

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

BRUNO FREDERICO QUINELO BUFREM

**APLICABILIDADE DO IMAGEAMENTO MULTIESPECTRAL POR DRONES  
ASSOCIADO A MODELOS DIGITAIS DE AFLORAMENTO**

Curitiba - PR

2024

BRUNO FREDERICO QUINELO BUFREM

**APLICABILIDADE DO IMAGEAMENTO MULTIESPECTRAL POR DRONES  
ASSOCIADO A MODELOS DIGITAIS DE AFLORAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Geologia, da Universidade Federal do  
Paraná, como requisito parcial para obtenção do grau  
de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Profa. Dra. Carolina Danielski Aquino

Coorientador: Ms. Leonardo Bachi

Curitiba - PR

2024

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a minha família, por me proporcionar a oportunidade de uma educação de qualidade ao longo da minha trajetória acadêmica. Nada seria possível sem o esforço e amor de meus familiares.

Agradeço a orientação da professora Carolina Aquino pela tutoria no desenvolvimento deste trabalho, também agradeço ao Leonardo Mairink Barão e ao Leonardo Bachi pela ajuda nas tarefas realizadas.

Meu profundo respeito e gratidão aos professores do curso de Geologia da Universidade Federal do Paraná, que nos formaram como profissionais e assumem diariamente a responsabilidade de construir uma sociedade mais digna, formando cidadãos que honrem o nome da instituição UFPR.

Agradeço a todos os meus colegas de curso, levarei amizades universitárias comigo para a vida toda. Não poderia ter desejado momentos mais memoráveis do que os que vivi ao lado de vocês nos campos e salas de aula.

Agradeço em especial à minha querida Nicole, por me ajudar ativamente nas atividades acadêmicas que demandaram tanto esforço.

Sou grato a todos que de alguma forma fizeram parte dessa jornada. Os ensinamentos recebidos durante a graduação vão muito além do âmbito acadêmico, e muitas pessoas contribuíram para essa fase de aprendizado e crescimento pessoal.

## RESUMO

O uso de drones nas geociências tem ganhado destaque tanto nos ramos profissionais quanto acadêmicos. A possibilidade de geração de Modelos Digitais de Afloramentos (MDA) por meio do sensoriamento remoto por drones trouxe significativos avanços na capacidade interpretativa de feições geológicas em maciços rochosos. Câmeras multiespectrais são ferramentas que podem ser acopladas em drones e seus dados fornecem informações qualitativas sobre materiais a partir das suas assinaturas espectrais e, apesar da utilização do sensoriamento multiespectral por drones ser bem estabelecida no mercado, principalmente no monitoramento ambiental e agrário, esse método ainda é pouco explorado no ramo da geologia. Esta pesquisa tem como objetivo avaliar a aplicabilidade de uma relação de bandas multiespectrais não convencional para o sensoriamento de afloramentos rochosos e compará-las aos métodos de imageamento convencional com imagens RGB, ambos aplicados a MDA's e interpretados em meio virtual. O levantamento de dados da pesquisa foi realizado numa cava de migmatito situada no município de São José dos Pinhais/PR. A pesquisa indica que a relação de bandas multiespectrais utilizada aponta ser menos eficaz que o imageamento convencional RGB para o mapeamento de variações litológicas, no entanto, pode ser uma ferramenta útil na definição de estruturas rúpteis que possuam rochas cominuídas e mais suscetíveis à percolação de água, como fraturas, falhas e zonas de cisalhamento. O estudo aprofundado da relação de bandas multiespectrais é recomendado para futuras pesquisas que visem obter características litológicas de maciços a partir do levantamento multiespectral por drones.

**Palavras-chave:** Sensoriamento remoto, Drones, Modelos Digitais de Afloramento, Multiespectral.

## ABSTRACT

The use of drones in geosciences has gained prominence in both professional and academic fields. The possibility of generating Digital Outcrop Models (DOMs) through drone-based remote sensing has brought significant advancements in the interpretative capacity of geological features in rock outcrops. Multispectral cameras, which can be mounted on drones, provide qualitative information about materials based on their spectral signatures. Although the use of multispectral imaging through drones is well established in the market, particularly in environmental and agricultural monitoring, this method remains underexplored in geology. This research aims to evaluate the applicability of a non-conventional multispectral band combination for the imaging of rock outcrops and to compare it with conventional RGB imaging methods, both applied to DOMs and interpreted in a virtual environment. Data collection for this study was conducted in a migmatite quarry located in São José dos Pinhais, Paraná, Brazil. The research indicates that the applied multispectral band combination is less effective than conventional RGB imaging for mapping lithological variations, however, it can be a useful tool for identifying brittle structures with comminuted rocks that are more susceptible to water percolation, such as fractures, faults and shear zones. A deeper study of multispectral band combinations is recommended for future research aimed at obtaining lithological characteristics of rock masses through drone-based multispectral surveys.

**Keywords:** Remote Sensing, Drones, Digital Outcrop Models, Multispectral.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Técnica de Structure from Motion (SfM). Utiliza várias fotografias sobrepostas para a construção da imagem 3D, em vez de apenas um par estereoscópico.....	11
Figura 2: Espectro eletromagnético com destaque para os intervalos utilizados no sensoriamento remoto espectral.....	12
Figura 3: Roseta de fraturas de afloramentos do Complexo Atuba, evidenciando as famílias NE-SW e NW-SE. “A” corresponde às fraturas da porção norte do Complexo Atuba. “B” corresponde às fraturas da porção sul do Complexo Atuba.....	14
Figura 4: Localização da área de estudo em São José dos Pinhais - PR com destaque para a rodovia de acesso principal BR-277.....	15
Figura 5: Imagem de satélite da Mineração São Matheus.....	16
Figura 6: Foto de uma das frentes de lavra da Mineração São Matheus, local selecionado para o levantamento de dados.....	17
Figura 7: Drone DJI Mavic 3M, modelo utilizado no levantamento desta pesquisa.....	17
Figura 8: Configurações do plano de voo sendo feitas no controle do drone pela Profa. Dra. Carolina Aquino.....	18
Figura 9: Trajeto percorrido pelo drone no voo manual, paralelamente às bancadas.....	19
Figura 10: Fluxograma de comandos utilizados no software Agisoft Metashape Pro para a geração de Modelos Digitais de Afloramento.....	19
Figura 11: Imagens da mesma frente de lavra com pontos de visão diferentes, o software reconhece pontos em comum das duas imagens para fazer o alinhamento das fotos.....	20
Figura 12: Nuvem de pontos com o alinhamento das fotos em azul.....	20
Figura 13: Função de Fractures Mode do Software VRGS.....	21
Figura 14: Processo de interpretação de feições no VRGS, em A o traçado da feição a ser ressaltada, no caso o contato entre um dique e o migmatito. Em B o plano gerado pelo software representado por um elipsoide com direção e mergulho.....	22
Figura 15: Linearidade de respostas espectrais traçadas.....	23
Figura 16: Porção do MDA em RGB destacando as estruturas traçadas com os respectivos elipsoides.....	23
Figura 17: Modelos Digitais de Afloramento em RGB (superior) e multiespectral (inferior) da bancada a ser interpretada.....	24
Figura 18: MDA geral da cava da Mineração São Matheus, vista superior.....	25
Figura 19: Print do MDA em RGB evidenciando a interpretação das estruturas Fr1.....	26
Figura 20: Estereograma de Schmidt-Lambert e diagrama de roseta das atitudes Fr1.....	26
Figura 21: Print do MDA em RGB evidenciando a interpretação das estruturas Fr2.....	27
Figura 22: Estereograma de Schmidt-Lambert e diagrama de roseta das atitudes Fr2.....	27
Figura 23: Print do MDA em RGB destacando as feições de falha.....	28
Figura 24: Estereograma de Schmidt-Lambert e diagrama de roseta das atitudes da falha.....	28
Figura 25: Print do MDA em RGB destacando as feições de contato dos diques.....	29
Figura 26: Estereograma de Schmidt-Lambert e diagrama de roseta das atitudes dos diques.	30
Figura 27: Estereograma de Schmidt-Lambert e diagrama das feições interpretadas no multiespectral.....	31
Figura 28: Porção do MDA multiespectral destacando a maior concentração de respostas espectrais linearizadas, posteriormente correlacionadas à zona de falha do modelo RGB.....	31
Figura 29: Comparativo das estruturas Fr1 e Fr2 nas imagens RGB e multiespectral, na	

porção inferior esquerda da imagem multiespectral observa-se o ocultamento das feições rochosas devido a maior cobertura de vegetação e solo.....	33
Figura 30: Comparativo dos diagramas de roseta das estruturas Fr1 e Fr2 traçadas no modelo RGB (esquerda) e das feições traçadas no modelo multiespectral (direita).....	34
Figura 31: Comparativo das imagens RGB e multiespectral evidenciando um dos diques observados.....	34
Figura 32: Observação em diferentes escalas do MDA multiespectral evidenciando a zona de falha como uma das mais importantes estruturas observadas em linearidade e índice de reflectância.....	35
Figura 33: Interpretação cinemática da zona de falha a partir de suas estruturas internas que indicam movimento de falha inversa.....	36

