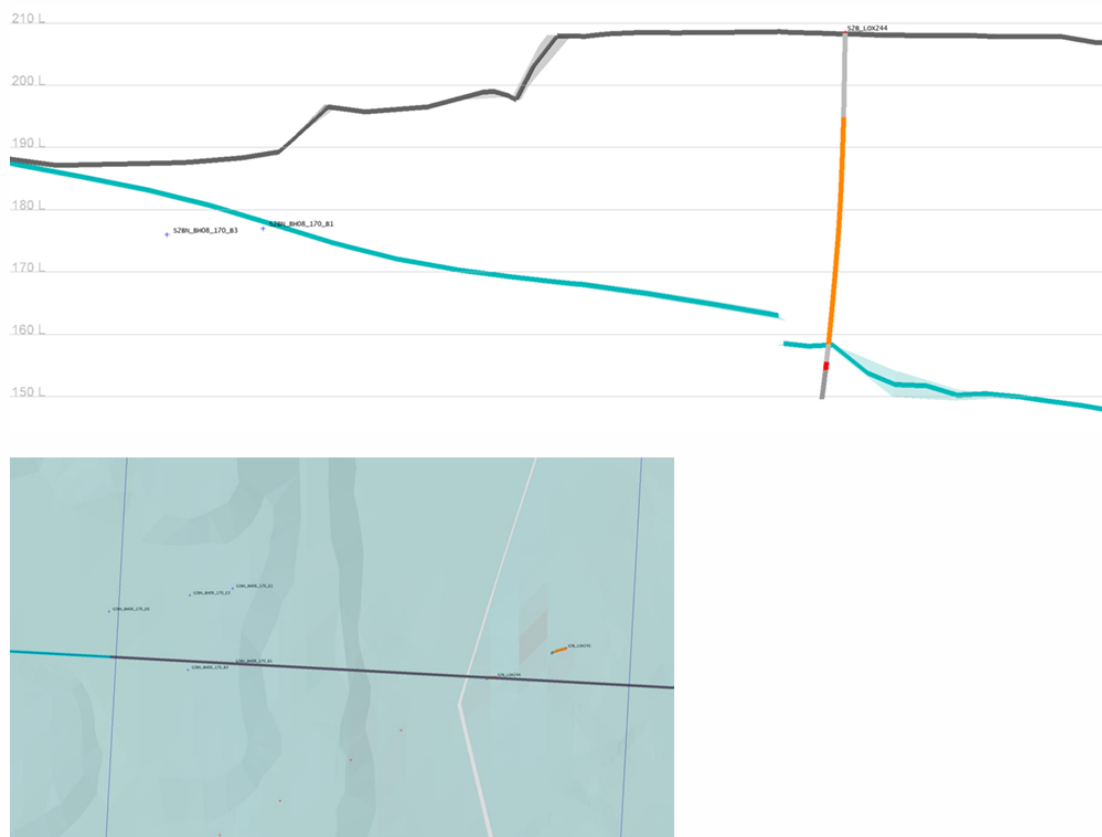


Figura 25: Corte D2 (Fonte: Autor, 2024)

Corte transversal mostrando a subida da camada Gf_Sf em formas de bancadas na mina e a descida no modelo.

CAPÍTULO VI: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusões

O presente relatório teve como objectivo principal Analisar o nível de aderência dos modelos geológicos da Vulcan na secção 2B. O estudo procurou evidenciar a veracidade dos dados gerados pelos modelos usados na secção 2B da mina carvão Moatize da Vulcan.

Os objectivos específicos foram alcançados com sucesso, destacando-se o estudo da aderência dos dados gerados e usados no modelamento geológico na secção 2B, constatando-se diferentes níveis de aderência nas camadas estudadas, onde a Bnl_Sr apresenta uma aderência neutra variando de -3.257908 a 0; diferente da camada Bnu_Sf que apresenta uma má aderência que varia de -57.296274 a 4.989437; Bnu_Sr que de acordo com as previsões apresenta uma boa aderência no intervalo de -0.2487 a 0.548107; e por fim Gf_Sf apresenta uma má aderência variando de -12.99829 a 4.27313. Em resposta a essa conclusão foi possível confirmar que houve mais discrepância entre o modelo e a realidade do que ocorrência de acertos.

Face a avaliação dos impactos do nível da aderência na lavra ficou evidente que os mesmos enquadram-se na categoria económica, produtiva e operacional, tais como:

1. **Desperdício de recursos:** desvio do plano pode resultar em uso ineficiente de mão-de-obra, equipamentos e outros recursos.
2. **Redução da produção:** desvios frequentes podem causar atrasos e reduzir a quantidade de minério extraído.
3. **Aumento de custos:** a necessidade de ajustes constantes e correções pode aumentar os custos operacionais.
4. **Riscos operacionais:** a falta de aderência pode aumentar a probabilidade de acidentes e problemas operacionais.

A problematização da pesquisa, no que se refere a veracidade do modelo geológico utilizado na secção 2B na mina carvão Moatize na Vulcan, foi abordada de maneira eficaz, evidenciando mais erros que acertos no modelo.

