

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**GIOVANNI ARGENTA PASETTO**

**MODELAGEM GEOLÓGICA 3D UTILIZANDO AEROFOTOGRAMETRIA COM  
VANT EM MINA DE MÁRMORE NO MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA DO SUL – RS**

**Caçapava do Sul  
2018**

**GIOVANNI ARGENTA PASETTO**

**MODELAGEM GEOLÓGICA 3D UTILIZANDO AEROFOTOGRAMETRIA COM  
VANT EM MINA DE MÁRMORE NO MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA DO SUL – RS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao curso de Geologia da  
Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do título  
de bacharel em Geologia

Orientador: Prof. Dr. Ítalo Gomes  
Gonçalves

Coorientador: Prof. Dr. Felipe Guadagnin

**Caçapava do Sul  
2018**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

P277m Pasetto, Giovanni

MODELAGEM GEOLÓGICA 3DUTILIZANDO AEROFOTOGRAMETRIA COM  
VANT EM MINA DE MÁRMORE NO MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA DO SUL -  
RS. / Giovanni Pasetto.

56 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)--  
Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2018.

"Orientação: Ítalo Gonçalves".

1. Geologia. 2. Modelos Virtuais de Afloramento. 3.  
Aprendizagem de Máquina. 4. Fotogrametria Digital.  
5.Mineração. I. Título.

**GIOVANNI ARGENTA PASETTO**

**MODELAGEM GEOLÓGICA 3D UTILIZANDO AEROFOTOGRAMETRIA COM  
VANT EM MINA DE MÁRMORE NO MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA DO SUL – RS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao curso de Geologia da  
Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do título  
de bacharel em Geologia

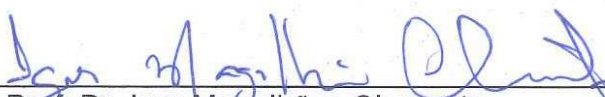
Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 12 de dezembro de 2018

Banca examinadora:



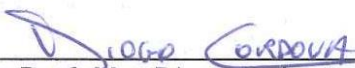
---

Prof. Dr. Italo Gomes Gonçalves  
Orientador  
UNIPAMPA



---

Prof. Dr. Igor Magalhães Clemente  
UNIPAMPA



---

Prof. Me. Diogo Peixoto Cordova  
UNIPAMPA

À minha família e aos meus amigos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha família, à minha mãe Srta. Maria Tereza Argenta, ao meu pai Sr. Álvaro Antônio Pasetto e ao meu irmão Riccardo Argenta Pasetto pois foram, são e sempre serão a base de tudo. Obrigado.

Agradeço imensamente a honra de ter tido como orientador o Prof. Dr. Ítalo Gomes Gonçalves e como coorientador o Prof. Dr. Felipe Guadagnin. Muito obrigado, Senhores, pela confiança, paciência e apoio dedicados a mim nessa jornada.

Agradeço também ao grupo Dagoberto Barcellos S/A pela oportunidade que me foi dada. Em especial ao amigo, Evandro Gomes dos Santos, pela parceria ao longo dos meses de estágio. Obrigado.

Aos colegas que estiveram comigo durante o curso e, principalmente, aos que fizeram essa etapa da minha vida muito mais alegre, o meu muito obrigado.

Às amizades que construí nesses quase cinco anos, meu muito obrigado.

"Não vemos as coisas como elas são,  
mas como nós somos."

Anaïs Nin

## RESUMO

O aumento da demanda por bem minerais, tem exigido das mineradoras o desenvolvimento de novas formas de exploração desses recursos. A razão estéril minério, que consiste na proporção de minério em relação as rochas que não são mineralizadas, determina a viabilidade econômica de um empreendimento mineiro. O aumento da razão estéril minério implica na redução da lucratividade e/ou na vida útil de uma mina. A modelagem geológica é uma ferramenta indispensável para o planejamento mineiro. Porém, a construção de modelos geológicos exige tempo e planejamento específico, podendo gerar custos elevados. Em uma mina, muitas vezes as rochas estão localizadas em zonas inacessíveis ou de alto risco geológico. O uso de modelos tridimensionais fotorrealistas permite classificar remotamente as rochas que ocorrem em uma mina, reduzindo os riscos inerentes as atividades e aumentando a qualidade da modelagem geológica. Este trabalho buscou a aplicação de metodologia inovadora para a geração de modelo geológico tridimensional de mina de mármore utilizando classificação litológica com base em dados de sensoriamento remoto. Foram utilizados Veículos Aéreos Não-Tripulados para obtenção de fotografias aéreas, que foram integradas por meio de fotogrametria digital para a construção de modelos tridimensionais fotorrealistas da mina. Os modelos tridimensionais fotorrealistas, denominados de modelos virtuais de afloramento, são compostos por (i) milhões de pontos georreferenciados contendo informação de cor e vetor normal (nuvem de pontos), e (ii) superfície triangulada texturizada. As principais litologias que ocorrem na mina foram classificadas na nuvem de pontos e as principais estruturas expostas foram interpretadas virtualmente na superfície triangulada texturizada. Os dados derivados dos modelos virtuais de afloramento foram processados utilizando algoritmo livre (*open-source*) baseado em aprendizagem de máquina. O resultado deste trabalho consiste em modelo de blocos tridimensional que leva em conta as principais litologias presentes na mina. A partir do modelo de blocos foi possível prever a organização geológica em até 100 metros na horizontal e 30 metros na vertical a partir da superfície do terreno, suficiente para orientar o planejamento da lavra por pelo menos dois anos.

Palavras-Chave: geologia, modelo virtual de afloramento, aprendizagem de máquina, fotogrametria digital, sensoriamento remoto, mineração.



## ABSTRACT

The increase in the demand for mineral goods has been demanding from mining companies the development of new methods for the exploration of these resources. The stripping ratio, or waste/ore ratio, determines the economic viability of a mining enterprise. The increase in stripping ratio implies the reduction of profits and/or the life of the mine. Geological modeling is an indispensable tool for mine planning. However, the construction of geological models requires time, planning, and expenditures. In a mine, often the rocks are located in inaccessible or hazardous areas. The use of photorealistic tridimensional models allows the remote classification of rocks occurring in a mine site, reducing the inherent risks and improving model quality. This work sought to apply an innovative methodology for the generation of a 3D geological model in a marble quarry, using a lithological classification based on remote sensing data. Unmanned aerial vehicles were employed for acquisition of aerial photographs, which were integrated by means of digital photogrammetry for the construction of 3D surface models. These models, denominated as virtual outcrop models, are composed of (i) millions of georeferenced points containing color and normal vector information (point clouds), and (ii) triangulated surface wireframes. The main lithologies occurring in the quarry were classified in the point cloud and the main exposed structures were interpreted virtually in the wireframe mesh. The data derived from the virtual outcrop models were processed with an open source machine learning algorithm. The result consists in a 3D lithological block model. From this block model it was possible infer the geological assembly up to 100 meters horizontally and 30 meters vertically from the terrain surface, which is enough to guide mine planning for at least two years.

Keywords: geology, virtual outcrop model, machine learning, digital photogrammetry, remote sensing, mining.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Mapa de localização da área de estudo: a) são mostradas as principais rodovias que permitem acesso à área de estudo (BR-290 e BR-392); b) mapa geológico sobreposto à imagem de satélite, mostrando a área de estudo em relação à área urbana do município de Caçapava do Sul, RS.....20
- Figura 2** - Mapa geológico da região de Caçapava do Sul. Ao centro, o Complexo Granítico Caçapava do Sul, bordado pelo Complexo Metamórfico Passo Feio.....22
- Figura 3** – Os diversos tipos de rochas ocorrentes na Mina Mangueirão: a) diques e *sills* de diabásio intrudindo o mármore; (b) bancada recentemente desmontada, composta por rochas metapelíticas de coloração cinza escuro; c) anfibolitos intercalados ao mármore; d) contato entre rochas graníticas e mármore.....24
- Figura 4** - Os modelos implícitos 3D são construídos usando isosuperfícies (c) que são derivadas de um campo escalar (b). Este campo escalar é definido pela interpolação espacial de pontos, linhas e dados de medição estrutural (a). Estes últimos influenciam o gradiente do campo escalar e controlam a forma e orientação da isosuperfície associada.....26
- Figura 5** – Princípio da sobreposição de imagens aéreas para análise fotogramétrica.....27
- Figura 6** - Esquema mostrando os parâmetros envolvidos na visão estereoscópica. Quando um ponto P é fotografado de duas câmeras C1 e C2, a posição de P nas duas fotos (Pc1 e Pc2) depende da posição das duas câmeras, da distância focal e da orientação, que é definida por 4 parâmetros (o vetor  $i, j, k$  e o ângulo  $\alpha$  definindo a quantidade de rotação em torno do eixo  $i, j, k$ ).....29
- Figura 7** - *Strike* S, mergulho verdadeiro  $\delta$  (delta), mergulho aparente  $\alpha$  (alfa) e rolamento estrutural  $\beta$  (beta).....31
- Figura 8** - Medições com uma bússola Brunton: (a) *strike*; (b) mergulho.....32
- Figura 9** - Largura do afloramento: (a) varia com a espessura; (b) varia com o mergulho.....33
- Figura 10** - A confiabilidade da orientação medida a partir de um traço no afloramento depende da distribuição de seus nós no espaço. Um traço cujos 'nós' estão distribuídos uniformemente em torno de seu centro de massa (a) fornecerá uma medida de orientação mais confiável do que um traço com mais 'nós' colineares (b). Mesmo que as orientações dos vetores em (b) sejam amplamente distribuídas (acima de  $180^\circ$ ), os vetores mais longos pesam mais que os mais curtos, gerando uma distribuição de agrupamentos.....35
- Figura 11** – Interface do *software* UgCS, utilizado no planejamento dos voos para aquisição das fotografias aéreas.....37
- Figura 12** – Aquisição de aerofotografias utilizando Drone Dji Phantom 4 PRO.....38
- Figura 13** – Fluxo de trabalho para geração dos MVA: a) alinhamento das câmeras e geração da nuvem esparsa de pontos; b) Densificação da nuvem de pontos; c) Geração da malha triangulada; d) texturização da malha triangulada texturizada....40

<b>Figura 14</b> – Etapa de classificação da nuvem de pontos com base nas principais litologias aflorantes na mina. Em a) Nuvem Densa de Pontos da região central da mina. Em b) a mesma região com as rochas classificadas no Photoscan.....	41
<b>Figura 15</b> – Interface do <i>software</i> VRGS, utilizado na interpretação estrutural do modelo. Os discos de cor esverdeada representam os planos medidos utilizando a ferramenta <i>Best-fit Plan</i> .....	42
<b>Figura 16</b> – a) nuvem de pontos das litologias classificadas; b) nuvem de pontos condensada. Os discos representam as estruturas medidas.....	43
<b>Figura 17</b> – MVA gerados por fotogrametria digital a partir das fotografias aéreas: a) a nuvem de pontos esparsa, produto do alinhamento das câmeras; b) a nuvem de pontos densa; c) detalhe da malha triangulada texturizada.....	44
<b>Figura 18</b> – Detalhe da nuvem densa de pontos. Nesta sequência de imagens, evidencia-se a resolução da nuvem densa: a) vista geral da cava; b) bancadas e vias de acesso; c) maquinário; d) operadores da máquina; e) e f) perda de conexão entre os pontos.....	45
<b>Figura 19</b> – MDE da área de estudo.....	46
<b>Figura 20</b> – Ortofotomosaico da área de estudo.....	47
<b>Figura 21</b> – Região da nuvem de pontos com as litologias classificadas.....	48
<b>Figura 22</b> – Modelo de blocos gerado por modelagem implícita.....	49
<b>Figura 23</b> – Modelo de blocos da entropia relativa.....	49
<b>Figura 24</b> – Vista em perspectiva do modelo de blocos e três seções orientadas a N/S.....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM - Aprendizagem de Máquina

CMPF - Complexo Metamórfico Passo Feio

ESRG - Escudo Sul-Rio-Grandense

GSD - *Ground Sampling Distance*

LiDAR - *Light Detection and Ranging*

MDE - Modelo Digital de Elevação

MVA – Modelo Virtual de Afloramento

SfM - *Structure from Motion*

SfM-MVS - *Structure from Motion Multi-view Stereo*

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

TSG - Terreno São Gabriel

UgCS - *Universal Ground Control System*

UTM – Universal Transversa de Mercator

VANT - Veículos Aéreos não-Tripulados

VRGS - *Virtual Reality Geological Studio*

WGS84 - *World Geodetic System 1984*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	18
<b>3 JUSTIFICATIVA</b> .....	19
<b>4 ÁREA DE ESTUDO</b> .....	20
<b>5 CONTEXTO GEOLÓGICO</b> .....	21
5.1 Complexo Metamórfico Passo Feio .....	22
5.2 Geologia Local.....	23
<b>6 ESTADO DA ARTE</b> .....	25
6.1 Modelagem Geológica .....	25
6.2 Fotogrametria.....	27
6.2.1 Fotogrametria Digital .....	28
6.2.2 <i>Structure from Motion</i> .....	28
6.2.3 Modelos Virtuais de Afloramento .....	30
6.3 Geologia Estrutural .....	30
6.3.1 Regra dos Três Pontos e Plano de Melhor Ajuste .....	33
6.4 Modelagem Implícita utilizando Aprendizagem de Máquina.....	35
<b>7 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	36
7.1 Planejamento de voo .....	36
7.2 Aquisição de Imagens: .....	37
7.3 Processamento de imagens:.....	38
7.4 Classificação litológica .....	40
7.5 Interpretação Estrutural.....	41
7.6 Integração dos Dados: .....	42
<b>8 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	44
8.1 Modelo Virtual de Afloramento.....	44
8.2 Modelo Digital de Elevação .....	45
8.3 Ortofotomosaico .....	45
8.4 Classificação Litológica .....	48
8.3 Modelo geológico implícito .....	48
<b>9 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	52
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	53

## 1 INTRODUÇÃO

A compreensão sobre as dimensões e teores de corpos de minério é fundamental nas etapas que precedem a exploração de um bem mineral. Conhecer em detalhe as reservas minerais em uma empresa de mineração é fundamental para a avaliação da economicidade dos empreendimentos mineiros. Modelos tridimensionais dos corpos de minério permitem a avaliar a organização espacial das jazidas em subsuperfície (SIDES, 1997).

A modelagem geológica é uma ferramenta indispensável na mineração, porém exige planejamento específico, tempo para a execução e equipe profissional capacitada, além de gerar custos muitas vezes elevados. A modelagem explícita é a forma tradicional de se obter modelos geológicos e se baseia principalmente no desenho manual de seções em duas dimensões (SIDES, 1997; KUMAIRA, 2016;).

O desenvolvimento de novas tecnologias abre novas fronteiras do conhecimento nas geociências. O avanço em recursos de hardware e software tem possibilitado a modelagem de superfícies e a geração de Modelos Virtuais de Afloramento (MVA) de uma forma mais ágil, simples e com menor custo. Recentemente, novas técnicas vêm sendo empregadas para automatizar os processos de modelagem geológica (TAVANI *et al.*, 2016; CAWOOD *et al.*, 2017).