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ANM - Agência Nacional de Mineração
- ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
- CPRM-SGB - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil
- DGEOL - Departamento de Geologia
- LABAP - Laboratório de Análise de Bacias
- NDVI - Normalized Difference Vegetation Index
- RGB - Red Green Blue
- SfM-MVS - Structure from Motion - Multi View Stereo
- SWIR - Short Wave InfraRed
- UFPR - Universidade Federal do Paraná
- VANT's - Veículos Aéreos Não Tripulados
- VNIR - Visible and Near InfraRed
- VRGS - Virtual Reality Geological Study

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
1.1. JUSTIFICATIVA.....	9
1.2. OBJETIVOS.....	10
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>11</b>
2.1. FOTOGRAMETRIA.....	11
2.2. IMAGEAMENTO MULTIESPECTRAL.....	12
2.3. MODELOS DIGITAIS DE AFLORAMENTO.....	13
2.4. GEOLOGIA LOCAL.....	14
2.5. ÁREA DE ESTUDO.....	14
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>16</b>
3.1. PLANEJAMENTO.....	16
3.2. COLETA DE DADOS.....	17
3.3. PROCESSAMENTO DE DADOS.....	19
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>24</b>
4.1. MODELOS DIGITAIS DE AFLORAMENTO.....	24
4.2. INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA.....	25
4.2.1. Modelo RGB.....	25
4.2.2. Modelo multiespectral.....	30
<b>5. DISCUSSÃO.....</b>	<b>32</b>
5.1. ANÁLISE COMPARATIVA.....	32
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>36</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>39</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O registro visual nos estudos geológicos sempre foi muito importante para ilustrar conceitos abstratos e melhorar a compreensão do leitor em relação ao assunto abordado. Nos últimos anos, o desenvolvimento de novos métodos de imageamento através de VANT's (Veículos Aéreos Não Tripulados) como drones, capacitou o geólogo de visualizar com detalhe porções antes inacessíveis do terreno. Os drones têm a vantagem de poder ser equipados tanto com câmeras convencionais RGB, quanto multiespectrais.

Os sensores multiespectrais são dispositivos que permitem a captura de imagens em várias bandas espectrais, desde o ultravioleta até o infravermelho. Cada banda traduz informações qualitativas sobre as propriedades dos objetos, possibilitando a distinção de materiais e características composicionais com base em suas assinaturas espectrais. A utilização de drones com câmeras multiespectrais é bem estabelecida no mercado, principalmente no monitoramento ambiental e agrário, sendo que na geologia, esse sensor ainda é pouco explorado.

No ramo das geociências, um dos principais produtos gerados pelo imageamento por drones são os Modelos Digitais de Afloramento (MDA). Os MDA são representações tridimensionais de afloramentos rochosos obtidas por técnicas de sensoriamento remoto e fotogrametria, essas técnicas permitem capturar com alto detalhe a geometria do objeto de estudo, possibilitando a análise e interpretação de feições estruturais, estratigráficas e texturais das rochas.

Este trabalho tem como objetivo comparar os métodos de imageamento convencional e multiespectral obtidos a partir de levantamentos realizados por drones e aplicados em MDA's, analisando suas semelhanças, diferenças e aplicabilidades sob a perspectiva da interpretação geológica em meio virtual. O afloramento rochoso levantado neste estudo corresponde a uma cava de migmatito localizada no município de São José dos Pinhais, Paraná.

### 1.1. JUSTIFICATIVA

Apesar da utilização do imageamento multiespectral no sensoriamento remoto ser bem estabelecida e utilizada tanto no mercado quanto na academia, principalmente através de sistemas de satélite, são poucos os estudos que relatam a

utilização dos sensores multiespectrais associados a drones e aplicados a Modelos Digitais de Afloramento no ramo das geociências.

O rápido avanço da utilização de drones no mercado tende a gerar procura por novos métodos mais precisos de sensoriamento, especialmente em áreas de difícil acesso, essa abordagem tem se mostrado útil na modelagem geológica, exploração mineral, geologia ambiental, geotecnia, entre outras. Portanto, o desenvolvimento de pesquisas que integrem o sensoriamento multiespectral com MDA's pode ser essencial para a consolidação de novas tecnologias nas geociências.

Ainda não é bem reconhecido de que forma a associação dessas ferramentas pode contribuir para o profissional geólogo e quais são suas aplicabilidades exatas. Faz-se necessário o estudo de relações de bandas multiespectrais para identificar feições que podem ser de interesse numa escala de afloramento ou, como no caso deste estudo, em uma frente de lavra.

## 1.2. OBJETIVOS

O objetivo da pesquisa é avaliar o uso do imageamento multiespectral por drones como uma ferramenta potencial para identificar características de afloramentos rochosos. Pretende-se utilizar uma relação de bandas não convencional para o sensoriamento de corpos rochosos, com a finalidade de delinear quais feições são ressaltadas na imagem multiespectral em comparação com as imagens convencionais RGB.

Para a execução desta tarefa, será gerado um MDA onde as imagens poderão ser interpretadas tridimensionalmente e em alto detalhe, visando identificar quais feições são destacadas em cada tipo de imageamento e discutir a aplicabilidade dessas análises no âmbito geológico profissional.

Os objetivos específicos incluem:

- Relatar a evolução do processo de pesquisa.
- Gerar um modelo tridimensional virtual de afloramento com imagens RGB e multiespectrais associadas.
- Fazer a comparação de cunho geológico dos levantamentos.
- Expor a aplicabilidade dos métodos.

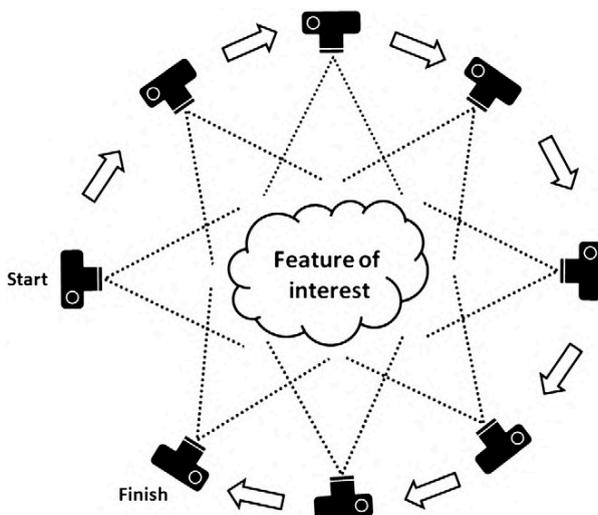
## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. FOTOGRAMETRIA

As técnicas de fotogrametria são amplamente utilizadas na modelagem de afloramentos como forma de obter imagens tridimensionais a partir de imagens bidimensionais, esse processo tem como base os fundamentos da estereoscopia, esse fenômeno possibilita a noção de volume e distância na visão humana a partir da diferença de perspectiva de cada olho (Maschio, 2008).

A fotogrametria digital utiliza do mesmo princípio para identificar pontos correspondentes entre imagens diferentes e triangular as linhas de visão através de algoritmos computacionais como o *Structure from Motion - Multi View Stereo* (SfM-MVS). Blistan et al (2016) corrobora a utilização dessas ferramentas para a geração de MDA's em *softwares* de modelagem.