Em cenários de boa aderência, o modelo geológico foi capaz de reproduzir com precisão as características e comportamentos do sistema geológico em estudo. Isso implica que o modelo é capaz de representar fielmente a distribuição espacial e as propriedades dos estratos rochosos, falhas, dobras e outras estruturas geológicas relevantes. O modelo geológico usado para prever

a distribuição de depósitos minerais em uma região específica pode ser considerado de boa aderência se suas previsões forem consistentes com as observações de campo e os dados geofísicos disponíveis. A boa aderência indica uma compreensão robusta dos processos geológicos subjacentes e aumenta a confiança nas decisões tomadas com base nas previsões do modelo.

Em contraste, locais com aderência neutra sugerem que o modelo geológico é capaz de capturar algumas características do sistema geológico, mas com limitada precisão ou confiabilidade. Isso pode ser devido a várias razões, como a simplificação excessiva dos processos geológicos, falta de dados de entrada adequados ou complexidades não consideradas no modelo. Por exemplo, um modelo geológico que reproduz com precisão a estratigrafia geral de uma área, mas falha em capturar a distribuição de pequenas falhas ou variações litológicas, pode ser considerado como tendo aderência neutra. Embora o modelo forneça alguma orientação, sua capacidade de previsão pode ser limitada em cenários mais complexos ou em áreas onde há variação significativa nos dados.

Por fim, nas partes do modelo geológico com má aderência não se conseguiu representar adequadamente as características do depósito em estudo. Isso pode resultar em previsões imprecisas, inconsistências com as observações de campo ou interpretações pouco confiáveis dos processos geológicos. Por exemplo, um modelo geológico que não prevê a presença de uma falha importante em uma área conhecida por sua actividade tectônica significativa pode ser considerado como tendo má aderência. A má aderência geralmente indica uma compreensão inadequada dos processos geológicos relevantes ou limitações significativas no conjunto de dados utilizado para desenvolver o modelo.

A avaliação da aderência de modelos geológicos é crucial para garantir sua utilidade e confiabilidade em várias aplicações. Por meio da análise de casos de boa aderência, aderência neutra e má aderência, podemos entender melhor as limitações e os desafios associados à modelagem geológica e desenvolver estratégias para melhorar a precisão e a confiabilidade dos modelos. Essa compreensão aprimorada é essencial para orientar decisões informadas em questões relacionadas à gestão de recursos naturais, planejamento urbano, mitigação de riscos geotécnicos e muito mais.

Em suma, a questão de até que ponto o modelo geológico reflecte fielmente as características reais do depósito de carvão mineral é complexa e multifacetada. Embora os avanços tecnológicos estejam melhorando a precisão dos modelos geológicos, ainda há desafios

significativos a serem superados. Uma abordagem multidisciplinar, que reconheça a incerteza inerente à geologia, é essencial para uma exploração mineral eficaz e sustentável.

6.2.Recomendações

Com base na revisão da literatura e nas análises práticas, são propostas as seguintes estratégias para melhorar a confiabilidade dos modelos geológicos na secção 2B da mina de carvão Moatize.

- Amostragem estratégica: aumentar a densidade e a representatividade das amostras colectadas para uma caracterização mais precisa do depósito de carvão;
- Integração de dados multi-fonte: incorporar dados de diferentes fontes, como dados geofísicos e de sensoriamento remoto, para uma compreensão mais abrangente da geologia local.

Pesquisas recentes destacam avanços na integração de dados geofísicos e geológicos para aumentar a aderência dos modelos. Por exemplo:

- Garcia et al. (2023) examinam a aplicação de algoritmos de aprendizado profundo para fundir dados de campo e imagens sísmicas.
- Brown et al. (2019) discutem os benefícios de simulações computacionais que incorporam variáveis dinâmicas, como pressão e temperatura.

Esses estudos ilustram a importância de abordagens integrativas e multidisciplinares para melhorar a aderência e a usabilidade dos modelos.

- Modelagem conceitual adequada: desenvolver modelos geológicos que capturem adequadamente a complexidade geológica, levando em consideração a estratigrafia, a estrutura e a petrologia.

Actualizar regulamente os mapas geológicos para garantir que reflectam com precisão a realidade do terreno.

Investir mais em programas de colecta de dados mais abrangentes e de maior resolução, a fim de melhorar a precisão dos modelos geológicos.