A modelagem implícita é uma técnica relativamente nova para a construção de modelos geológicos e se baseia no uso de algoritmos que integram todas as informações geológicas, geoquímicas e geofísicas para a produção automatizada de modelos. A modelagem implícita é uma alternativa à modelagem explícita e tem se mostrado uma ferramenta avançada para a otimização de modelos geológicos bem como para atualização de modelos de forma interativa (KUMAIRA, 2016).

A constante atualização de um modelo geológico acarreta diretamente em erros menores associados à determinação de volumes de minério e estéril em uma mina, podendo resultar em menores custos e, conseqüentemente, maiores lucros. Uma forma significativa de compreender a complexidade geológica da cava, é realizar o mapeamento das rochas ao longo do avanço da lavra. Aproveitar as informações expostas na frente de lavra é uma estratégia interessante para manter o modelo geológico atualizado constantemente (SIDES, 1997; BERETTA *et al.*, 2018).

Quanto maior o detalhamento do modelo geológico, menores as incertezas e mais confiáveis serão os planejamentos mineiros. Entretanto, em uma mina a céu

aberto, na etapa de mapeamento, algumas áreas são inacessíveis por questões de segurança ou logística. O mapeamento de campo também expõe os geólogos às variações climáticas e a riscos operacionais. Além disso, esse tipo de abordagem demanda tempo e investimentos significativos, e não permite a contabilização das incertezas (SIDES, 1997).

Uma maneira de minimizar esses problemas é o mapeamento geológico da lavra através de sensoriamento remoto utilizando MVA. MVA são modelos tridimensionais foto-realistas que permitem extrair informações geológicas em alta resolução de forma remota. MVA podem ser representados por meio de nuvens de pontos ou por malhas trianguladas texturizadas (TAVANI *et al.*, 2016). Nuvens de pontos permitem a detecção de atributos litológicos na mineração a quase duas décadas. Segundo Cawood *et al.*, (2017) o *Light Detection and Ranging* (LiDAR) tem sido a principal técnica de aquisição para a construção de MVA na última década, embora a aquisição desse tipo de dados espaciais 3D detalhados exija equipamentos de alto custo e alto custo computacional. Por outro lado, o *Structure from Motion* (SfM) é uma ferramenta da fotogrametria digital disponível na última década para a produção de modelos digitais 3D. Essa técnica permite o uso de imagens fotográficas parcialmente sobrepostas de uma estrutura para gerar semi-automaticamente uma reconstrução 3D, com facilidade, custo baixo e sem a necessidade conhecimento especializado em processamento (CARRIVICK *et al.*, 2016). A integração de dados litológicos de superfície com vetores de orientação estrutural permite a construção de modelos geológicos pela modelagem implícita (GONÇALVES, KUMARIA, GUADAGNIN, 2017).

O presente trabalho apresenta a construção de modelo tridimensional de mina de mármore. O modelo construído neste trabalho foi baseado na classificação litológica semi-automática de MVA das frentes de lavra e na interpretação remota das estruturas geológicas. Os dados litológicos e estruturais foram integrados e interpolados por algoritmo de modelagem implícita. Os resultados incluem MVA, Modelo Digital de Elevação (MDE) e ortofotomosaico de alta resolução da cava e modelo de blocos tridimensional e seções geológicas do minério e material estéril. O modelo de blocos permite prever a organização geológica em até 100 metros na horizontal e 30 metros na vertical a partir da superfície do terreno, suficiente para orientar o planejamento da lavra por pelo menos dois anos.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é a construção de modelo geológico tridimensional dos corpos de minério e estéril de mina de mármore no município de Caçapava do Sul, RS, utilizando dados de sensoriamento remoto.

Os objetivos específicos são:

- (i) a construção de nuvem de pontos e malha triangulada texturizada utilizando fotogrametria digital;
- (ii) classificar as litologias no MVA;
- (iii) determinar a orientação e localização espacial das principais estruturas geológicas que ocorrem na mina;
- (iv) integrar os dados gerados para construir modelo geológico tridimensional utilizando modelagem implícita.
- (v) Criação de um modelo de blocos com atributo de classificação minério e estéril, permitindo o cálculo de volumes.



### **3 JUSTIFICATIVA**

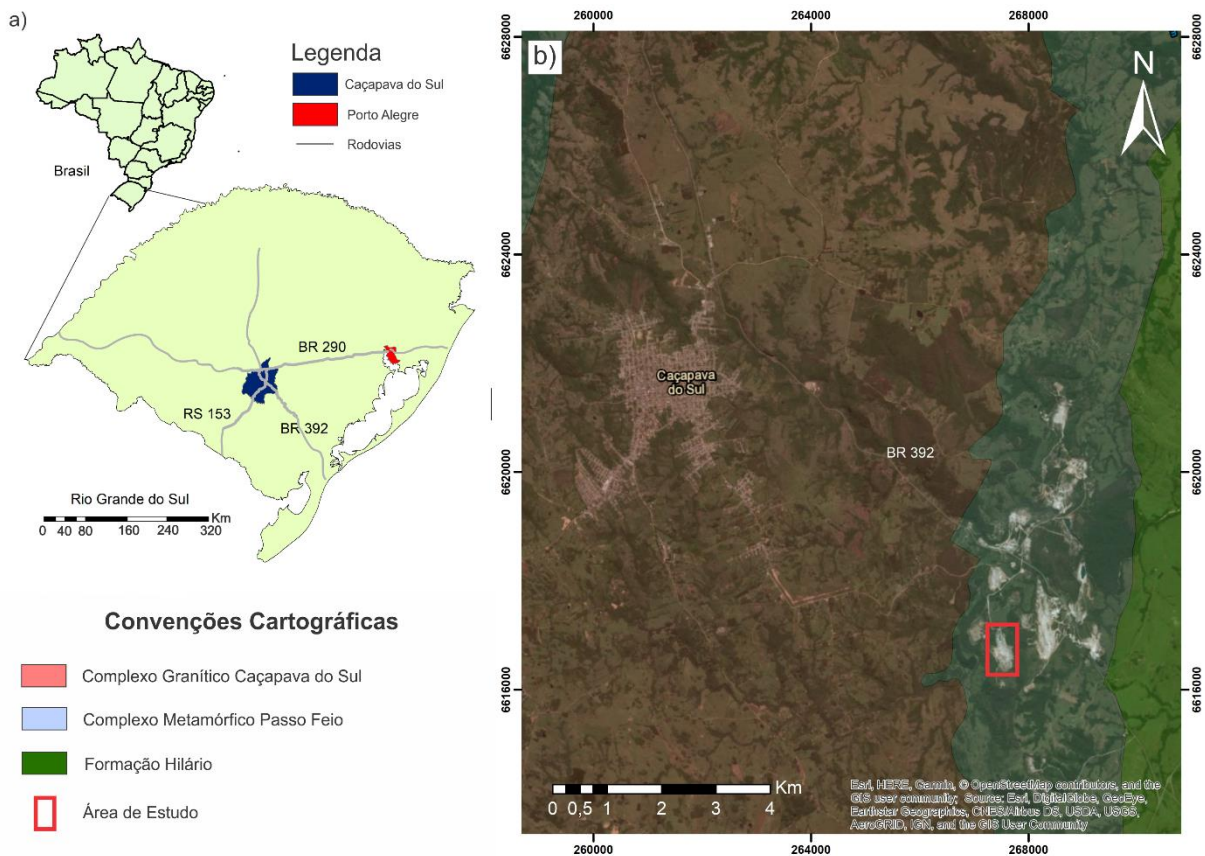
O aumento da demanda por bens minerais tem exigido o desenvolvimento de novas tecnologias de exploração produção e beneficiamento por parte das empresas mineradoras. Atualmente, tornou-se imprescindível que as empresas mineradoras conheçam com precisão os depósitos que exploram, mesmo as de pequeno porte.

A razão estéril minério determina a viabilidade econômica de um empreendimento mineiro, por isso, o aumento dessa razão implica em aumento nos lucros e/ou na vida útil da mina, ao passo que, uma redução na razão pode tornar o empreendimento sub-econômico. O presente trabalho justifica-se pela aplicação de metodologia inovadora para a construção de modelos geológicos 3D de maneira a reduzir o custo e automatizar o processo de modelagem geológica.

#### 4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na região centro-oeste do estado do Rio Grande do Sul, dentro dos limites do município de Caçapava do Sul. A área de estudo está distante aproximadamente 10km do centro da cidade, através da rodovia BR-392. Partindo da capital do estado, Porto Alegre, o acesso se dá via BR-290 no sentido oeste, rumando para sul a partir da BR-153 e, após, para noroeste a pela BR-392 por mais 5,5km aproximadamente (Fig. 1).

**Figura 1** – Mapa de localização da área de estudo: a) são mostradas as principais rodovias que permitem acesso à área de estudo (BR-290 e BR-392); b) mapa geológico sobreposto à imagem de satélite, mostrando a área de estudo em relação à área urbana do município de Caçapava do Sul, RS.



Fonte: Google Earth. Modificado de CPRM (2008).

## 5 CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo está inserida no contexto do Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG). O ESRG localiza-se na parte sul da Plataforma Sul-Americana e da Província Mantiqueira (ALMEIDA *et al.*, 1976), região onde ocorrem rochas ígneas, metamórficas e sedimentares pré-paleozóicas com gênese relacionada aos ciclos Transamazônico, no Paleoproterozoico, e Brasiliano/Pan-Africano, no Neoproterozoico (HARTMANN *et al.*, 1999; SOLIANI JR. *et al.*, 2000). Como definido por Hartmann *et al.*, (2007), o Escudo Sul-Rio-Grandense é composto por um pedaço de um antigo núcleo cratônico (Cráton Rio de La Plata), chamado de Terreno Taquarembó, em contato com uma zona de acreção e retrabalhamento crustal (originada durante o ciclo Brasiliano/Pan-Africano), chamada de Cinturão Dom Feliciano.

O ESRG é dividido em quatro Terrenos: Terreno Taquarembó (complexo granulítico paleoproterozóico retrabalhado parcialmente no Neoproterozóico), Terreno São Gabriel (TSG cujas unidades foram em grande parte formadas por acreção juvenil ou rochas derivadas de um manto neoproterozóico); Terreno Tijucas (rochas granito-gnáissicas e anfibolíticas paleoproterozóicas, rochas supracrustais e plutônicas com vulcanismo cálcico-alcalino e rochas metassedimentares deformadas em ambiente rúptil-dúctil); e o Batólito Pelotas (formado por suítes e complexos graníticos brasileiros com septos do embasamento; HARTMANN *et al.*, 2007).

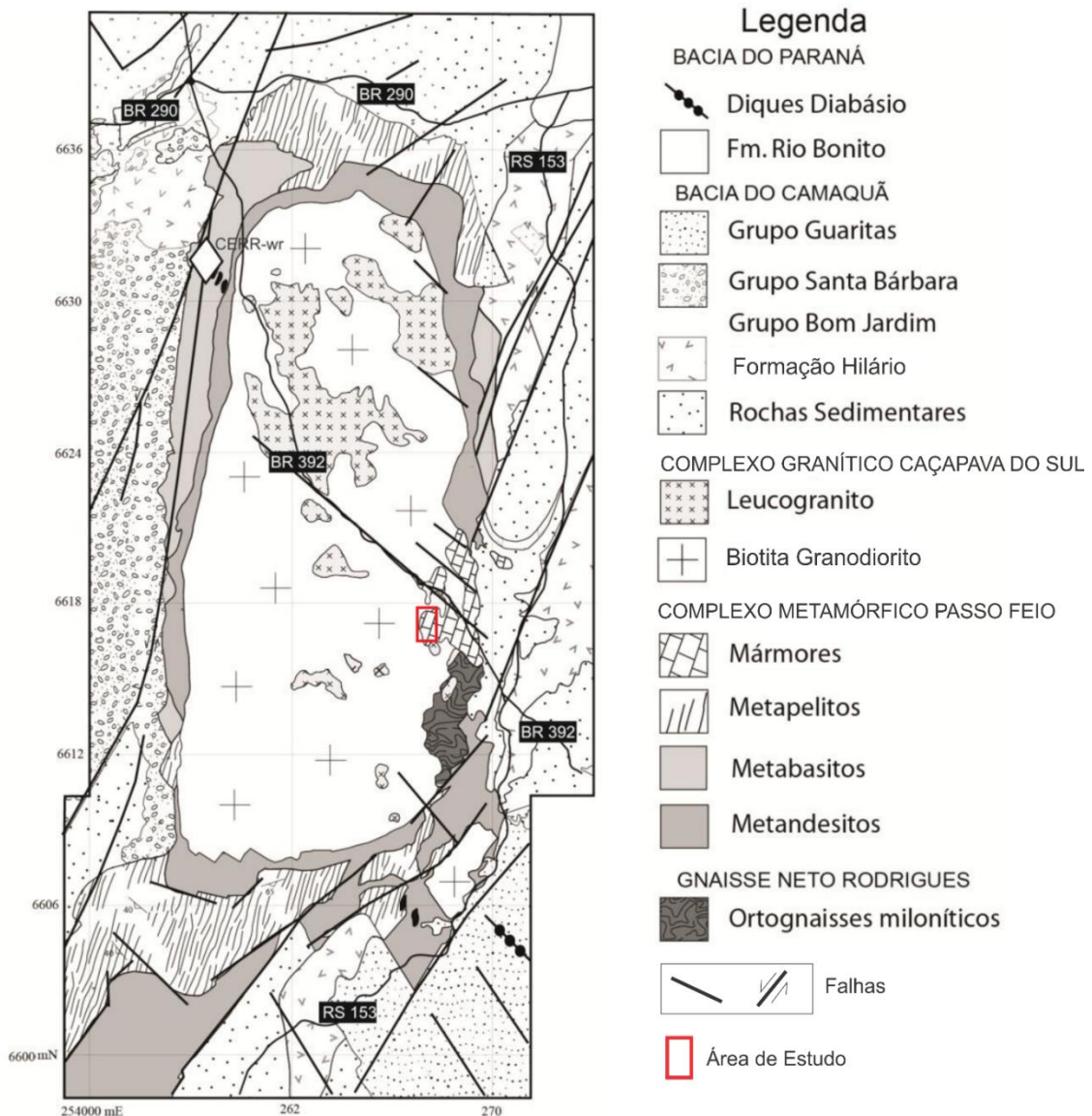
As unidades principais do TSG são associações litológicas relacionadas às fases de desenvolvimento do Arco de Vila Nova (PHILIPP *et al.*, 2011) e estão justapostas tectonicamente como faixas alongadas limitadas por zonas de cisalhamento dúcteis. São rochas juvenis de idades neoproterozóicas definidas por Hartmann *et al.*, (2007) como: Rochas plutônicas e metaplutônicas, cálcico-alcalinas baixo a médio-K, com xenólitos de rochas metassedimentares (Complexo Cambaí) da porção inferior do arco; Rochas metavulcânicas ácidas, intermediárias e básicas; e unidades metassedimentares associadas (Complexos Palma/Bossoroca) da porção superior do arco; e, na área de interesse deste estudo, a geologia é caracterizada pela ocorrência do Complexo Granítico Caçapava do Sul (Paleozoico Inferior), circundada pelo Complexo Metamórfico Passo Feio (CPMF; metapelitos,

xistos quartzo-feldspáticos, quartzitos e meta-vulcânicas subordinadas) - neoproterozoico.