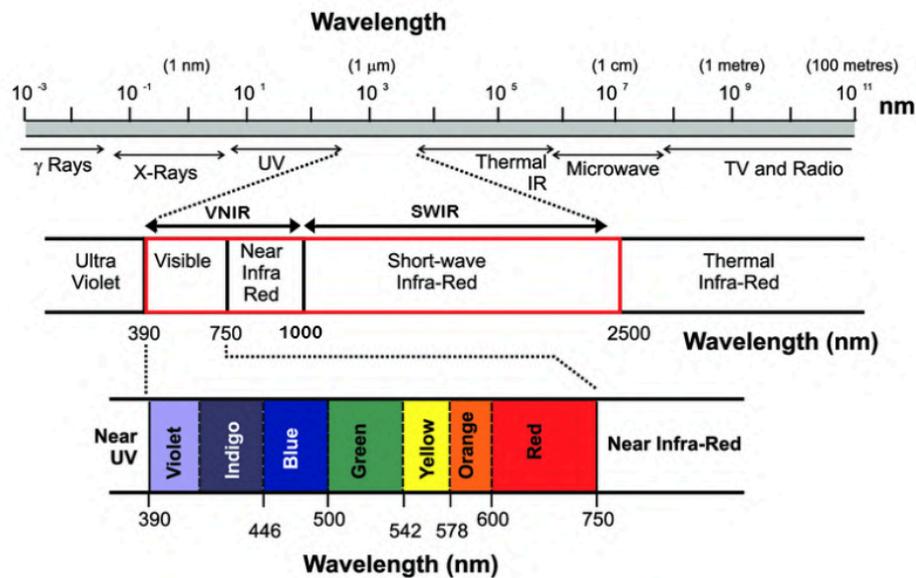
Viana (2021) apresenta o SfM-MVS como uma forma de levantamento fotogramétrico que realiza a marcação de pontos notáveis, os quais chama de feição, em cada imagem do espaço, a fim de correlacionar coordenadas geográficas repetidas vezes e individualmente no objeto para, em seguida, transformar uma imagem bidimensional em uma tridimensional. O SfM-MVS compila todos esses dados simultaneamente devido às múltiplas fotografias em sobreposição (figura 1), os pontos 3D são reconhecidos por um sistema de coordenadas relativo, em que se associa o “espaço da imagem” ao “espaço do objeto real” através dos ground-control points (GCPs) no solo (Westoby et al. 2012).



**Figura 1:** Técnica de *Structure from Motion* (SfM). Utiliza várias fotografias sobrepostas para a construção da imagem 3D, em vez de apenas um par estereoscópico. Fonte: Westoby et al. 2012

## 2.2. IMAGEAMENTO MULTIESPECTRAL

O imageamento multiespectral é uma técnica de sensoriamento remoto que captura imagens em bandas espectrais específicas, desde o espectro visível até o infravermelho próximo. Clark (1999) refere-se às bandas espectrais como pacotes de comprimentos de onda ao longo do espectro eletromagnético, no sensoriamento remoto as bandas utilizadas vão desde o ultravioleta (1-390 nm) até o infravermelho distante (30.000 nm - 1 mm), sendo as bandas do espectro VNIR (*Visible - Near Infrared*) e SWIR (*Short Wave Infrared*) as mais utilizadas no sensoriamento remoto (Barnes, 2020) (Clark, 1999), como exemplificado na imagem a seguir:



**Figura 2:** Espectro eletromagnético com destaque para os intervalos utilizados no sensoriamento remoto espectral. Fonte: Barnes, 2020.

Cada banda reflete informações específicas sobre as propriedades dos objetos, permitindo distinguir materiais e características superficiais com base em suas assinaturas espectrais em determinada banda, a imagem multiespectral difere da hiperespectral ao passo que esta faz a captura contínua do espectro em milhares de bandas muito mais estreitas (Chang, 2003). Coulter et al. (2017) expõe que ambos os métodos têm suas vantagens e desvantagens no levantamento, já em relação à qualificação do objeto de estudo, as imagens hiperespectrais tendem a diferenciar espécies minerais enquanto os sensores multiespectrais detectam melhor as assinaturas dos grupos minerais como silicatos, carbonatos, óxidos, etc.

As imagens multiespectrais vêm sendo utilizadas nas geociências desde a década de 80 a partir de satélites do sistema LANDSAT e ASTER com foco no mapeamento de zonas de alteração em sistemas mineralizadores de escala regional (Ashley & Abrams, 1980). Durante a fase LANDSAT geólogos desenvolveram relações de bandas que refletiam a quantidade de óxidos de ferro e hidroxilas, gerando imagens que podiam rastrear regiões potencialmente mineralizadas. Ainda com o mesmo objetivo, os canais do sistema ASTER foram utilizados para mapear fácies de alteração de sistemas hidrotermais (Van Der Meer et al. 2012).

O uso de drones com sensores multiespectrais na documentação de afloramentos rochosos é relativamente pouco observado na bibliografia. Barnes (2020) e Jackisch et al. (2021) aplicam a técnica e citam sobre a relação de bandas VNIR na identificação de minerais de alteração ricos em ferro oriundos de rochas vulcânicas, ambos os autores apontam relações de bandas que podem ressaltar óxidos e argilas ricas em ferro, são elas: 735/790nm; 660/550nm e 760/930nm.

Para este estudo, foi utilizada a relação de bandas NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) que é processada automaticamente pelo drone utilizado neste levantamento, o índice NDVI é amplamente utilizado no monitoramento agrícola pois reflete a densidade e hidratação da vegetação analisada. A relação de bandas utilizada para o índice NDVI segundo a empresa fornecedora do drone utilizado é a seguinte:

$$NDVI = \frac{NIR_{ref} - Red_{ref}}{NIR_{ref} + Red_{ref}}$$

Onde *NIR<sub>ref</sub>* é a banda infravermelha próxima e *Red* é a banda vermelha.

### 2.3. MODELOS DIGITAIS DE AFLORAMENTO

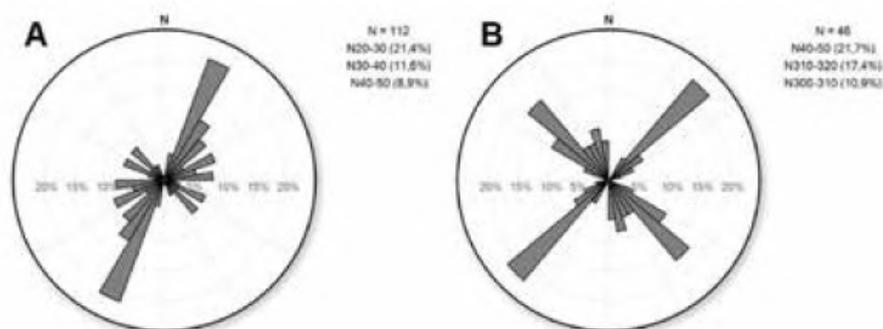
A geração de MDA's envolve a utilização dos princípios da técnica SfM-MVS previamente citados. Inicialmente, O SfM gera a perspectiva tridimensional identificando e interpolando características entre imagens, ajustando posições e parâmetros das câmeras e gerando uma nuvem esparsa de pontos 3D (Viana, 2021). Em seguida, o algoritmo de MVS gera uma nuvem de pontos densa a partir da orientação e tonalidade dos pixels das imagens, aumentando a quantidade de pontos processados na geração do modelo (Bachi, 2022). A etapa final de geração do modelo inclui a texturização do modelo a partir dos arquivos fotográficos. O

processamento de MDA's normalmente exige alto poder computacional devido ao processamento simultâneo de tarefas e imagens (Bemis et al. 2014).

## 2.4. GEOLOGIA LOCAL

O região de estudo está geologicamente contextualizado nas rochas do Complexo Atuba do Terreno Curitiba, local onde predominam rochas migmatíticas de composição biotita-anfibólio-gnaiss com leucossomas tonalito-granodiorito (Basei et al., 1992; Siga Jr. et al., 1995). A região tem alto potencial para mineração de brita para construção, assim como outros materiais agregados como areia e argila. (Chierigati, 2017).