Tecnologia e inovação, como sensoriamento remoto, geofísica de alta resolução e modelagem geológica 3D, estão melhorando a precisão dos modelos geológicos. Essas ferramentas permitem uma caracterização mais detalhada do depósito mineral e ajudam a reduzir a incerteza associada ao modelo geológico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALRAWASHDEH, R. Open-Pit Mining: Methods and Impacts. In: SINGH, U. K. (ed.). Mining and the Environment: Case Studies from the Americas. Springer, 2021. p. 45–68.
- Brown, T., Smith, J. (2019). Advances in Geological Modelling Techniques. Geological Journal, 45(3), pp. 123-140.
- BROWN, T. (2021). *Lithological Consistency in Geological Models*. International Journal of Earth Sciences.
- BRYERS, R. W. Coal Properties, Composition, and Combustion. In: BRYERS, R. W. Fireside Ash Deposition in Coal-Fired Boilers. Washington, D.C.: Hemisphere Publishing Corporation, 1998. p. 1–45.
- C25 IAEG Commission. Diretrizes para o Desenvolvimento e Aplicação de Modelos Geológico-Geotécnicos. Tradução oficial pela ABGE. International Association for Engineering Geology and the Environment, 2015.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. (2014). *Cartografia Geológica e Temática*. Brasília: CPRM.
- COWAN et al., 2003. Modelagem geológica explícita: métodos e aplicações.
- DAMASCENO C.S.R., 2008. Modelagem geológica e geomecânica 3D: uma abordagem prática.
- FERNANDES, J. L. (2018). *Caracterização geológico-estrutural da região carbonífera de Moatize – Moçambique*. Tese de Doutorado, Universidade de Coimbra.
- FLORES, R. M.: 2014, Coal and Coalbed Gas: Fueling the Future; Elsevier.
- Garcia, P., Liu, R. (2023). Integrating Geological and Geophysical Data for Improved Model Adherence. Earth Science Reports, 58(7), pp. 87-110.
- GLASSMAN, I.; YETTER, R. A. Combustion. 4th ed. San Diego: Academic Press, 2008. 774 p.
- GTK Consortium. Geological Surveys in Mozambique 2002–2007. Edited by Yrjö Pekkala, Tapio Lehto & Hannu Mäkitie. Espoo: Geological Survey of Finland, Special Paper 48, 2008. 321 p.
- GTK Consortium. Relatório Final do Projeto de Mapeamento Geológico e de Recursos Minerais de Moçambique – Fase 1: Área de Moatize. Ministério dos Recursos Minerais e Energia de Moçambique, 2016.

HARITMANN, T. H., 2017, Estudo da influência da matéria mineral na combustão de carvões em um forno de queda livre. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Hartman, H. L., & Mutmanský, J. M. (2002). Surface Mining Mechanical Extraction Methods. Em *Introductory Mining Engineering* (Vol. 2º, pp. 197-208).

<https://www.biofund.org.mz/wp-content/uploads/2018/12/1545041860-F2247.Carvoes> Da Bacia Carbonífera De Moatize V.1.Pdf

JOHNSON, R. (2020). *Advances in Geophysical Data Integration*. Journal of Geosciences.

KOPPE, J. C. et al. Estimativa de qualidade de carvão por meio de perfilagem geofísica de gama natural e resistividade. *Revista Escola de Minas*. Vol. 64, nº 4.

OLIVEIRA, 2017. Modelos geológicos: fundamentos e aplicações.

MAE – Ministério da Administração Estatal. (2014). Perfil do Distrito de Moatize: Província de Tete. Moçambique: MAE.

LISBOA, L. C.; SANTOS, R. M.; OLIVEIRA, D. (2016). Modelagem geológica tridimensional aplicada à mineração de carvão. *Revista Brasileira de Geociências*, 46(2), 215-230.

REAL, A. Geologia da região carbonífera de Moatize, Província de Tete – Moçambique. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal, 1978.

REAL, Fernando. Geologia da bacia do rio Zambeze, Moçambique: características geológico-mineiras da bacia do rio Zambeze, em território moçambicano. Lisboa: Junta de Investigações do Ultramar, 1966. 183 p

SILVA, M. A.; GOMES, C. A.; NASCIMENTO, R. S. (2012). Aplicações do mapeamento geológico-estrutural na mineração. *Geologia USP. Série Científica*, 12(1), 45-58.

SMITH, J., et al. (2022). *Geological Modeling and Structural Analysis*. Geological Society Publications.

SOUZA, J. M.; ALMEIDA, M. C. (2010). Influência das falhas na lavra a céu aberto em depósitos de carvão. *Rem: Revista Escola de Minas*, 63(1), 123-130.

TOLMASQUIM, M. T.; 2016, Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear, EPE; Rio de Janeiro.

VASCONCELOS, Lopo A. F. T. S. de., 1995, Contribuição para o conhecimento dos

carvoss da Bacia Carbonífera de Moatize, Província de Tete, República de Moçambique. Tese de Doutorado Faculdade de Ciências da universidade do Porto.

VASCONCELOS, Lopo et al., 2009, Elementos-traço em cinzas de carves aflorantes de Moçambique. *Geochimica Brasiliensis*, p 344-361.

VASCONCELOS, L., 2005, Geologia do carvão, UEM Editora. Universidade Eduardo Mondlane, Departamento de Geologia.

VASCONCELOS, L. F. T. de S. (1995). *Contribuição para o conhecimento dos carvões da Bacia Carbonífera de Moatize, Província de Tete, República de Moçambique*. (Vol. 1).