### 5.1 Complexo Metamórfico Passo Feio

Ribeiro *et al.*, (1966) e Bitencourt (1983) definem o CMPF como uma sequência metamórfica vulcano-sedimentar composta por ardósias, filitos, xisto pelíticos, xistos graníticos, mármore, quartzito, metaconglomerado, rochas calcosilicatadas, anfibolitos e metabasaltos subordinados, e xisto magnésiano formados principalmente na fácies anfibolito inferior (Fig. 2).

**Figura 2** - Mapa geológico da região de Caçapava do Sul. Ao centro, o Complexo Granítico Caçapava do Sul circundado pelo Complexo Metamórfico Passo Feio.



Fonte: modificado de Philipp *et al.*, (2011).

Bitencourt (1983) define dois eventos metamórficos distintos para as rochas do complexo. O primeiro evento atingiu a fácies anfíbolito, zona estauroлита. A presença do mineral andaluzita nessa fase, sugere metamorfismo de baixa pressão. O segundo evento, atingiu a fácies xisto verde. Duas fases de deformação acompanham os eventos metamórficos, sendo a segunda fase responsável pela foliação metamórfica original (BITENCOURT, 1983).

## 5.2 Geologia Local

A geologia encontrada da área de estudo é bastante diversificada, podendo conter anfíbolitos, metapelitos, mármore, granitos, diques máficos e outros (Fig. 3).

Os mármore presentes na mina têm aspecto lenticular com alto grau de fraturamento e apresentam contatos nítidos. São definidos por Bortolotto (1986) como mármore dolomítico impuro. Os mármore apresentam bandas milimétricas a centimétricas irregulares e descontínuas, com colorações variando desde verde, cinza, branco até rosa. São raras as estruturas completamente maciças. Ainda segundo Bortolotto (1986) a textura é predominante granoblástica, com grãos equidimensionais (BORTOLOTTI, 1986).

Bitencourt (1983) definiu as rochas metapelíticas (Fig. 3b) como xistos e filitos a muscovita, biotita e/ou clorita. Os xistos pelíticos ocorrem tanto como bandas de espessura variável, intercaladas com anfíbolitos (Fig 3c). Bitencourt (1983) aponta que anfíbolito xistos são consideradas aquelas rochas de coloração preta ou esverdeada, com estrutura planar e contínua. Frequentemente essas rochas apresentam intercalações milimétricas a centimétricas com rochas metapelíticas ricas em mica com contato abrupto. O quartzo ocorre nessas rochas de maneira restrita (BITENCOURT, 1983).

Também ocorrem na área de estudo as rochas do Complexo Granítico Caçapava do Sul, (Fig. 3d). Nardi e Bitencourt (1989) definiram pelo menos três fácies, reconhecíveis petrográfica e geoquimicamente. Os biotita granitóides são rochas de coloração cinza, tornando-se róseas quando intemperizadas. São ricos em biotita e allanita como minerais acessórios. Os leucogranitóides são rochas de coloração rósea, com baixo teor de minerais máficos, contendo, localizadamente, granada e/ou moscovita. Os granitóides transicionais ocorrem de preferência na



porção central e este do complexo e apresentam características intermediárias entre os dois primeiros tipos (NARDI E BITENCOURT, 1989).

Diques e *sills* (soleiras) de diabásio (Fig. 3a) com textura ofítica são comumente encontrados em toda a área da mina. De acordo com Ribeiro *et al.*, (1966) estão relacionados com a Formação Serra Geral. Estas rochas apresentam alterações típicas de contato térmico e também pequenas oxidações de ferro (RIBEIRO *et al.*, 1966).

**Figura 3** – Os diversos tipos de rochas ocorrentes na Mina Mangueirão: a) diques e *sills* de diabásio intrudindo o mármore; (b) bancada recentemente desmontada, composta por rochas metapelíticas de coloração cinza escuro; c) anfíbolitos intercalados ao mármore; d) contato entre rochas graníticas e mármore.



Fonte: autor.

## 6 ESTADO DA ARTE

A construção de um modelo geológico tridimensional é dividida em diversas etapas e envolve uma série de conceitos. A seguir serão descritas informações importantes para o desenvolvimento do trabalho, detalhando as teorias sobre os métodos e as técnicas utilizadas para o seu desenvolvimento.

### 6.1 Modelagem Geológica

A construção de modelo geológico em 3D a partir de dados de campo e subsuperfície é uma tarefa típica em estudos geológicos envolvendo avaliação de recursos naturais. Entender a organização espacial de estruturas subsuperficiais é essencial para a modelagem quantitativa de processos geológicos. Também é vital para um amplo espectro de atividades humanas, desde a exploração e produção de hidrocarbonetos até a engenharia ambiental. Como não é possível acessar diretamente a subsuperfície, exceto através de escavações, túneis e minas, a maior parte dessa compreensão deve vir de vários processos de aquisição indiretos. A modelagem de subsuperfície 3D geralmente não é um fim, mas um meio de melhorar a interpretação de dados através da visualização de dados (CAUMON *et al.*, 2013; WU *et al.*, 2015).

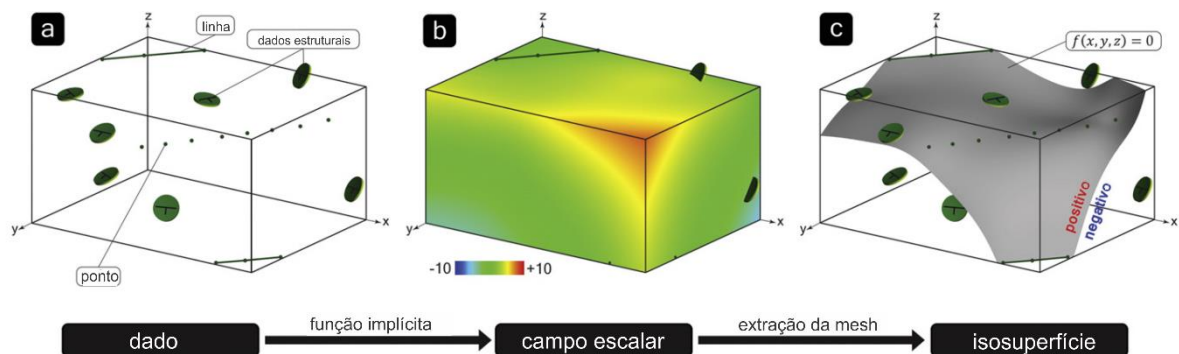
As duas principais metodologias usadas para modelagem geométrica 3D de depósitos de minério, são denominadas modelagem explícita e implícita, porém a seleção de uma técnica apropriada para modelar não depende apenas da complexidade geológica e dos dados disponíveis, mas também da função ou finalidade do modelo. (COWAN *et al.*, 2003; CAUMON *et al.*, 2009; VOLLGGER *et al.*, 2015).

Os modelos explícitos se baseiam na definição manual de limites geológicos pela digitalização de seções que são posteriormente vinculadas para gerar corpos e superfícies 3D (VOLLGGER *et al.*, 2015). Os dados são armazenados digitalmente e podem ser visualizados em 3D, o que proporciona grandes vantagens. No entanto, isso não se aplica necessariamente à modelagem geológica 3D em ambientes geológicos ricos em dados e geometricamente complexos. A definição manual de cada elemento torna os fluxos de trabalho de modelagem explícita demorados e também introduz um forte viés herdado da interpretação geológica durante a

digitalização e a vinculação de seções transversais, resultando em modelos únicos e não reproduzíveis (VOLLGGER *et al.*, 2015).

Alternativamente, a modelagem implícita é uma técnica em que superfícies e volumes não são explicitamente definidos, mas descritos matematicamente como isovalores de um campo escalar volumétrico (CAUMON *et al.*, 2013). O desenvolvimento principal desta técnica baseada em campo escalar originou-se de desenvolvimento em computação gráfica, onde o objetivo é reconstruir sólidos e superfícies a partir de dados pontuais dispersos para aplicações em tomografia, LiDAR, animação e visualização de formas complexas. Na modelagem implícita, uma função implícita (formato genérico  $f(x, y, z) = 0$ ) é computada e ajustada a um conjunto de dados espaciais (pontos, linhas, dados estruturais; Fig. 4a). Esta função implícita descreve um campo escalar volumétrico, que atribui um valor a todos os pontos no espaço (Fig. 4b). Isovalores deste campo podem ser extraídos e usados para definir isosuperfícies 3D abertas ou fechadas, que podem ser visualizadas como análogos 3D de linhas de contorno 2D (Fig. 4c; VOLLGGER *et al.*, 2015).

**Figura 4** – Os modelos implícitos 3D são construídos usando isosuperfícies (c) que são derivadas de um campo escalar (b). Este campo escalar é definido pela interpolação espacial de pontos, linhas e dados de medição estrutural (a). Estes últimos influenciam o gradiente do campo escalar e controlam a forma e orientação da isosuperfície associada.



**Fonte:** modificado de Vollgger *et al.*, (2015).

A ligação direta entre os dados e o modelo 3D é uma grande vantagem do método de modelagem implícito. Atualizações e mudanças são feitas diretamente a partir de dados melhorados ou mesmo de novos dados, o que é um atributo que tem impulsionado parcialmente seu desenvolvimento. Entretanto, uma desvantagem dessa metodologia, é a dificuldade em incorporar conhecimento geológico prévio. De qualquer forma, em ambientes geologicamente complexos e poli-deformados, onde a mineralização e as estruturas podem ter várias orientações, uma abordagem de



modelagem implícita deve ser preferida. Além disso, a modelagem implícita é atraente porque torna a modelagem geológica 3D uma tarefa reproduzível, que é necessária para a quantificação da incerteza geológica em modelos 3D (VOLLGGER *et al.*, 2015).

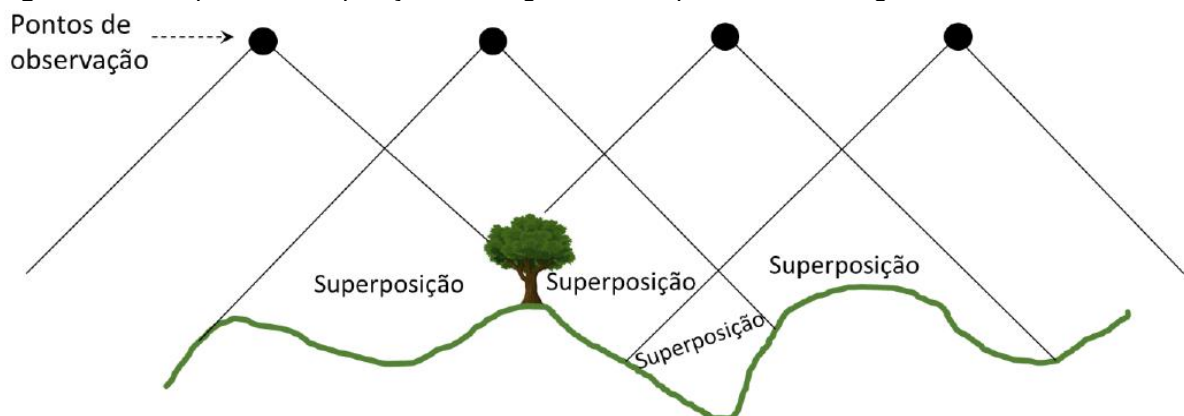
## 6.2 Fotogrametria

A palavra fotogrametria (cujos radicais vêm do grego: *photon* [luz], *graphos* [escrita] e *metron* [medições]) significa medições executadas através de fotografias. Segundo Coelho & Brito (2007) a fotogrametria está inserida no contexto global do sensoriamento remoto, e pode ser definida como ciência e tecnologia de aquisição de informação sobre um objeto sem contato direto entre este e o sensor.

Os objetivos da fotogrametria são inúmeros, tais como reduzir o trabalho de campo no levantamento de coordenadas e atitudes de um ou vários objetos, reduzir o tempo de obtenção de tais dados, reduzir os riscos de para obter esses dados, aumentar o número de dados obtidos por tempo, etc., entretanto, o principal objetivo da fotogrametria pode ser descrito como a reconstrução de um espaço tridimensional a partir de um conjunto de imagens bidimensionais (COELHO & BRITO, 2007).

O cenário tridimensional construído nesse trabalho só é possível graças ao fenômeno da paralaxe estereoscópica, que permite uma visão 3D em fotografias com até 60% de sobreposição (Fig.5). Coelho & Brito (2007) definem a paralaxe estereoscópica como o deslocamento aparente na posição de um objeto, em relação a um ponto de referência, causado pela mudança na posição de observação.

**Figura 5** – Princípio da sobreposição de imagens aéreas para análise fotogramétrica.



**Fonte:** extraído de Beretta *et. al.*, (2018).

### 6.2.1 Fotogrametria Digital

A fotogrametria digital surgiu nos anos 80, tendo como grande inovação a utilização de imagens digitais como fonte primária de dados. Apenas nos anos 90, esse ramo da fotogrametria realmente pôde ser usado de maneira ampla, graças ao desenvolvimento de *softwares* e *hardwares* com capacidade suficiente para o processamento de imagens digitais (COELHO & BRITO, 2007; CARRIVICK *et al.*, 2016).

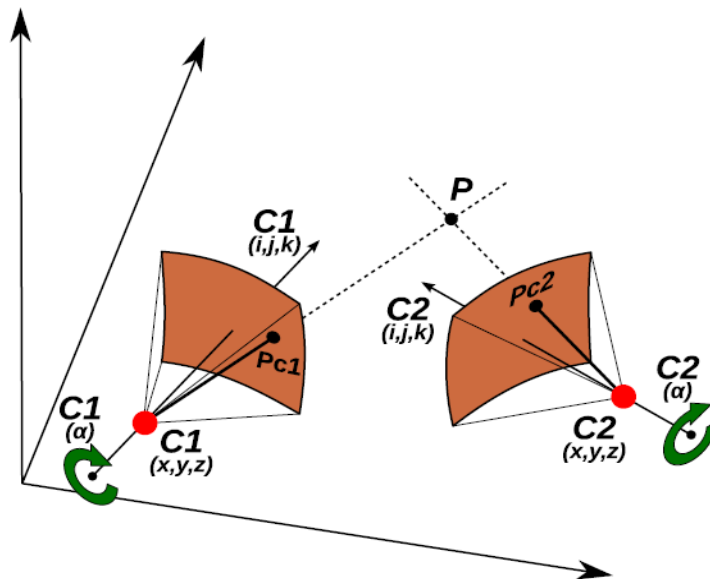
A fotogrametria digital preocupa-se em automatizar a fotogrametria, sobretudo graças aos avanços tecnológicos dos últimos anos, que possibilitam o rápido processamento do montante de dados que surgem em consequência desses processos. Atualmente, pode-se dizer que o estado-da-arte em fotogrametria digital é o mapeamento semiautomático, ou seja, os processos implementados tentam ser automáticos, mas ainda exigem a supervisão e eventual intervenção humana nos mesmos (COELHO & BRITO, 2007).

### 6.2.2 *Structure from Motion*

De acordo com Carrivick *et al.*, (2016) *Structure from Motion* não é uma técnica ou ferramenta isolada é, na verdade, um fluxo de trabalho. Embora na literatura seja comum abreviar este fluxo de trabalho apenas para SfM, o acrônimo SfM-MVS (*Structure from Motion – Multi-view Stereo*) é usado para defender a prática rigorosa dos diferentes aspectos do fluxo de trabalho completo. O SfM-MVS é então, um fluxo de trabalho que utiliza múltiplas imagens (sobrepostas) de um objeto ou superfície, obtidas através de uma câmera fotográfica, a partir de vários pontos de vista, para reconstruir a geometria 3D do objeto ou da superfície (CARRIVICK *et al.*, 2016).