Baldin et al. (2021) estuda as estruturas rúpteis do Complexo Atuba em diversas pedreiras de Curitiba e Região Metropolitana, os resultados geofísicos e de campo demonstram duas famílias de fraturas principais em NE-SW e NW-SE (figura 3) com mergulhos subhorizontais a subverticais, essas fraturas podem ser abertas ou apresentar preenchimento por óxidos de ferro.



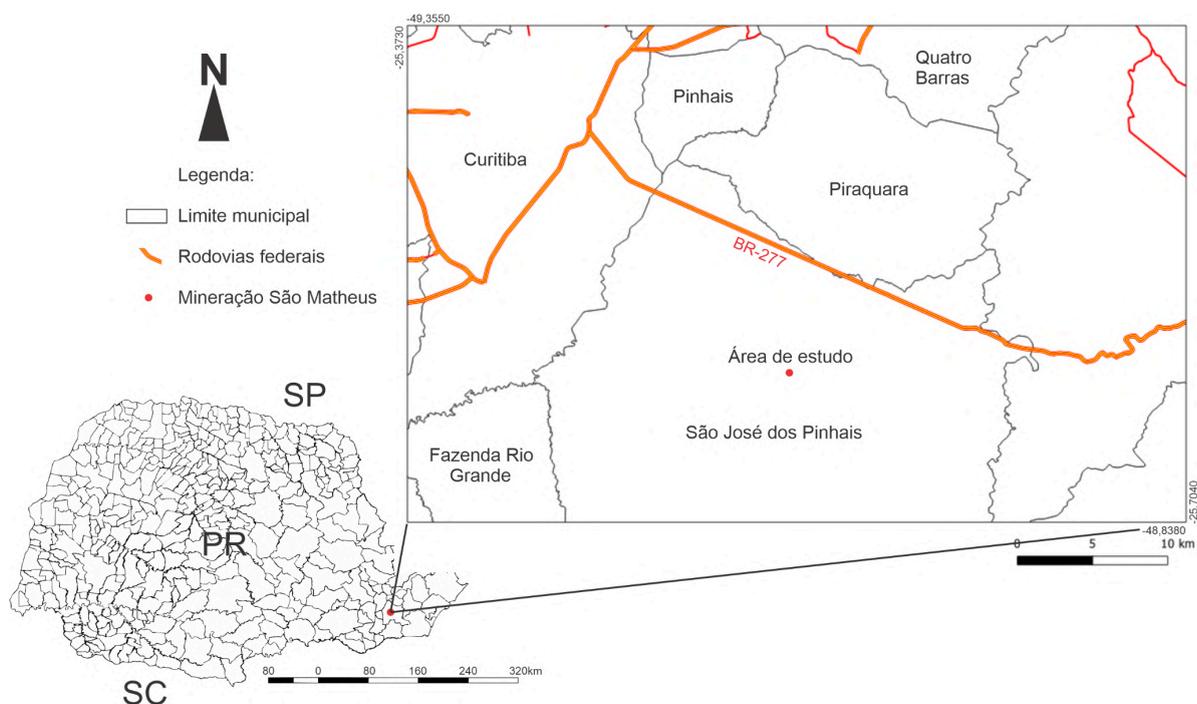
**Figura 3:** Roseta de fraturas de afloramentos do Complexo Atuba, evidenciando as famílias NE-SW e NW-SE. "A" corresponde às fraturas da porção norte do Complexo Atuba. "B" corresponde às fraturas da porção sul do Complexo Atuba. Fonte: Baldin et al. 2021

## 2.5. ÁREA DE ESTUDO

O local de estudo definido foi a Mineração São Matheus, situada no município de São José dos Pinhais/PR, a aproximadamente 30km do centro de Curitiba (figuras 4 e 5).

Trata-se de uma saibreira que tem como produto principal a comercialização de brita e, secundariamente, cascalho e argila caulínica oriunda da alteração intempérica do maciço. A principal via de acesso à partir de Curitiba é pela rodovia

BR-277 sentido São José dos Pinhais, no quilômetro 62 pega-se a saída 63, percorre-se no sentido sul por 6 quilômetros até a rua João Bortolan, segue-se por 1 quilômetro no sentido oeste até a Rua Caramuru onde segue-se no sentido sul por 2,2 quilômetros até chegar na pedreira.



**Figura 4:** Localização da área de estudo em São José dos Pinhais - PR com destaque para a rodovia de acesso principal BR-277.



**Figura 5:** Imagem de satélite da Mineração São Matheus. Fonte: *Google Earth*.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa contou com três fases principais de desenvolvimento sendo estas as fases de planejamento, levantamento e processamento de dados. Todas as etapas do trabalho contaram com o apoio e infraestrutura do LABAP-UFPR (Laboratório de Análises de Bacias da Universidade Federal do Paraná).

#### 3.1. PLANEJAMENTO

Durante a fase de planejamento foram definidos os objetivos iniciais e os alvos da pesquisa, além de realizados contatos e procedimentos para obter o acesso legal à área de estudo. Nessa etapa, também foram conduzidas as primeiras pesquisas bibliográficas, com foco principalmente nos métodos de uso e aplicação do levantamento por drones com imageamento multiespectral.

A área de estudo foi selecionada a partir da consulta de fontes públicas da CPRM e ANM (informes minerais e SIGmine), assim como da análise de imagens de satélite através do *Google Earth*. Após essa consulta preliminar, foi feita uma excursão ao local selecionado para confirmar a viabilidade de execução do projeto no local selecionado (figura 6).



**Figura 6:** Foto de uma das frentes de lavra da Mineração São Matheus, local selecionado para o levantamento de dados.

### 3.2. COLETA DE DADOS

Para a coleta de dados foi utilizado o drone *DJI Mavic 3M Multispectral Enterprise* (Mavic 3M) (figura 7) cedido pelo LABAP-UFPR. O aparelho conta com câmeras RGB e multiespectrais com as seguintes especificações:

Câmera RGB:

- **Lente:** Campo de visão (FOV): 84° Distância focal equivalente: 24 mm
- **Dimensões máximas da imagem:** 5280 × 3956.
- **Modo de foto:** Disparo único: 20 MP; Timelapse: 20 MP

Câmera multiespectral:

- **Número de bandas:** 4
- **Bandas multiespectrais:** Verde (G): 560 ± 16 nm; Vermelho (R): 650 ± 16 nm; Borda Vermelha (RE): 730 ± 16 nm; Infravermelho próximo (NIR): 860 ± 26 nm.
- **Dimensões máximas da imagem:** 2592 × 1944.
- **Modo de foto:** Disparo único: 5 MP; Timelapse: 5 MP



**Figura 7:** Drone DJI Mavic 3M, modelo utilizado no levantamento desta pesquisa. Fonte: SZ DJI Technology Co., Ltd.

A excursão a campo para a coleta de dados (figura 8) foi realizada na manhã do dia 5 de julho de 2024. Além da professora orientadora Dra. Carolina Danielski Aquino, o levantamento contou com a experiência do geólogo Dr. Leonardo Mairink Barão.

O levantamento ocorreu entre 11h e 13h, sendo um horário favorável para a melhor distribuição da luz solar. As condições climáticas estavam nubladas e estáveis, o que contribuiu para a qualidade das fotos visto que o sombreamento era praticamente nulo nessas condições.



**Figura 8:** Configurações do plano de voo sendo feitas no controle do drone pela Profa. Dra. Carolina Aquino.

Foram feitos dois planos de voo em linhas paralelas para capturar toda a extensão da cava, um com captura de fotos ortogonais e outro com inclinação da câmera em  $75^\circ$ , a diferença de ângulo entre fotos do mesmo objeto é importante para o programa reconhecer melhor as feições de perspectiva e gerar um modelo tridimensional mais preciso. Os voos programados foram feitos automaticamente pelo drone, não sendo necessário o controle manual do veículo.

O voo ortogonal obteve 1907 fotos com resolução de 0,81 cm por pixel numa altura de voo de 30m. O voo inclinado a  $75^\circ$  obteve 776 fotos com 2,5 cm por pixel de resolução numa altitude de 55m.