A geometria da cena, as posições e a orientação da câmera são recuperadas simultaneamente pelo SfM-MVS (Fig. 6). No entanto, são necessários conjuntos de fotografias com um alto grau de sobreposição e que capturem a tridimensionalidade completa do relevo de interesse, visto de uma série de posições e aspectos circundantes; isto é, como o nome indica, imagens derivadas de um sensor em movimento (CARRIVICK *et al.*, 2016).

**Figura 6** - Esquema mostrando os parâmetros envolvidos na visão estereoscópica. Quando um ponto  $P$  é fotografado de duas câmeras  $C1$  e  $C2$ , a posição de  $P$  nas duas fotos ( $Pc1$  e  $Pc2$ ) depende da posição das duas câmeras, da distância focal e da orientação, que é definida por 4 parâmetros (o vetor  $ijk$  e o ângulo  $\alpha$  definindo a quantidade de rotação em torno do eixo  $i$   $j$   $k$ ).



**Fonte:** extraído de Tavani *et al.*, (2014)

Em contraste com a fotogrametria tradicional, o SfM usa algoritmos para identificar recursos correspondentes em um conjunto de imagens digitais sobrepostas (CARRIVICK *et al.*, 2016). O processo fundamental do SfM é a detecção e descrição de características comuns ou texturas em imagens sobrepostas. Após a detecção dos recursos correspondentes, eles recebem coordenadas 3D e, iterativamente, o software constrói automaticamente uma rede 3D de pontos correspondentes ou de ligação. Após a criação da rede de ponto de união 3D, uma nuvem densa é gerada para preencher o espaço entre os pontos de ligação, por meio de um algoritmo MVS (*Multi View Stereo* ou estéreo de múltiplas visualizações). Este algoritmo funciona essencialmente pesquisando as redes de pixels nas imagens, selecionando as melhores correspondências e gerando pontos no espaço 3D. A precisão alcançável estimada das coordenadas do ponto derivado do SfM é controlada por: (1) número de imagens sobrepostas nas quais a característica de interesse aparece; (2) distância média da câmera ao alvo; (3) distância entre centros de câmara em relação ao objeto de interesse, isto é, o ângulo de convergência da imagem na cena; (4) distância principal da câmera, uma medida similar à distância focal; e (5) a precisão das medidas de imagem e parâmetros de reconstrução (CAWOOD *et al.*, 2017).

### 6.2.3 Modelos Virtuais de Afloramento

De acordo com Tavani *et al.*, (2014), MVA são representações digitais, de uma superfície topográfica, em um ambiente virtual tridimensional. Os MVA podem ser representados de duas formas: como nuvem de pontos ou como malhas trianguladas texturizadas.

Segundo Cawood *et al.*, (2017) o LiDAR tem sido a principal técnica de aquisição para a construção de afloramentos virtuais na última década, embora a aquisição desse tipo de dados espaciais 3D detalhados exija equipamentos de alto custo (LiDAR) e conhecimento significativo em processamento.

De acordo com Carrivick *et al.*, (2016), com o advento da *Structure from Motion*, a produção de modelos digitais 3D tornou-se democratizada. Uma vez que essa técnica fornece a capacidade de usar imagens digitais sobrepostas de uma superfície para gerar semiautomaticamente uma reconstrução virtual tridimensional. Além disso, essa ferramenta apresenta custos mais baixos, um menor tempo de processamento e não requer conhecimento especializado em processamento para a construção dos MVA.

## 6.3 Geologia Estrutural

Uma correta interpretação da atitude das feições geológicas encontradas numa mina é fundamental para uma construção correta de modelo geológico 3D. Neste capítulo são descritos brevemente o método clássico de obtenção de informações estruturais, utilizando as ferramentas clássicas em geologia além de uma abordagem utilizando modelos virtuais de afloramento.

Ragan (2009) define alguns termos importantes para o entendimento da geologia estrutural utilizada neste trabalho, são eles:

**Plano:** uma superfície plana definida pela intersecção de duas linhas;

**Atitude:** o termo geral para a orientação de um plano ou linha no espaço, geralmente relacionado a coordenadas geográficas e horizontais. Tanto a tendência quanto a inclinação são componentes da atitude

**Azimute:** o ângulo horizontal medido no sentido horário a partir do norte verdadeiro;

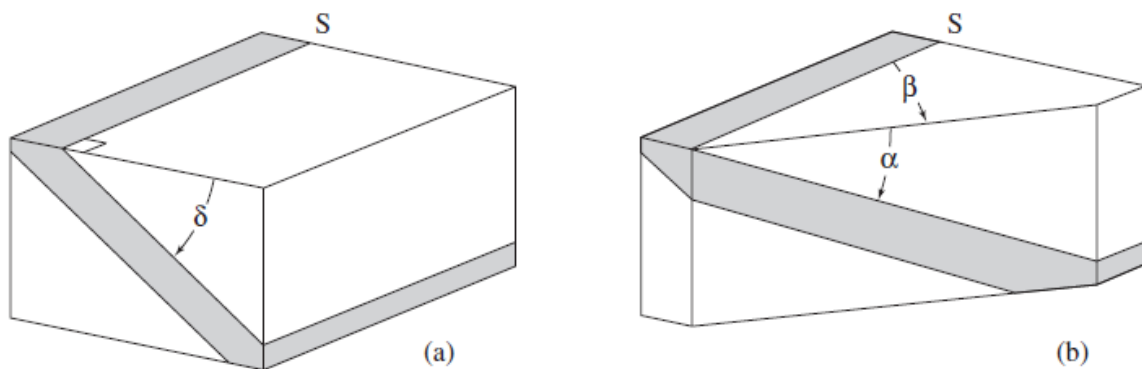
**Strike:** a tendência de uma linha horizontal em um plano inclinado (Fig. 7). É marcado pela linha de interseção com um plano horizontal; **Inclinação:** o ângulo vertical, geralmente medido para baixo, da horizontal para um plano ou linha inclinada;

**Mergulho verdadeiro:** a inclinação da linha mais íngreme em um plano; é medido perpendicularmente ao *strike* (Fig. 7a);

**Mergulho aparente:** a inclinação de uma linha oblíqua em um plano; é sempre menos do que o verdadeiro mergulho (Fig, 7b);

**Rolamento estrutural:** o ângulo horizontal medido a partir da direção do *Strike* até a linha de interesse (Fig. 7b; RAGAN, 2009).

**Figura 7** - *Strike* S, mergulho verdadeiro  $\delta$  (delta), mergulho aparente  $\alpha$  (alfa) e rolamento estrutural  $\beta$  (beta).

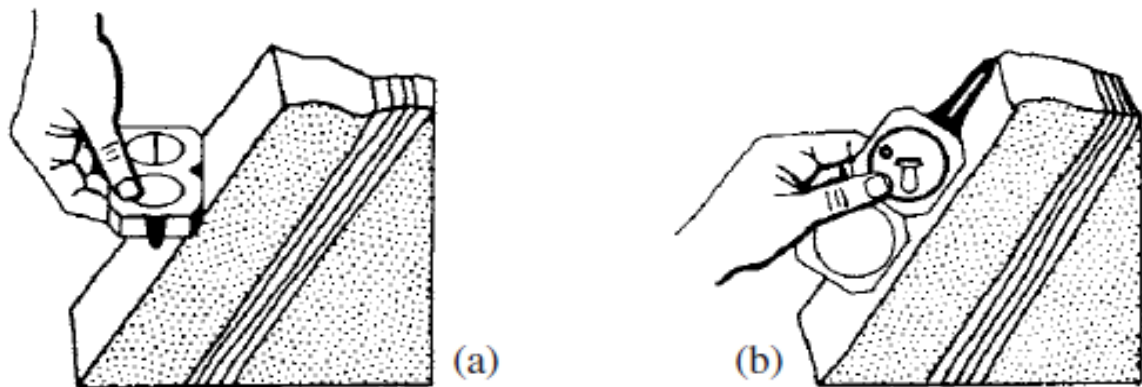


**Fonte:** extraído de Ragan, 2009.

Os termos dip (mergulho) e *strike* se aplicam a qualquer plano estrutural e representam sua atitude. A estrutura planar mais frequentemente encontrada é o plano de acamamento. Medições de *strike* e dip são comumente feitas com uma bússola e um clinômetro.

O *strike* é medido colocando-se uma borda da tampa aberta contra o plano e a bússola girada até que esteja na horizontal, conforme indicado pela bolha (Fig. 8a). O mergulho é determinado colocando-se um lado da bússola e a tampa diretamente contra o plano exposto, perpendicular ao *strike* medido anteriormente. A bolha do clinômetro é nivelada e o ângulo de mergulho lido (Fig. 8b).

**Figura 8** - Medições com uma bússola Brunton: (a) *strike*; (b) mergulho.



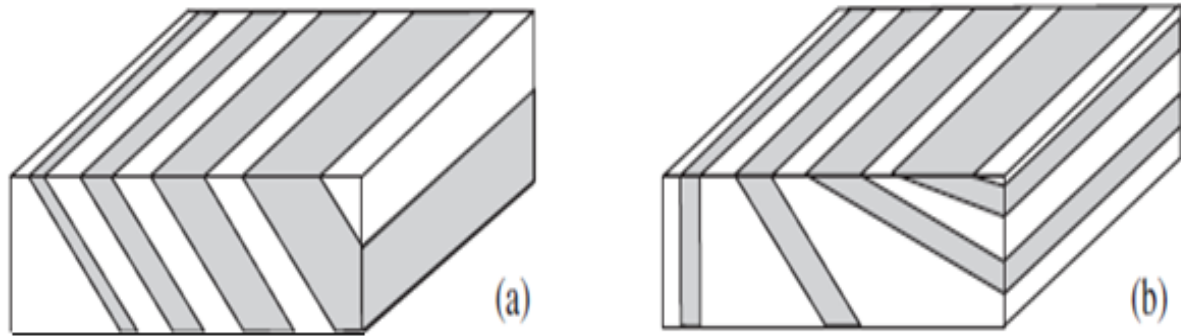
**Fonte:** extraído de Ragan, 2009.

Também serão importantes os conceitos de Espessura, Espessura Aparente, Largura e Profundidade (Fig. 9).

Ragan (2009) define a espessura como a distância perpendicular entre os planos paralelos que limitam um corpo, conforme exibido em qualquer seção perpendicular a esses planos. Define espessura aparente como a distância entre os planos delimitantes medidos em alguma outra direção, por exemplo, a distância perpendicular entre os traçados dos planos delimitadores em uma seção oblíqua, ou em alguma outra direção específica, como em um furo. É sempre maior que a espessura verdadeira. Largura do afloramento é definida como a distância a partir do *strike* entre os traços dos planos delimitadores paralelos medidos na superfície da Terra. E a profundidade é a distância vertical de um nível especificado (geralmente a superfície da Terra) para baixo, para um ponto, linha ou plano (RAGAN, 2009).

Ainda segundo Ragan (2009) interseção de camadas inclinadas com a superfície da Terra resulta em um padrão de afloramento. Neste caso, a largura das bandas de afloramento depende de dois fatores: a espessura real das camadas e o ângulo de inclinação de cada camada. O efeito separado de cada um desses fatores é mostrado na Fig. 9.

**Figura 9** - Largura do afloramento: (a) varia com a espessura; (b) varia com o mergulho.



**Fonte:** extraído de Ragan, 2009.

Em áreas de terreno inclinado, fatores adicionais estão envolvidos na determinação do caráter dos padrões de afloramentos, e estes incluem o ângulo e a direção da inclinação topográfica em relação à atitude dos estratos e as variações no ângulo e direção da inclinação. Em outras palavras, além da espessura e do mergulho, a interpretação das estruturas também depende dos detalhes da topografia. As relações entre mergulho e topografia (Regra dos Vs) permite a determinação do comportamento dos estratos diretamente a partir dos padrões de afloramento (RAGAN, 2009).

### 6.3.1 Regra dos Três Pontos e Plano de Melhor Ajuste

Fernández (2005) mostra que o uso de algoritmos de regressão planar e de análise de momento de inércia é uma maneira eficaz de calcular a orientação de uma superfície a partir de um conjunto de pontos. Essas ferramentas podem ser aplicadas recursivamente a diferentes conjuntos de pontos pertencentes a uma mesma superfície para analisar a variação espacial na atitude da mesma.

A orientação de uma superfície pode ser derivada da posição X, Y, Z de três ou mais pontos nela contidos. Para se obter essas orientações, existem pelo menos dois métodos: Regra dos Três Pontos e Plano de Melhor Ajuste (*Best-fit plan*) onde a qualidade da medição de orientação da superfície depende fortemente da distribuição espacial dos pontos (FERNÁNDEZ, 2005).

A Regra dos Três Pontos consiste em escolher três pontos com coordenadas X, Y, Z conhecidas e calcular a orientação de um plano que encaixe os três pontos. Ao fazê-lo, assume-se que a superfície em estudo é plana e que os três pontos selecionados para definir a atitude da superfície são representativos da superfície. A

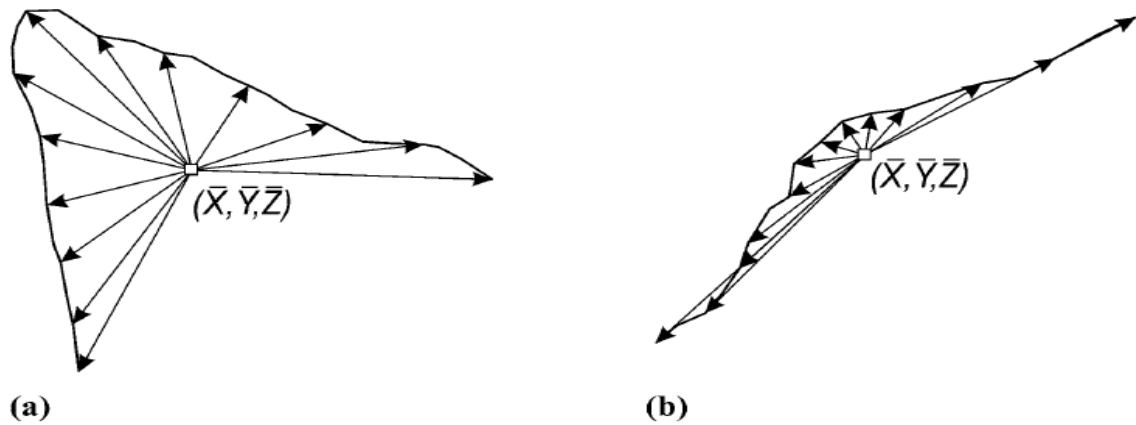
principal desvantagem por trás dessa abordagem é que a qualidade e a confiabilidade do resultado dependem muito do conjunto de pontos selecionados para realizar os cálculos. Frequentemente, mais do que apenas três pontos com coordenadas  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  conhecidas estão disponíveis para qualquer superfície, portanto, para obter medidas representativas, é preferível usar uma maior quantidade de pontos nos cálculos, desde que eles definam uma única superfície plana (FERNÁNDEZ, 2005).