Além dos voos programados foram feitos voos manuais para a captura das bancadas da cava, nesses voos foram feitas as fotos multiespectrais, as capturas ocorreram paralelamente à direção dos taludes e de baixo para cima conforme

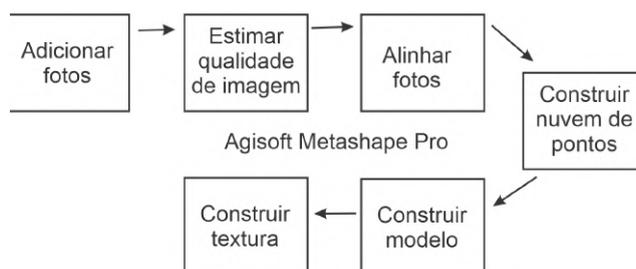
ilustrado na figura 9. As fotos foram tiradas com uma distância média do objeto de 2,5m, e a sobreposição tanto lateral como vertical foi de aproximadamente 80%.



**Figura 9:** Trajeto percorrido pelo drone no voo manual, paralelamente às bancadas.

### 3.3. PROCESSAMENTO DE DADOS

As fotos obtidas foram inicialmente processadas no *software Agisoft Metashape Professional*, com a licença oficial do LABAP. O aplicativo funciona com base em um fluxo de trabalho intuitivo e simplificado e os modelos foram gerados seguindo o seguinte fluxograma de tarefas:



**Figura 10:** Fluxograma de comandos utilizados no *software Agisoft Metashape Pro* para a geração de Modelos Digitais de Afloramento.

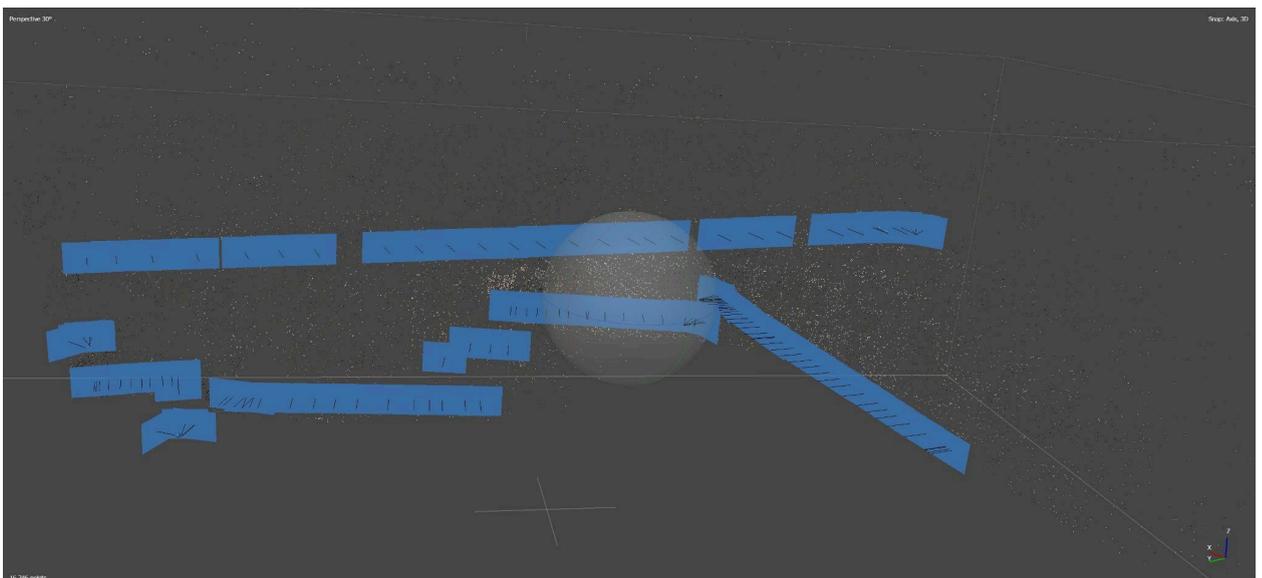
Inicialmente são selecionadas as fotos de um voo específico e importadas para o aplicativo, realiza-se então a estimativa de qualidade das imagens para poder manter um padrão mínimo de qualidade das fotos trabalhadas. Na sequência executa-se o comando de alinhamento de fotos, o comando faz o alinhamento a

partir da interpolação de pontos em comum de um objeto em fotos diferentes conforme a figura 11 a seguir:



**Figura 11:** Imagens da mesma frente de lavra com pontos de visão diferentes, o *software* reconhece pontos em comum das duas imagens para fazer o alinhamento das fotos.

Após as fotos estarem alinhadas é criada a nuvem de pontos que servirá como base para o modelo geológico, o comando utiliza o algoritmo de SfM-MVS para a geração da nuvem de pontos densificada. A imagem 12 a seguir mostra a nuvem de pontos com as fotos do levantamento alinhadas.



**Figura 12:** Nuvem de pontos com o alinhamento das fotos em azul.

As etapas finais de geração incluem a construção e texturização do modelo geológico, durante essa fase de processamento foram selecionados os modelos

com melhor potencial interpretativo, ou seja, os que apresentavam melhor qualidade de imagem, continuidade lateral e representatividade espacial da cava a ser estudada.

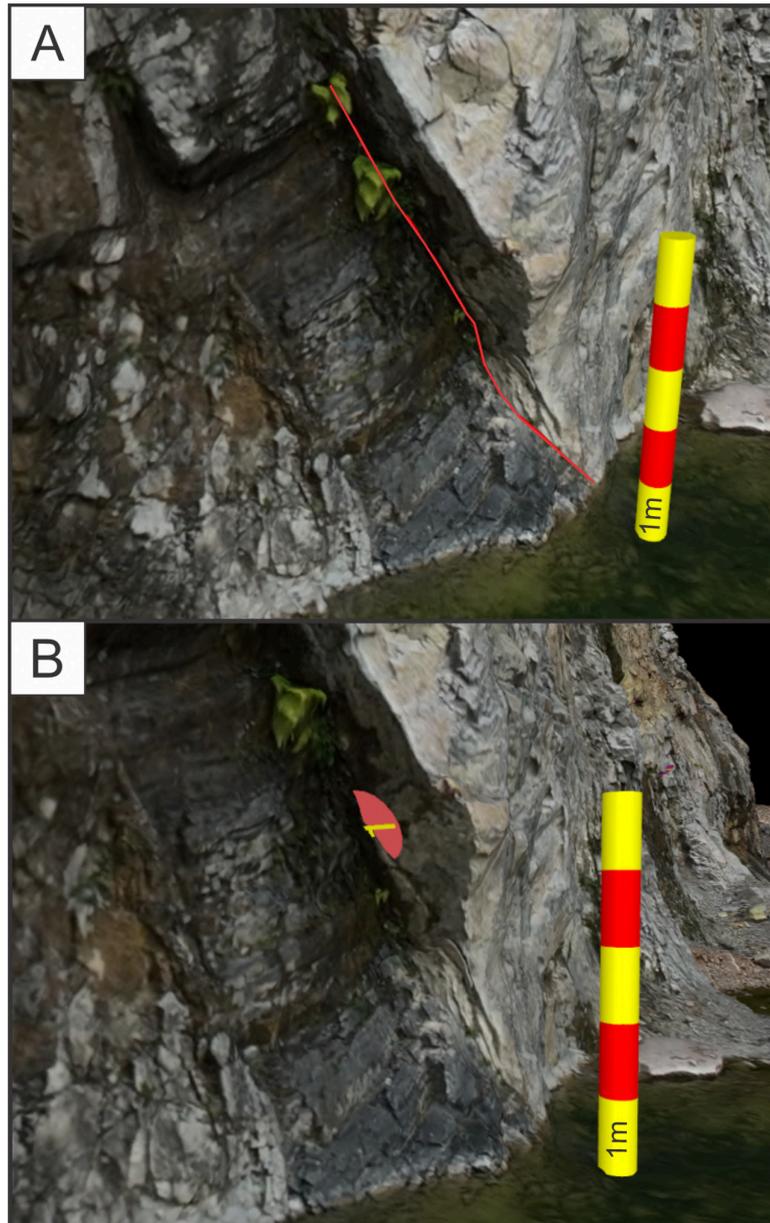
Após a seleção do MDA, iniciou-se a interpretação de feições através do *Software VRGS (Virtual Reality Geological Studio)* da Universidade de Manchester e associadas. A interpretação foi feita primeiramente no MDA com as imagens multiespectrais e em seguida no modelo com as imagens RGB, na tentativa de evitar a influência visual de um modelo sobre o outro.

Para traçar as feições no VRGS foi utilizada a ferramenta de *Fractures Mode* (figura 13), tanto para as imagens multiespectrais quanto para as RGB



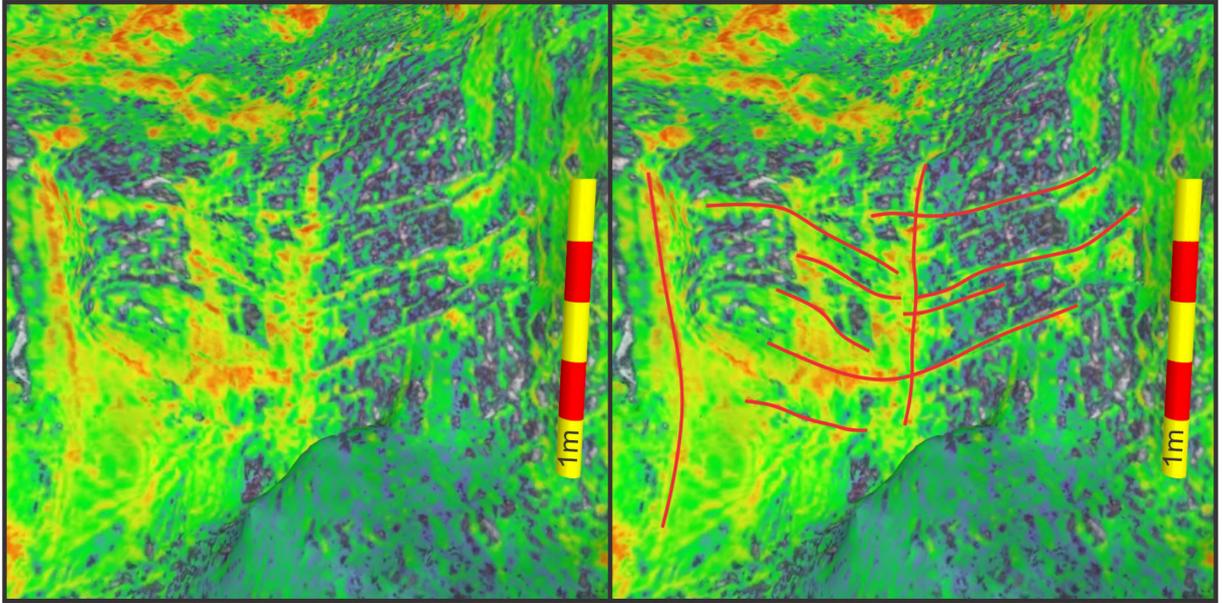
**Figura 13:** Função de *Fractures Mode* do *Software VRGS*.

A ferramenta possibilita o usuário a traçar estruturas no MDA com três ou mais pontos que são triangulados pelo software e transformados em planos que possuem direção e mergulho da feição selecionada, conforme exemplificado pela figura 14 a seguir:



**Figura 14:** Processo de interpretação de feições no VRGS, em A o traçado da feição a ser ressaltada, no caso o contato entre um dique e o migmatito. Em B o plano gerado pelo *software* representado por um elipsoide com direção e mergulho.

As interpretações feitas no MDA multiespectral foram realizadas seguindo padrões contínuos de cores que poderiam vir a representar estruturas geológicas (figura 15), enquanto que no modelo RGB (figura 16) as feições foram traçadas e categorizadas em grupos com suas naturezas conhecidas, sendo esses: Fr1, Fr2, falhas e diques.



**Figura 15:** Linearidade de respostas espectrais traçadas.



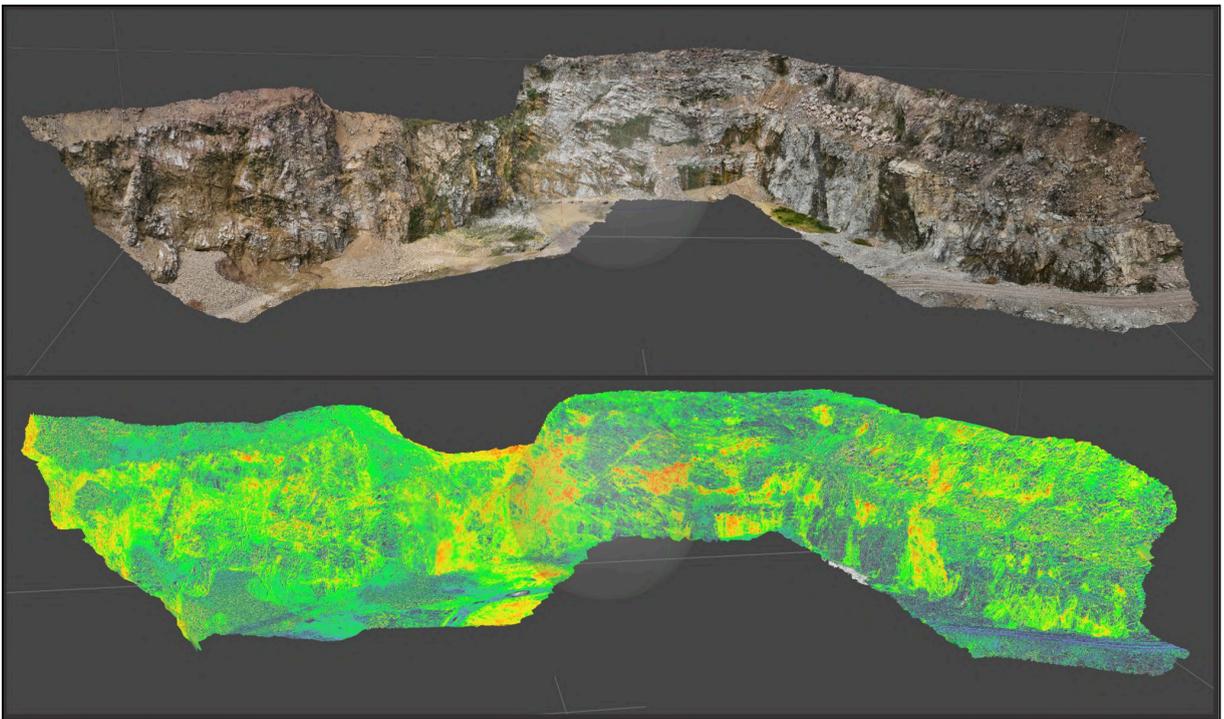
**Figura 16:** Porção do MDA em RGB destacando as estruturas traçadas com os respectivos elipsoides.