De acordo com Fernández (2005), dois métodos podem ser usados para obter valores médios de orientação que são estatisticamente confiáveis, incorporando mais de três pontos nos cálculos. Um método consiste em definir a orientação e a posição da superfície calculando o plano de melhor ajuste para um conjunto de pontos através de uma regressão planar. A outra abordagem consiste em realizar um momento de análise de inércia no conjunto de pontos. O momento da análise de inércia também fornece parâmetros para avaliar a confiabilidade da medição de orientação (FERNÁNDEZ, 2005).

No entanto, um alto grau de ajuste não é necessariamente sinônimo de boa qualidade de orientação, pois a medição não é necessariamente confiável. A orientação de um plano de melhor ajuste será mais confiável se uma pequena alteração na orientação do plano causar uma diminuição significativa no grau de ajuste. Assim, quanto menos colineares os nós, mais confiável será a orientação do plano, independentemente do grau de ajuste (Fig. 10; FERNÁNDEZ, 2005).



**Figura 10** - A confiabilidade da orientação medida a partir de um traço no afloramento depende da distribuição de seus nós no espaço. Um traço cujos 'nós' estão distribuídos uniformemente em torno de seu centro de massa (a) fornecerá uma medida de orientação mais confiável do que um traço com mais 'nós' co-lineares (b). Mesmo que as orientações dos vetores em (b) sejam amplamente distribuídas (acima de  $180^\circ$ ), os vetores mais longos pesam mais que os mais curtos, gerando uma distribuição de agrupamentos.



Fonte: extraído de Fernández (2005).

#### 6.4 Modelagem Implícita utilizando Aprendizagem de Máquina

Flach (2012) define a aprendizagem de máquina (AM) como o estudo sistemático de algoritmos e sistemas que melhoram seu conhecimento ou desempenho com experiência. A "experiência" provém dos dados rotulados corretamente e o "desempenho" refere-se à sua capacidade de rotular e, assim como ocorre com o aprendizado humano, o aprendizado de máquina nem sempre é direcionado para melhorar o desempenho em uma determinada tarefa, mas geralmente pode resultar em melhor conhecimento. Pode-se dizer então que um algoritmo de aprendizado de máquina literalmente "aprende" como executar uma determinada tarefa. As técnicas de aprendizagem de máquina podem ser divididas em supervisionada ou não supervisionada. As técnicas supervisionadas trabalham a partir de um rótulo ou classificação, enquanto que as não supervisionadas buscam detectar padrões em um conjunto de dados não rotulados (FLACH, 2012). Neste trabalho foi empregado um método supervisionado (GONÇALVES, KUMARIA, GUADAGNIN, 2017).

Os métodos baseados em AM têm sido amplamente aplicados aos problemas de ciência e engenharia há quase duas décadas. Isso ocorre enquanto a aplicação dessas técnicas na área de geociências e sensoriamento remoto é relativamente nova e limitada (LARY *et al.*, 2016). Como apontado por Gonçalves, Kumaria,

Guadagnin (2017), recentemente a aprendizagem de máquina vem sendo utilizada nas geociências para auxiliar na prospecção mineral e mapeamento geológico, para modelagem geológica, na geoestatística padrão, para identificar domínios homogêneos, além de diversos outros campos.

## 7 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste projeto foi dividido em seis etapas: planejamento de voo, aquisição de fotografias aéreas, processamento de imagem, classificação litológica, interpretação estrutural e integração dos dados no modelo implícito. A geração do modelo virtual de superfície da mina utilizou os conceitos de Fotogrametria Digital, *Structure from Motion* e Geologia Estrutural 3D. Na etapa de construção do modelo geológico tridimensional, a integração dos dados foi feita de forma implícita, utilizando um algoritmo livre (*open source*) além do *software* Micromine. Abaixo cada etapa do trabalho é detalhada.

### 7.1 Planejamento de voo

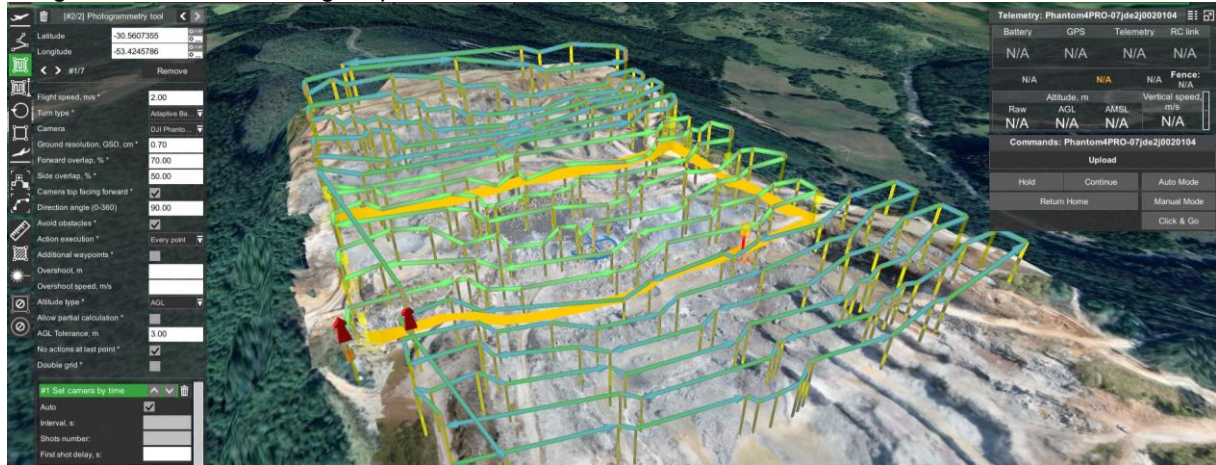
Para aquisição de fotografias aéreas utilizando VANT, é necessário que sejam planejados os voos necessários de forma que as fotografias possam cobrir toda a área de interesse da melhor forma possível.

Para a definição dos planos de voo utilizou-se o *software* Universal Ground Control System (UgCS; Fig. 11). Este software permite a definição das áreas a serem sobrevoadas, a sobreposição das fotografias, a angulação da câmera, a resolução das fotos, entre outros parâmetros. Ao todo, para a construção dos MVA foram necessários três levantamentos fotográficos realizados em momentos distintos.

Num primeiro momento foi necessário a construção de um modelo digital de elevação (MDE) de mais alta resolução. Para a construção deste MDE foram necessários três voos ao todo, com resolução espacial (*Ground Sampling Distance – GSD*) de 2 cm/pixel. Para manter o GSD homogêneo em toda a área de estudo, a altura de voo foi corrigida utilizando a superfície topográfica derivada do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), cuja resolução espacial é de 30 m/pixel. As fotografias obtidas nesse levantamento, foram processadas em laboratório utilizando

o *software* Agisoft Photoscan. O processamento teve como objetivo a confecção de um MDE com resolução espacial de 50 cm/pixel. Este MDE serviu de base para novos levantamentos fotográficos planejados no UgCS.

**Figura 11** – Interface do *software* UgCS, utilizado no planejamento dos voos para aquisição das fotografias aéreas. Na imagem pode-se observar linhas de voos orientadas a L-O.



Fonte: autor.

Utilizando agora como base, uma superfície de mais alta resolução – o MDE gerado anteriormente, foi possível planejar voos mais baixos para o VANT, o que possibilitou a tomada de fotografias mais próximas às frentes de lavra. Foram feitos então mais dois levantamentos fotográficos, dos quais foram gerados dois MVA de alta resolução (GSD de 0,8 cm/pixel). O primeiro levantamento, com um total de cinco voos, abrangeu toda a área da mina. O segundo levantamento também totalizou cinco voos, porém, com a finalidade de detalhar as bancadas (ângulo da câmera em 15°). Ao todo, os 10 voos capturaram aproximadamente 3.600 fotografias aéreas de 20 megapixels.

## 7.2 Aquisição de Imagens:

Para a aquisição das fotografias aéreas foram utilizados dois Veículos Aéreos não-Tripulados (VANT). O levantamento inicial foi realizado com um *DJI Phantom 4* (câmera de 12 megapixels), enquanto levantamento de mais alta resolução foram feitos com um *Dji Phantom 4 PRO* (câmera de 20 megapixels; Fig. 12). Além disso, em campo foram necessários um notebook e dois smartphones, um smartphone para o controle do VANT e outro para gerar uma rede sem fio por onde são carregados no VANT, os planos de voo.

**Figura 12** – Aquisição de aerofotografias utilizando VANT Dji Phantom 4 PRO.



Fonte: autor.

Durante a aquisição das fotografias, foram distribuídos por toda área da mina, 20 alvos (ou pontos de controle), confeccionados em folha sulfite tamanho A4. As coordenadas de cada alvos foi coletada utilizando-se um RTK (*Real-Time Kinematic*) dGPS (*Differential Global Positioning System*) modelo STONEX S10. Esse procedimento foi realizado com o intuito de se aumentar a precisão do georreferenciamento do modelo virtual.

### **7.3 Processamento de imagens:**

Para a geração dos modelos virtuais da superfície da mina foi utilizado o *software* Agisoft Photoscan. O processamento das fotografias se deu na forma de um fluxo de trabalho. Procurou-se seguir os parâmetros observados em Carrivick *et al.*, (2016); Cawood *et al.*, (2017); Tavani *et al.*, (2014) e Tavani *et al.*, (2016). Uma explicação detalhada dos parâmetros pode ser encontrada em Agisoft LLC, (2018).

O primeiro passo consiste em importar as fotos para o Photoscan. Em seguida foram removidas as imagens que ficaram fora da área de interesse. Também foi estimada a qualidade das fotos de modo que fotografias com qualidade baixa foram removidas. Ao final, as coordenadas das fotos foram convertidas para o sistema de coordenada dos pontos de controle (UTM/WGS84/Zona 22S).

A segunda etapa é o alinhamento das imagens (Fig. 13a). Os parâmetros utilizados no alinhamento das fotos foram: acurácia “alta” (estimativas mais precisas no posicionamento das câmeras); pré-seleção de pares “referência” (correspondência de recursos detectados nas fotos, selecionando um subconjunto de pares de imagens a serem correspondidos); limite de pontos-chave “40.000” (limite superior de pontos de recurso em cada imagem a ser considerada durante o processamento); limite de pontos de amarração “4.000” (limite superior de pontos correspondentes para cada imagem). Por fim foi realizada a otimização do alinhamento. O resultado desse processo é uma nuvem de pontos esparsa.

Com a nuvem esparsa foi possível realizar o georreferenciamento do projeto. Os alvos espalhados em campo foram reconhecidos com base nas fotografias aéreas e as coordenadas colhidas em campo com RTK foram anexadas ao modelo. Dos 20 pontos coletados, 10 foram usados para georreferenciar e 10 foram usados para estimar o erro do georreferenciamento.

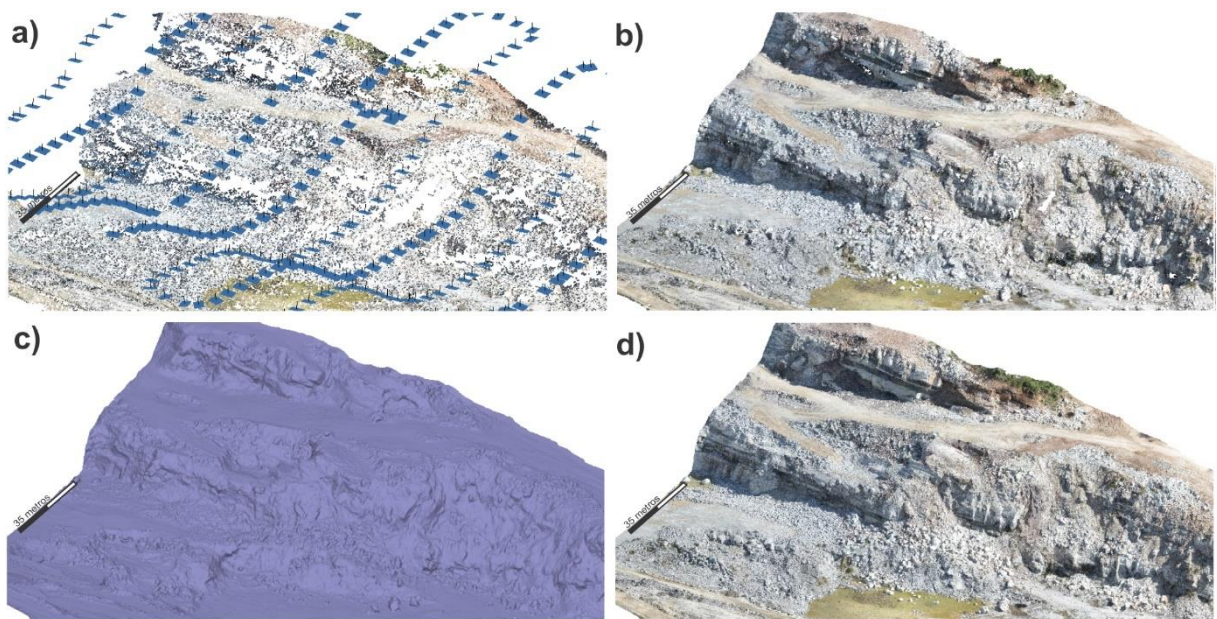
A terceira etapa do fluxo de trabalho é a geração da Nuvem Densa de Pontos (Fig. 13b). Os parâmetros utilizados no *software* para a construção da nuvem densa foram: qualidade “média” (resolução de trabalho nas fotos originais) e filtro de profundidade “moderado” (classificação e remoção de pontos discrepantes). Após, foram removidos manualmente os pontos locados fora do modelo.

Para a geração da malha triangulada (Fig. 13c) foram utilizados os parâmetros: tipo de superfície “arbitrária” (estima sobre o tipo de objeto que está sendo modelado); origem dos dados “nuvem densa” (especifica a origem do procedimento de geração de malha); contagem de faces “média” (especifica o número máximo de polígonos na malha final); e interpolação “ativa” (interpola algumas áreas de superfície dentro de um círculo de um determinado raio em torno de cada ponto da nuvem densa).

Para a texturização da malha (Fig 13d) os parâmetros foram: modo de mapeamento “genérico” (determina como a textura do objeto será compactada no atlas de textura); modo de mesclagem “mosaico” (seleciona a maneira como os valores de pixel de diferentes fotos serão combinados na textura final).



**Figura 13** – Fluxo de trabalho para geração dos MVA: a) alinhamento das câmeras e geração da nuvem esparsa de pontos; b) Densificação da nuvem de pontos; c) Geração da malha triangulada; d) texturização da malha triangulada texturizada.