## 4. RESULTADOS

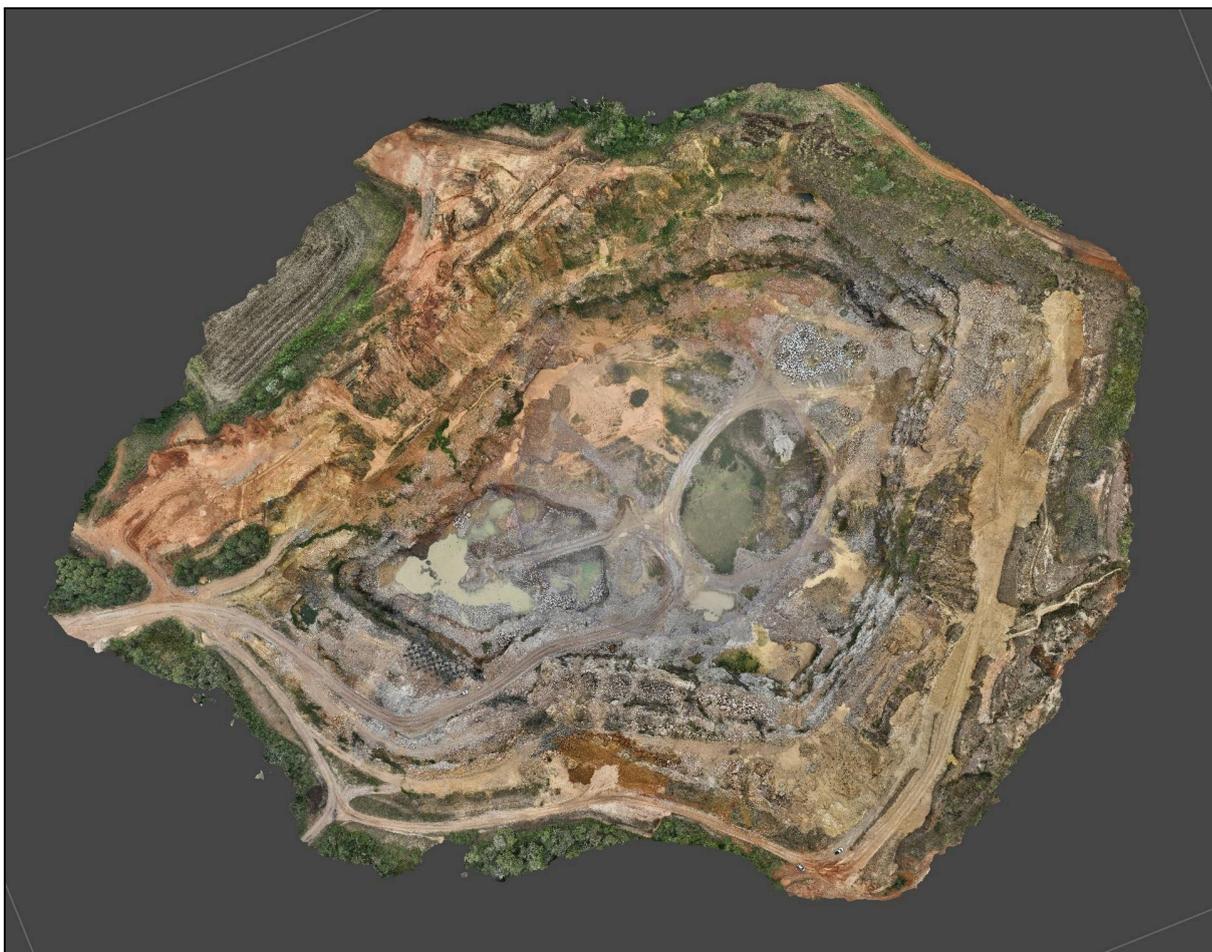
A partir do levantamento e processamento de dados nos softwares de modelagem e interpretação geológica foram obtidos os seguintes resultados.

### 4.1. MODELOS DIGITAIS DE AFLORAMENTO

Foram gerados três modelos tridimensionais de afloramento, dois representativos da bancada selecionada com imagens RGB e multiespectrais (figura 17) e um modelo geral da cava da Mineração São Matheus (figura 18). Os modelos selecionados para interpretação foram somente os de bancada, por apresentarem maior detalhe estrutural e menor cobertura por solo.



**Figura 17:** Modelos Digitais de Afloramento em RGB (superior) e multiespectral (inferior) da bancada a ser interpretada.



**Figura 18:** MDA geral da cava da Mineração São Matheus, vista superior.

Uma visualização em vídeo dos modelos tridimensionais pode ser acessada através dos seguintes links:

- Modelo geral cava: [https://youtu.be/1zaR\\_x4zMAY](https://youtu.be/1zaR_x4zMAY)
- Modelo bancada RGB: <https://youtu.be/BJZmlUoLx3c>
- Modelo bancada multiespectral: <https://youtu.be/asnFt2uuxA0>

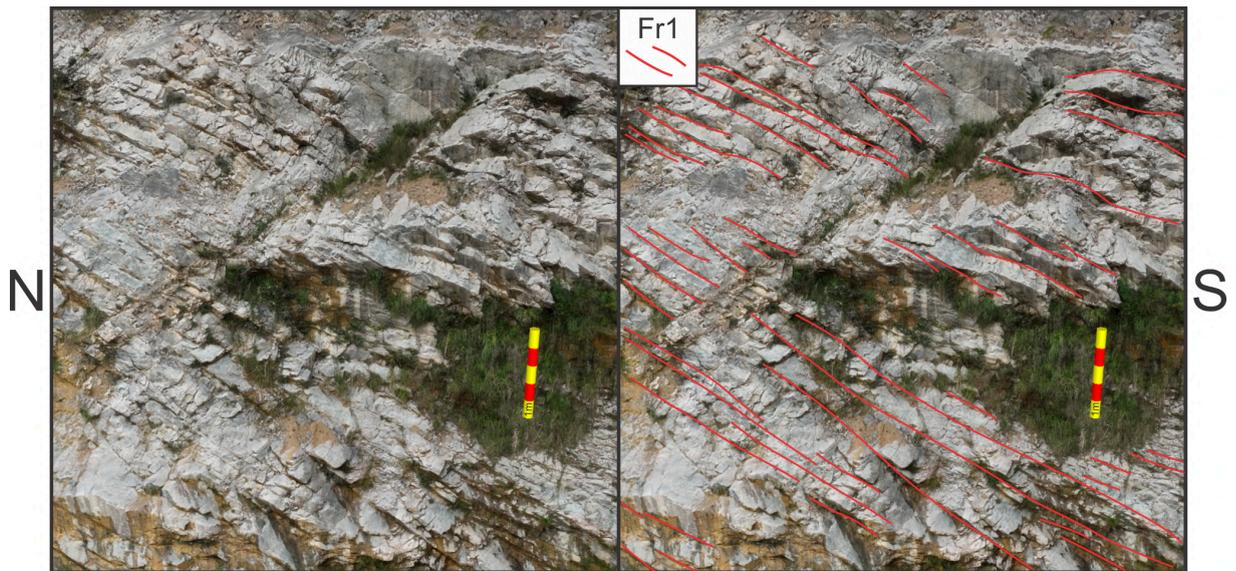
#### 4.2. INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA

Com os MDA prontos, os mesmos foram importados para o software VRGS onde as interpretações foram realizadas em arquivos separados, cada um contendo um tipo de imageamento, os resultados das interpretações são apresentados a seguir.

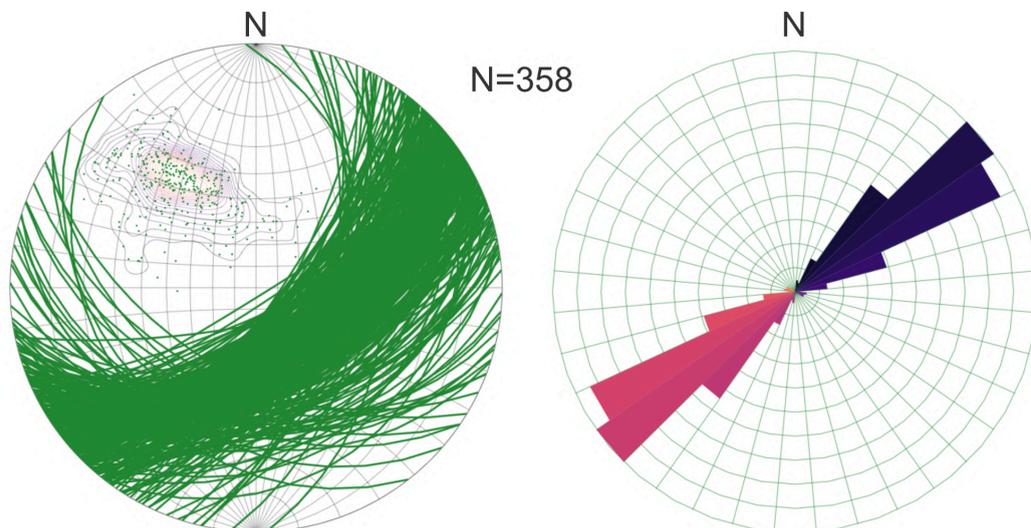
##### 4.2.1. Modelo RGB

As interpretações das feições no modelo RGB foram organizadas na forma de estereogramas representativos de cada grupo de estruturas.