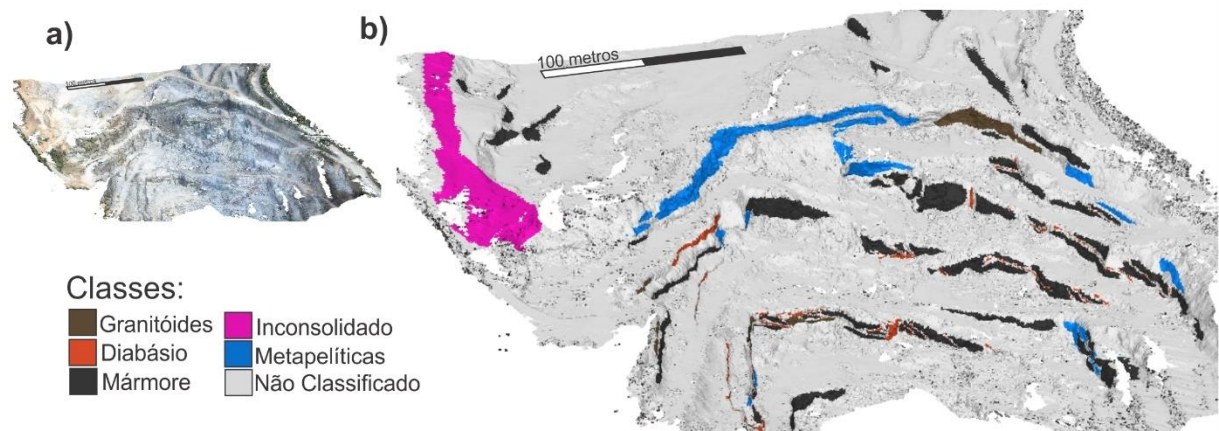


Fonte: autor

#### 7.4 Classificação litológica

A classificação das rochas no modelo foi feita a partir da nuvem densa de pontos e foi realizada no próprio Agisoft Photoscan através da ferramenta “atribuir classe”. Com a nuvem densa e auxílio das fotografias, foram reconhecidas as principais litologias aflorantes na cava (Fig. 14). Os pontos pertencentes a uma litologia definida foram demarcados e classificados. As rochas foram agrupadas em cinco classes diferentes: Mármore, Metapelíticas, Granitóides, Diabásio e Inconsolidado.

**Figura 14** – Etapa de classificação da nuvem de pontos com base nas principais litologias aflorantes na mina. Em a) Nuvem Densa de Pontos da região central da mina. Em b) a mesma região com as rochas classificadas no Photoscan.



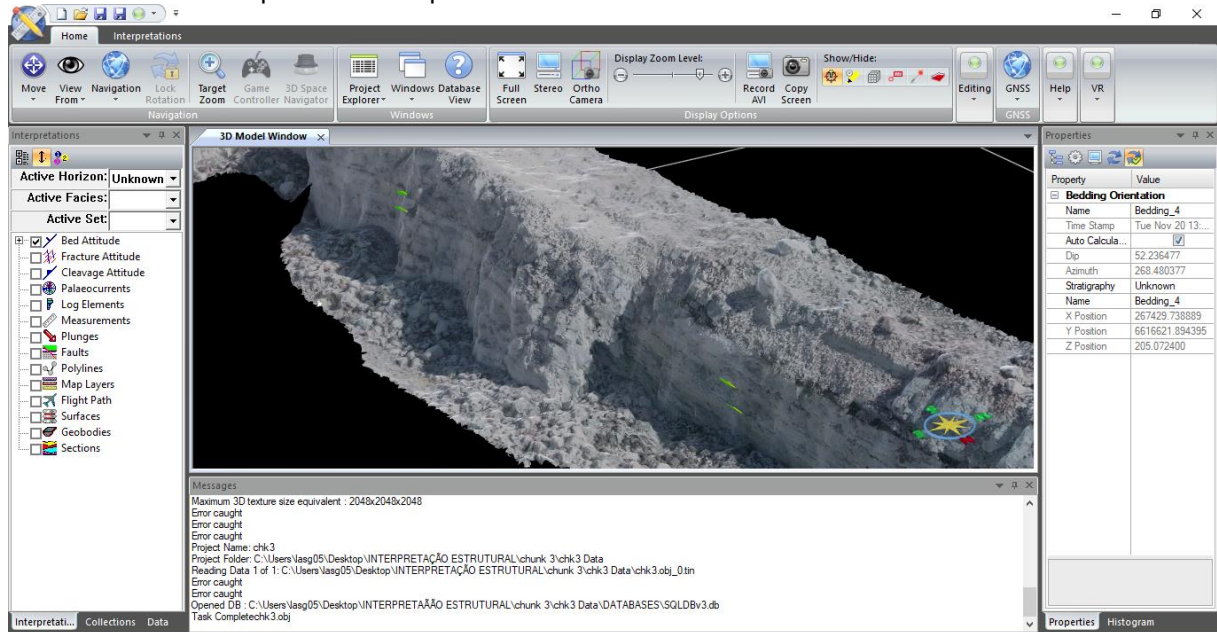
**Fonte:** autor

A classificação das rochas foi exportada a partir do Photoscan em formato de arquivo ASCII. Foram exportados um arquivo para cada tipo de rocha classificada. No arquivo ASCII constam as coordenadas X, Y, Z e a cor, no formato *RGB* (vermelho, verde e azul), de cada ponto. Esses arquivos foram utilizados no algoritmo interpolador na geração do modelo implícito, juntamente com os dados estruturais.

## 7.5 Interpretação Estrutural

A determinação da orientação espacial dos contatos litológicos e da foliação metamórfica foi feita de maneira remota, utilizando o *software Virtual Reality Geological Studio (VRGS)*. Inicialmente, as malhas trianguladas texturizadas das regiões de interesse foram importadas para na aplicação. A ferramenta “*Dip Azimuth*” permite a interpretação da orientação estrutural, e produz “discos” com a orientação dos planos através da Regra dos Três Pontos, ou do *Best-fit Plane* quando são usados mais de três pontos (Fig. 15).

**Figura 15** – Interface do *software* VRGS, utilizado na interpretação estrutural do modelo. Os discos de cor esverdeada representam os planos medidos utilizando a ferramenta *Best-fit Plan*.



Fonte: autor.

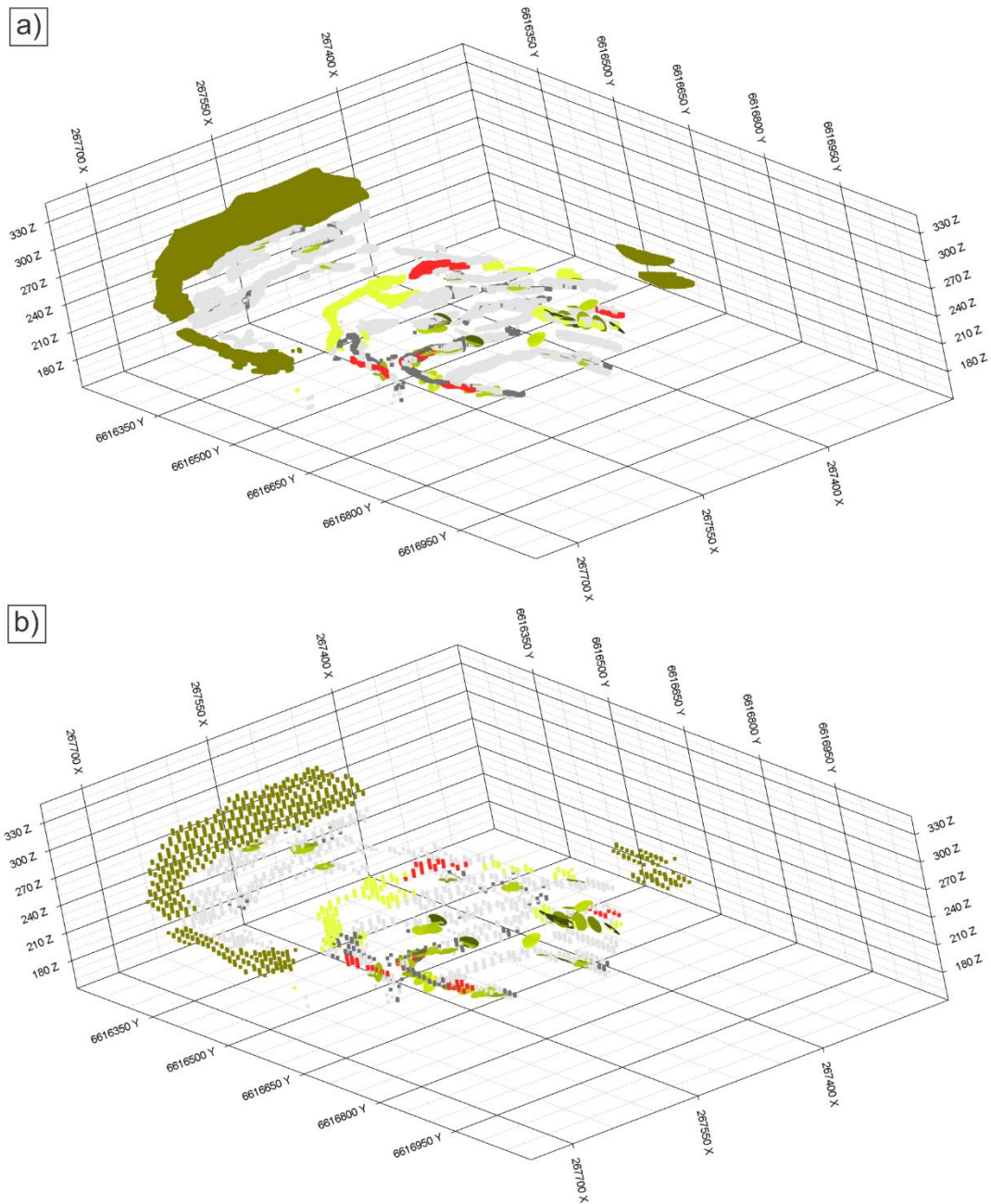
Os dados estruturais foram obtidos em regiões da cava onde as estruturas geológicas são visíveis (sem cobertura vegetal e de material particulado). Para isso, foram geradas malhas trianguladas texturizadas de alta resolução de porções específicas da mina. Ao todo, foram determinadas a orientação espacial de 57 planos de contato e 6 foliações metamórficas.

## 7.6 Integração dos Dados:

A nuvem de pontos e os dados estruturais foram exportados em formato ASCII e pré-processados utilizando scripts na linguagem R. Primeiramente, a nuvem de pontos foi condensada em uma malha de 10x10x2 m, a fim de reduzir o custo computacional. A nuvem foi reduzida de cerca de 46 milhões de pontos (Fig. 16a) para 2.823 pontos (Fig. 16b). Cada ponto foi classificado de acordo com a litologia dominante na sua vizinhança.



**Figura 16** – a) nuvem de pontos das litologias classificadas; b) nuvem de pontos condensada. Os discos representam as estruturas medidas.



**Fonte:** autor.

A modelagem implícita foi realizada de acordo com a metodologia descrita em Gonçalves; Kumaira; Guadagnin (2017), que incorpora a informação estrutural e fornece uma medida de incerteza do modelo. Foi definida a mesma malha de 10x10x2 m para a interpolação, restringindo a região a ser modelada a partir do modelo digital do terreno.

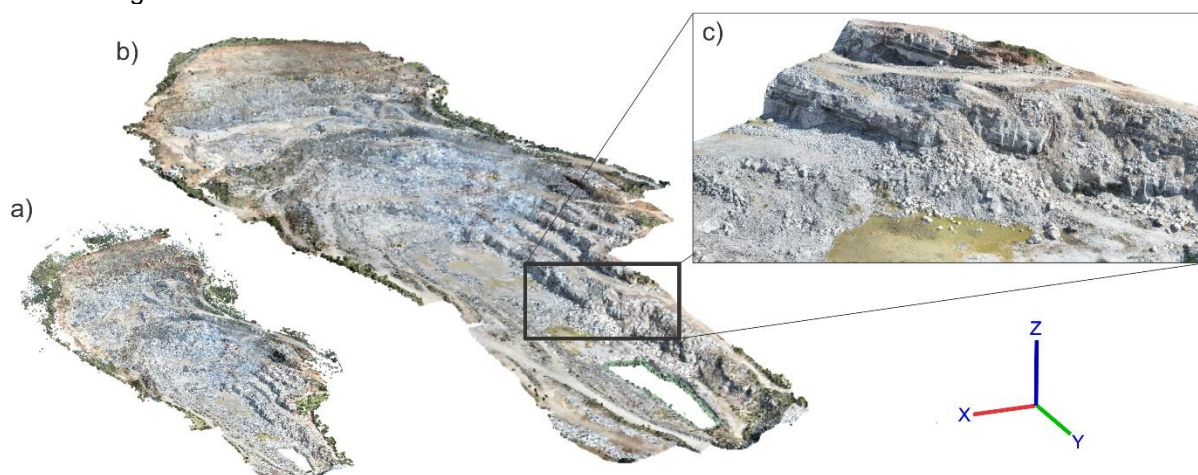
## 8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos ao longo de todo o projeto. Desde os modelos virtuais de afloramento e seus subprodutos, até os modelos geológicos tridimensionais, foco deste trabalho.

### 8.1 Modelo Virtual de Afloramento

A nuvem de pontos esparsa (Fig. 17a) gerada no processamento digital de imagens é composta por 2.820.636 pontos. A nuvem de pontos densa (Fig. 17b, Fig. 18) possui 414.287.367 pontos divididos em quatro sub-modelos (*chunks*). A malha triangulada texturizada (Fig. 17c), foi gerada em baixa resolução e contém 173.469 faces e 86.917 vértices. O erro do georreferenciamento foi medido pelo software Agisoft Photoscan, utilizando 10 dos 20 pontos de controle. O erro associado foi de 1,3 metros.

**Figura 17** – MVA gerados por fotogrametria digital a partir das fotografias aéreas: a) a nuvem de pontos esparsa, produto do alinhamento das câmeras; b) a nuvem de pontos densa; c) detalhe da malha triangulada texturizada.

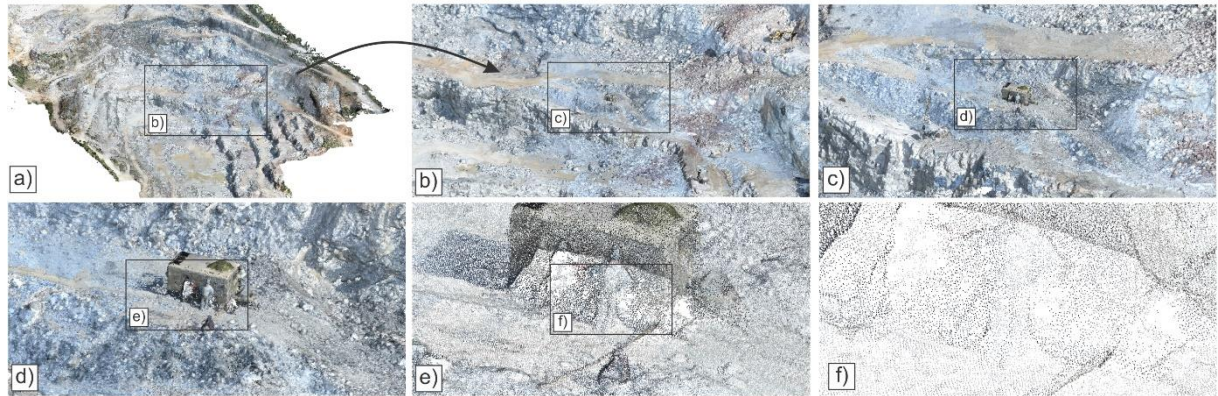


**Fonte:** autor.

O número de pontos na nuvem interfere diretamente no tempo de processamento e também na resolução do modelo. Um modelo com maior resolução permite a identificação de feições de menor dimensão, porém demanda mais tempo e capacidade de processamento. Nesse trabalho, foi gerada uma nuvem densa de pontos com resolução suficiente para classificar feições de tamanho decimétrico

(Fig. 18). Entretanto na escala de produção, tais feições nem sempre possuem representatividade.

**Figura 18** – Detalhe da nuvem densa de pontos. Nesta sequência de imagens, evidencia-se a resolução da nuvem densa: a) vista geral da cava; b) bancadas e vias de acesso; c) maquinário; d) operadores da máquina; e) e f) perda de conexão entre os pontos.



Fonte: autor.

## 8.2 Modelo Digital de Elevação

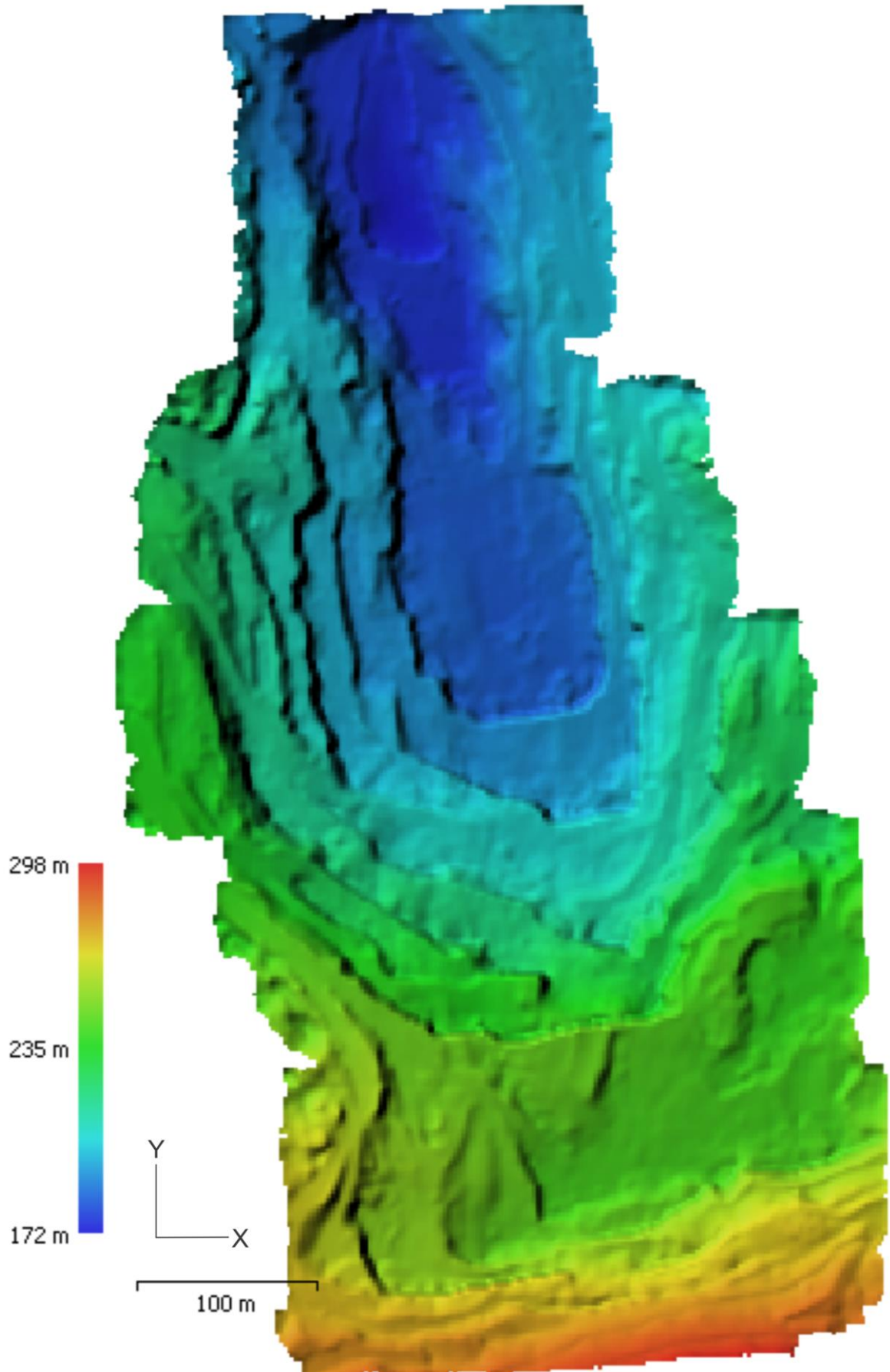
Foram gerados quatro MDE separados, com resolução de 3 cm/pixel. Na figura 19 está apresentado um MDE único da cava com resolução de 2 m/pixel.

## 8.3 Ortofotomosaico

Foram gerados quatro ortofotomosaicos separados com resolução de 0,8 cm/pixel. Na figura 20 está apresentado um ortofotomosaico única da cava com resolução de 10 cm/pixel.

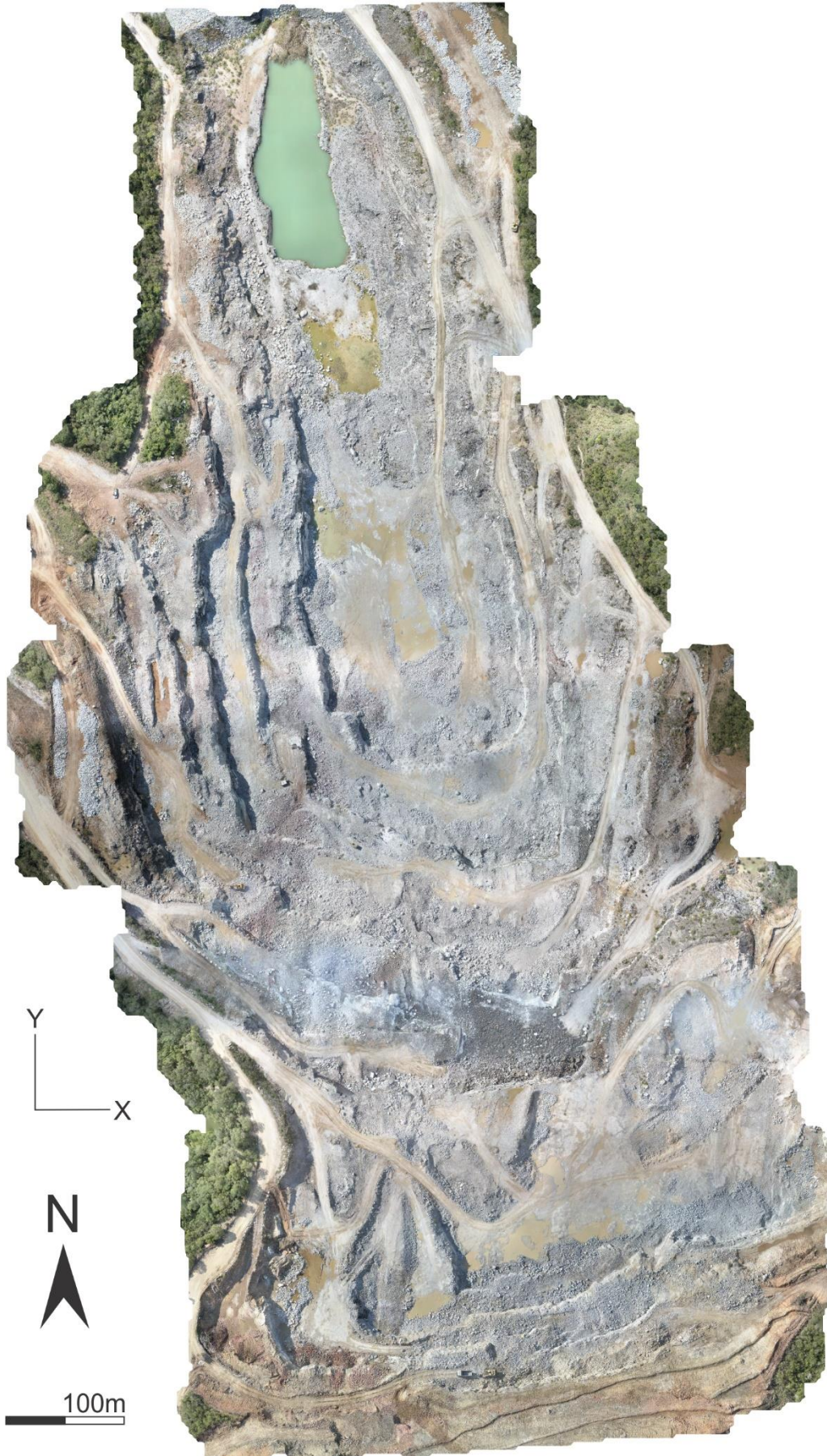


**Figura 19** – MDE da área de estudo.



Fonte: autor.

**Figura 20** – Ortofotomosaico da área de estudo.



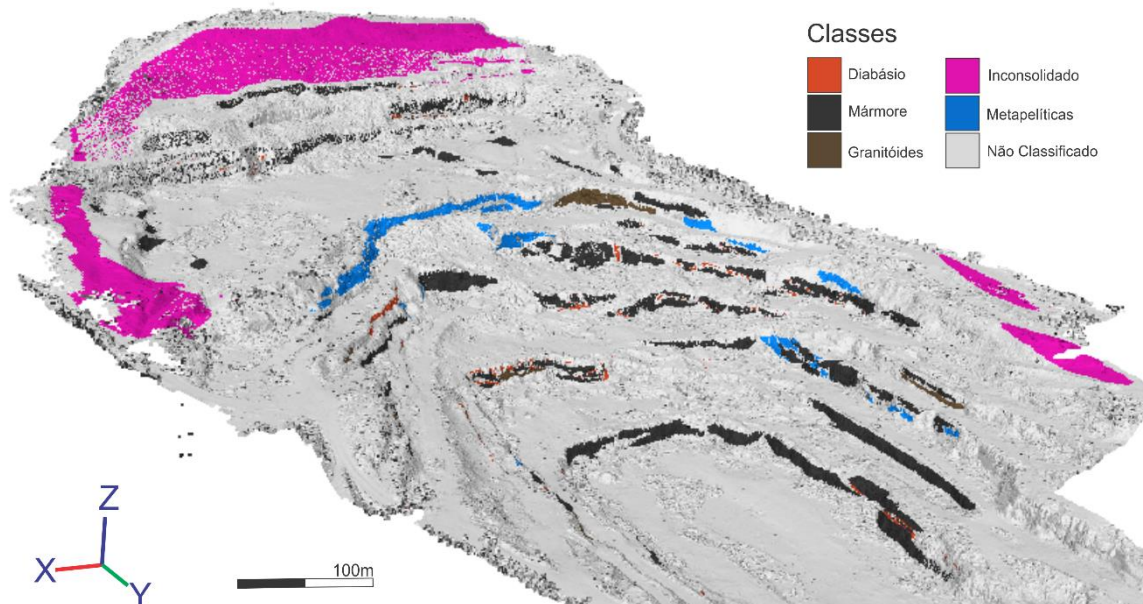
**Fonte:** autor.



## 8.4 Classificação Litológica

A classificação litológica (Fig. 21) a partir da Nuvem Densa de Pontos resultou em 1.343.052 pontos classificados como Diabásio; 1.119.570 pontos classificados como Granitóides; o Mármore foi representado por 17.331.035 pontos; Rochas Metapelíticas somaram um total de 2.901.365 pontos classificados e, o material Inconsolidado totalizou 23.179.688 pontos. Ao todo, foram classificados na área de estudo 45.874.710 pontos.

**Figura 21** – Região da nuvem de pontos com as litologias classificadas

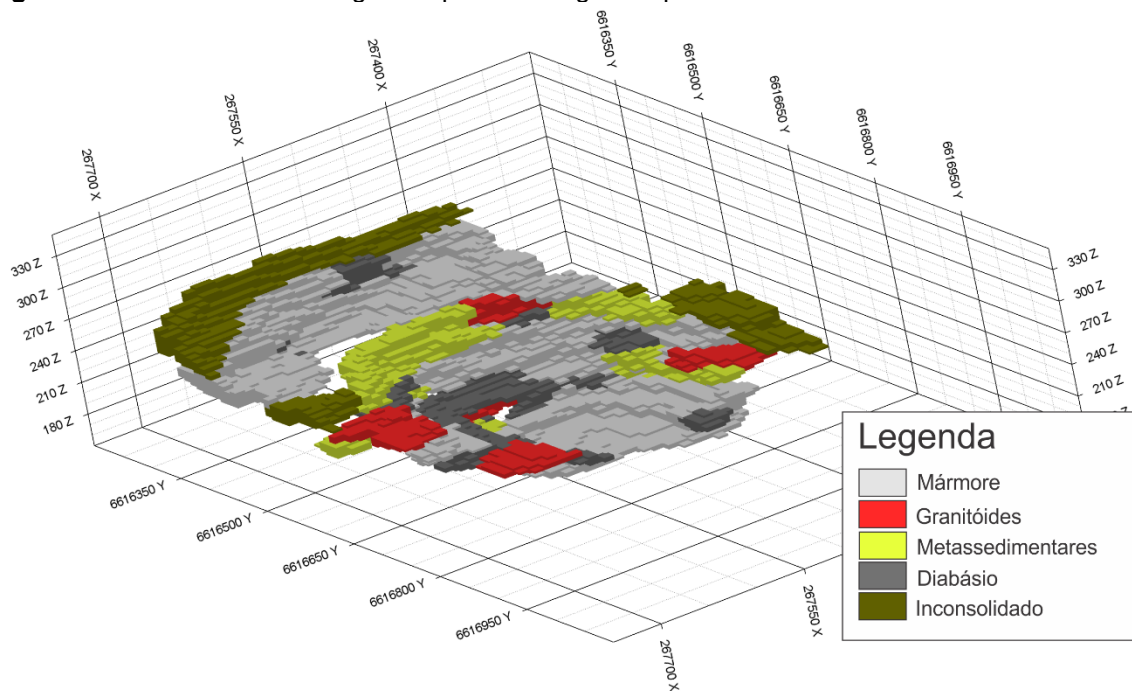


**Fonte:** autor.

## 8.3 Modelo geológico implícito

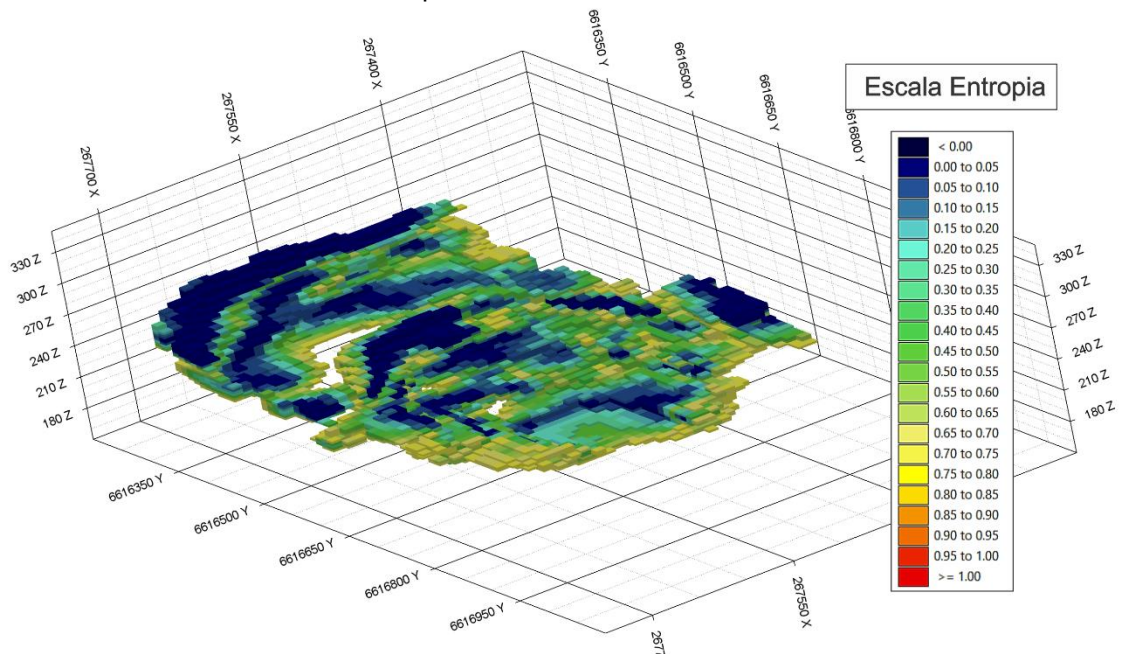
O modelo implícito fornece um valor de probabilidade para cada tipo de rocha. O nó da malha é classificado de acordo com a litologia de maior probabilidade (Fig. 22). A partir das probabilidades o modelo calcula a entropia relativa, uma medida da incerteza na modelagem (um valor entre 0 e 1). A entropia relativa pode ser interpretada como o grau de confiança que o usuário deposita no modelo. As Figuras 22 e 23 apresentam os nós da malha que se encontram abaixo do terreno e restritos à área do MDE, na forma de um modelo de blocos.

**Figura 22** – Modelo de blocos gerado por modelagem implícita.



Fonte: autor.

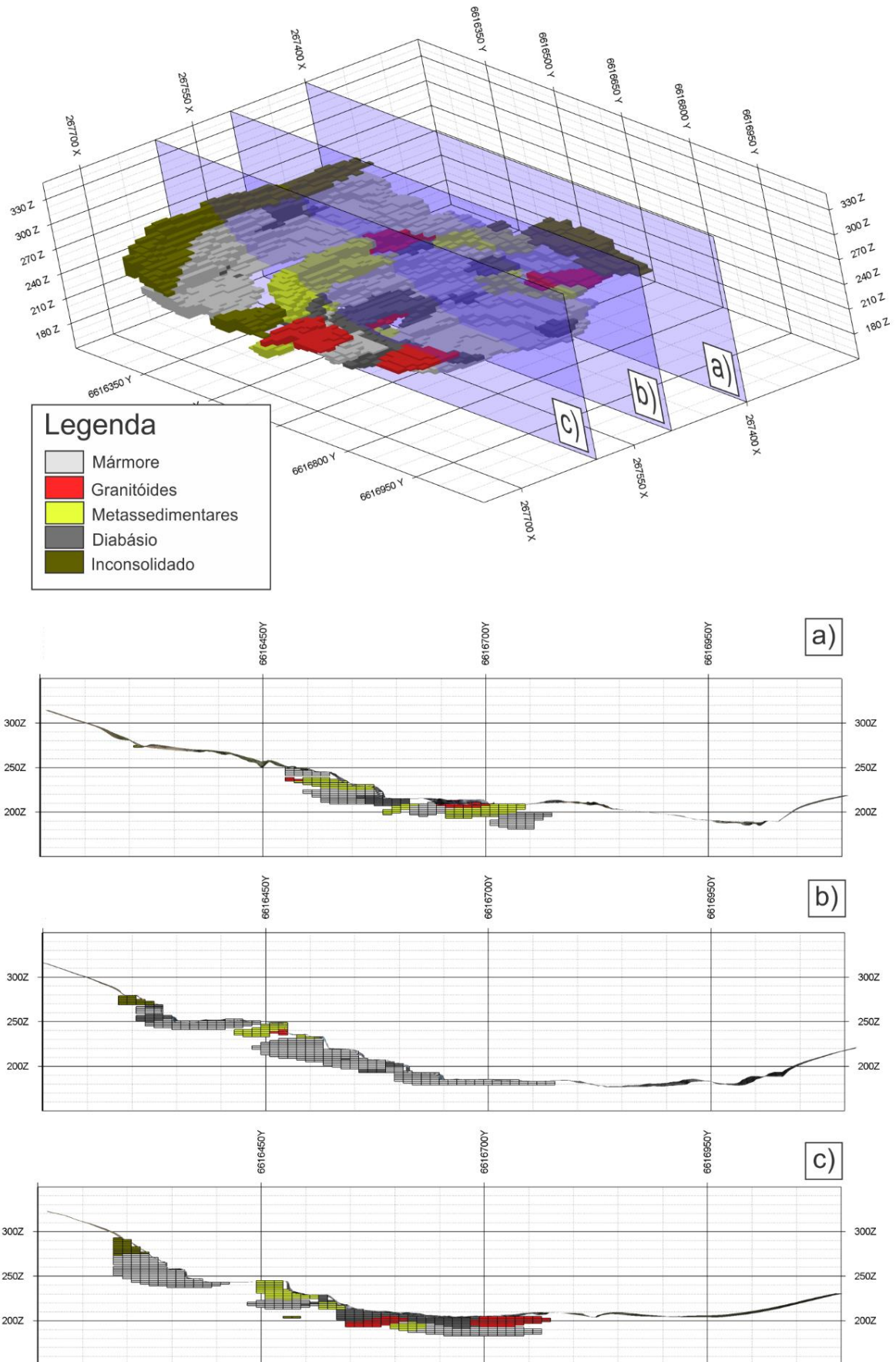
**Figura 23** – Modelo de blocos da entropia relativa.



Fonte: autor.

As figuras mostram o modelo restrito a um valor de entropia menor que 0,75. A figura 22 apresenta uma visão geral do modelo, enquanto que a figura 24 apresenta três seções de orientação N-S.

**Figura 24** – Vista em perspectiva do modelo de blocos e das três seções (a, b e c) de orientação N-S.



Fonte: autor.



O modelo permite fazer predições a uma distância do terreno de até 100 m na horizontal e 30 m na vertical, sendo 96 % dos pontos originais honrados pelo modelo (ou seja, com a litologia correta). O total de pontos válidos, considerando os limites da área e a entropia estabelecida, foi de 13.196, um aumento de cerca de 467% sobre a informação original de 2.823 pontos.

Supondo uma taxa de 1.000.000 m<sup>3</sup> de material movimentado por ano, o volume de rochas classificado pelo modelo seria suficiente para aproximadamente 10 anos de operação. Sendo assim, uma execução anual deste fluxo de trabalho seria suficiente para manter o modelo geológico atualizado e confiável.

Feições com dimensão menor que o espaçamento da malha estabelecida (10x10x2 m) foram suprimidas pelo modelo, principalmente os diques de diabásio. Uma resolução maior para o modelo de blocos seria desejável, porém o modelo implícito não é capaz de lidar com um volume de dados muito grande. Apesar disso, o modelo ainda pode ser utilizado na escala de lavra, para classificação de minério/estéril.

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aerofotogrametria digital mostrou-se interessante na construção de Modelos Virtuais de Afloramento em uma mina a céu aberto. A metodologia proposta para o processamento de imagens demonstrou eficiência e agilidade de trabalho aliada a baixos custos operacionais. O tempo necessário para concluir todas as etapas do fluxo de trabalho também pode ser apresentado como ponto forte deste projeto.

O modelo geológico 3D foi capaz de preencher um volume de 1.670.000 m<sup>3</sup> de mármore e 1.930.000 m<sup>3</sup> de outras rochas. Considerando a taxa de produção anual da empresa, esses valores representam mais de cinco anos de operação. No caso do mármore, problema proposto por este trabalho, o modelo implícito é uma alternativa viável para a quantificação de recursos na escala de produção. Com levantamentos periódicos (anuais, semestrais) é possível manter um modelo de blocos suficientemente confiável entre os levantamentos.

A modelagem geológica apresentada neste trabalho utiliza apenas dados de sensoriamento remoto e, com isso, representa uma quebra de paradigma nas geociências. Apesar de embrionária, a metodologia proposta apresentou resultados extremamente satisfatórios e com aplicabilidade direta no cotidiano de uma empresa mineradora. Para o futuro, espera-se que essa metodologia de modelagem possa ser melhorada, acrescentando novos dados (diretos ou indiretos), testando novas possibilidades e expandindo para outras áreas da geologia e da mineração.

Para o futuro, espera-se que este trabalho possa colaborar para a compreensão da distribuição de teores dentro da mina, auxiliando nas estimativas realizadas a partir dos dados de Potencial Neutralizador (PN), provendo uma melhor locação dos valores interpolados. Espera-se um resultado ainda melhor com a utilização de novos dados de campo, de campanhas de sondagens e dados de múltiplos levantamentos aéreos, georreferenciamentos mais precisos.

## REFERÊNCIAS

- Agisoft LLC. **Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition**. V. 1.4. St. Petersburg, Rússia. 2018. 127 p.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.B. **The Upper Precambrian of South America**. Boletim do Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 7: 45-80. 1976.
- BERETTA, F.; RODRIGUES, A.; PERONI, R.; COSTA, J. F. **Uso De Vant Para Automatização De Classificação Litológica Em Frente De Lavra A Céu Aberto**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINAS A CÉU ABERTO E MINAS SUBTERRÂNEAS, 9., 2018, Belo Horizonte.
- BITENCOURT. M.F. **Geologia, petrologia e estrutura dos metamorfitos da região de Caçapava do Sul, RS**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Geociências, UFRGS, Porto Alegre, 161p. 1983.
- BORTOLOTTI, O. J. **Petrologia dos Mármore de Caçapava do Sul, RS**. Dissertação de Mestrado. Área de Concentração Mineralogia e Petrologia. Instituto de Geociências USP. São Paulo. 1986.
- CARRIVICK, J. L.; SMITH, M. W.; QUINCEY, D. J. **Structure from Motion in the Geosciences**. Londres, Reino Unido: John Wiley & Sons, Ltd., 2016.
- CAUMON, G.; COLLO-DROUAILLET, P.; LE CARLIER DE VESLUD, C. VISEUR, S.; SAUSSE J. **Surface-Based 3D Modeling of Geological Structures**. Mathematical Geosciences, v.41, n.8, p. 927-945, 2009.
- CAUMON. G.; GRAY, G.; ANTOINE, C.; TITEUX, M. C. **3D implicit stratigraphic model building from remote sensing data on tetrahedral meshes: theory and application to a regional model of La Popa basin, NE Mexico**. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing v. 51, n. 3, p. 1613-1621, 2013.
- CAWOOD, A. J. **LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models**. Ed. 98. Journal of Structural Geology. P67-82. 2017.
- COELHO, F. L. C. T.; BRITO, J. L. N. e S. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro: EdUERJ, 196p. 2007.

COWAN, E.J., BEATSON, R.K., ROSS, H.J., FRIGHT, W.R., MCLENNAN, T.J., EVANS, T.R., CARR, J.C., LANE, R.G., BRIGHT, D.V., GILLMAN, A.J., OSHUST, P.A., T., M. **Practical implicit geological modelling. In: Dominy, S. (Ed.), Fifth International Mining Geology Conference Proceedings.** AusIMM, v.8, p. 89-99, 2003.

FERNÁNDEZ, O. **Obtaining a best fitting plane through 3D georeferenced data. Journal of Structural Geology** vol. 27. P 855-858. 2005.

FLACH, P. **Machine Learning: The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data.** 1st ed.. Cambridge University Press, Cambridge. 2012.

GONÇALVES, I. G., KUMARIA, S., GUADAGNIN, F. **A machine learning approach to the potential-field method for implicit modeling of geological structures.** Ed. 107. Computers & Geosciences. P173–182. 2017.

HARTMANN, L. A. *et.al.* **Magmatism and metallogeny in the crustal evolution of Rio Grande do Sul Shield, Brazil.** Pesquisas, 26: 45–63. 1999.

HARTMANN L. A.; CHEMALE, Jr., F.; PHILIPP, R.P. **Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano.** In: Frantz, J.C., Ianuzzi, R. (eds.), 50 anos de Geologia no Rio Grande do Sul, Porto Alegre: UFRGS-PETROBRÁS, p.97-123. 2007.

KUMAIRA, S. **Análise e Modelagem Estrutural do Domo de Brasília.** 2016. 102 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-graduação em Geociências. Porto Alegre. 2016.

LARY, D. J.; ALAVI, A. H.; GANDOMI, A. H., WALKER, A. L. **Machine learning in geosciences and remote sensing.** Ed. 7. Beijing. Geoscience Frontiers. P 3-10. 2016.

NARDI, L. V. S.; BITENCOURT, M. F. **Geologia, Petrologia e Geoquímica do Complexo Granítico de Caçapava do Sul, RS.** Revista Brasileira de Geociências. Volume 19. Porto Alegre: UFRGS, p154-169. 1989.

PHILIPP, R. P., BITENCOURT, M. F., JUNGES, S. L. **Nd isotopic study of the Neoproterozoic Vila Nova Arc, south Brazil: implication for evolution of the São Gabriel Belt.** Journal of South American Earth Sciences, Londres. 2011.

RAGAN, D. M. ***Structural Geology: An Introduction to Geometrical Techniques***. 4ª Edição. Nova York, EUA. Cambridge University Press, 2009.

RIBEIRO, M.; BOCCHI, P. R.; FIGUEIREDO, P. M.; TESSARI, R. L. 1966. ***Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul, Brasil***. Rio de Janeiro: DNPM/DFPM, Boletim 127, 232 p.

SIDES, E. J. ***Geological modelling of mineral deposits for prediction in mining***. Geologische Rundschau. Delft. Ed. 86. 342-353. 1997.

SOLIANI Jr, E.; KOESTER, E.; FERNANDES, L. A. D. ***A geologia isotópica do Escudo Sul-Rio-Grandense – Parte I: métodos isotópicos e valor interpretativo***. In: Holz, M.; De Ros, L. F. (Eds.). *Geologia do Rio Grande do Sul*. CIGO/UFRGS. Porto Alegre. p. 175–230. 2000.

TAVANI, S.; GRANADO, P.; CORRADETTI, A.; GIRUNDO M.; IANNACE, A.; ARBUÉS, P.; MUÑOZ J. A.; MAAZZOLI, S. ***Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in Google Earth via OpenPlot and Photoscan: Na example from the Khaviz Anticline (Iran)***. Computers & Geosciences, v. 63, p. 44-53, 2014.

TAVANI, S.; CORRADETTI, A.; BILLI, A. ***High precision analysis of an embryonic extensional fault-related fold using 3D orthorectified virtual outcrops: The viewpoint importance in structural geology***. Journal of Structural Geology. Vol.86. P 200-210. 2016.

VOLLGGER, S.A., CRUDEN, A.R., AILLERES, L., COWAN, E.J. ***Regional dome evolution and its control on ore-grade distribution: Insights from 3D implicit modelling of the Navachab gold deposit, Namibia***. Ore Geology Reviews v.69, p.268–284, 2015.

WU, Q., XU, H., ZOU, X., LEI, H. ***A 3D modeling approach to complex faults with multi-source data***. Computers & Geosciences, v. 77, p. 126–137, 2015.