As estruturas denominadas Fr1 (figura 19) representam as fraturas mais penetrativas do maciço, tratam-se de juntas paralelizadas planas e fechadas, com espaçamento médio de 30 centímetros a 1 metro e persistência comumente superior a 5 metros, com direção média de N50E/57SE. Foram interpretadas 358 feições dessa estrutura e a partir dos dados obtidos foram elaborados o estereograma e o diagrama de rosetas apresentados na figura 20.



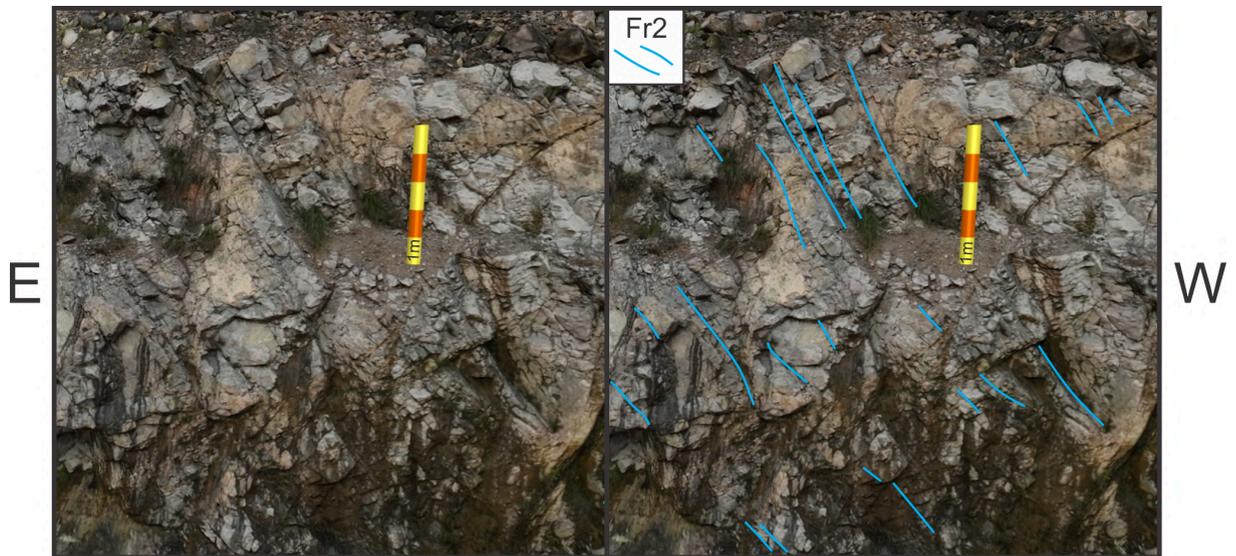
**Figura 19:** Print do MDA em RGB evidenciando a interpretação das estruturas Fr1.



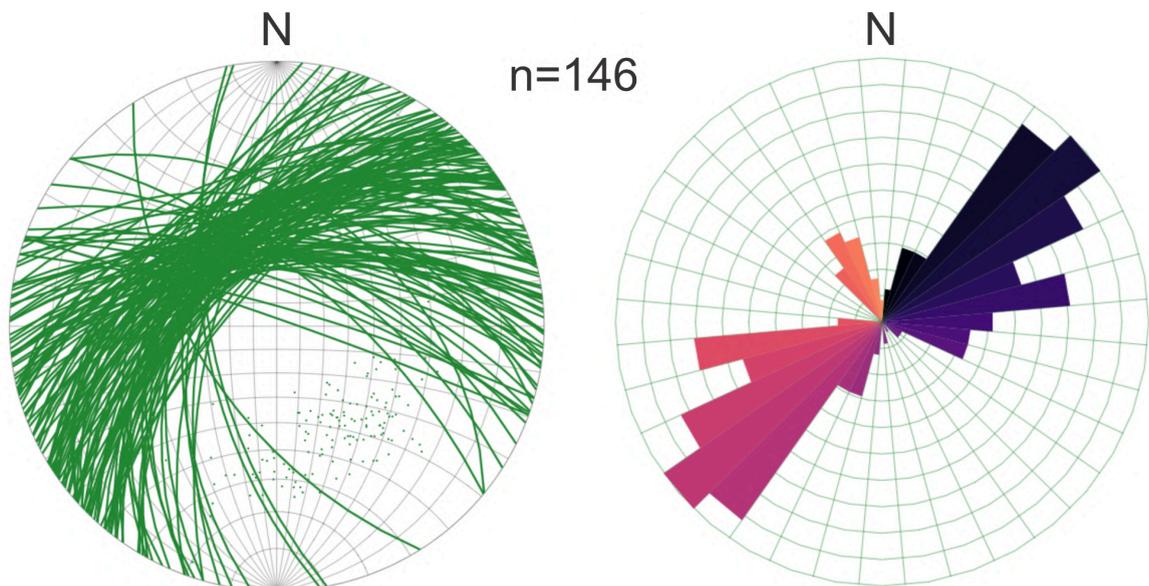
**Figura 20:** Estereograma de Schmidt-Lambert e diagrama de roseta das atitudes Fr1.

As estruturas denominadas Fr2 (figura 21) correspondem a fraturas menos penetrativas na frente de lavra do que as Fr1. Tratam-se também de juntas paralelizadas planas e fechadas com espaçamento médio de 1 a 3 metros e

persistência normalmente inferior a 5 metros. Foram traçadas 146 feições dessa estrutura e obteve-se direção média de N46E/54NW conforme diagrama da figura 22.



**Figura 21:** Print do MDA em RGB evidenciando a interpretação das estruturas Fr2.

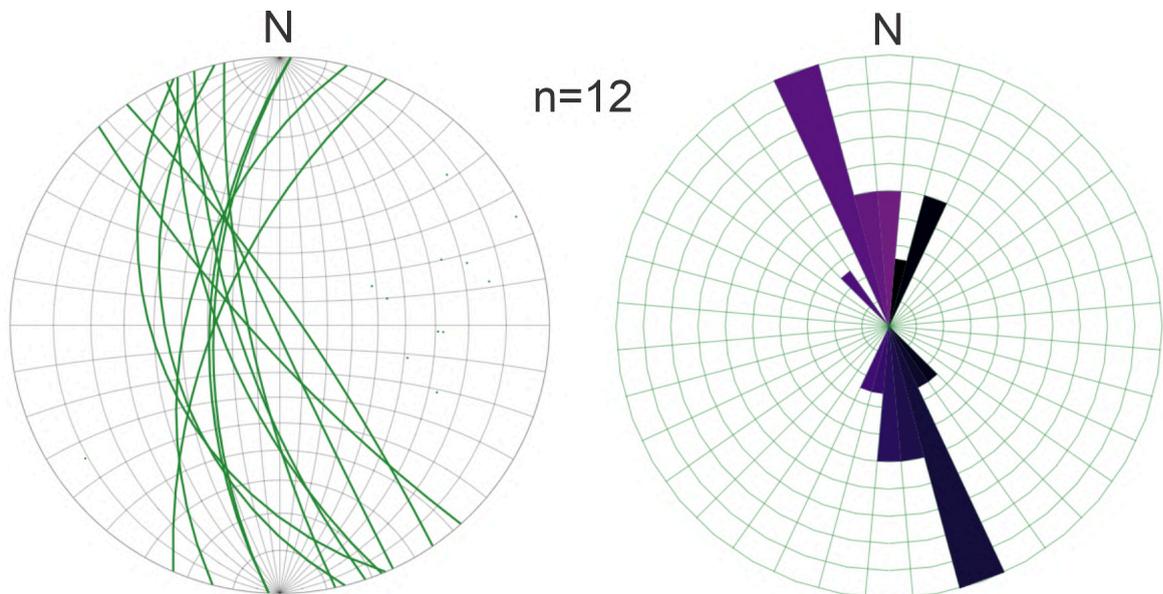


**Figura 22:** Estereograma de Schmidt-Lambert e diagrama de roseta das atitudes Fr2.

As estruturas de falha correspondem à uma porção de aproximadamente 20x10 metros da frente de lavra (figura 23) onde observa-se a cominuição do material e mudança do padrão direcional das estruturas, dentro desse intervalo as 12 feições medidas foram classificadas na categoria de falha e suas estruturas indicam direções predominantemente N17W/65SW, como evidenciado pelos diagramas da figura 24.

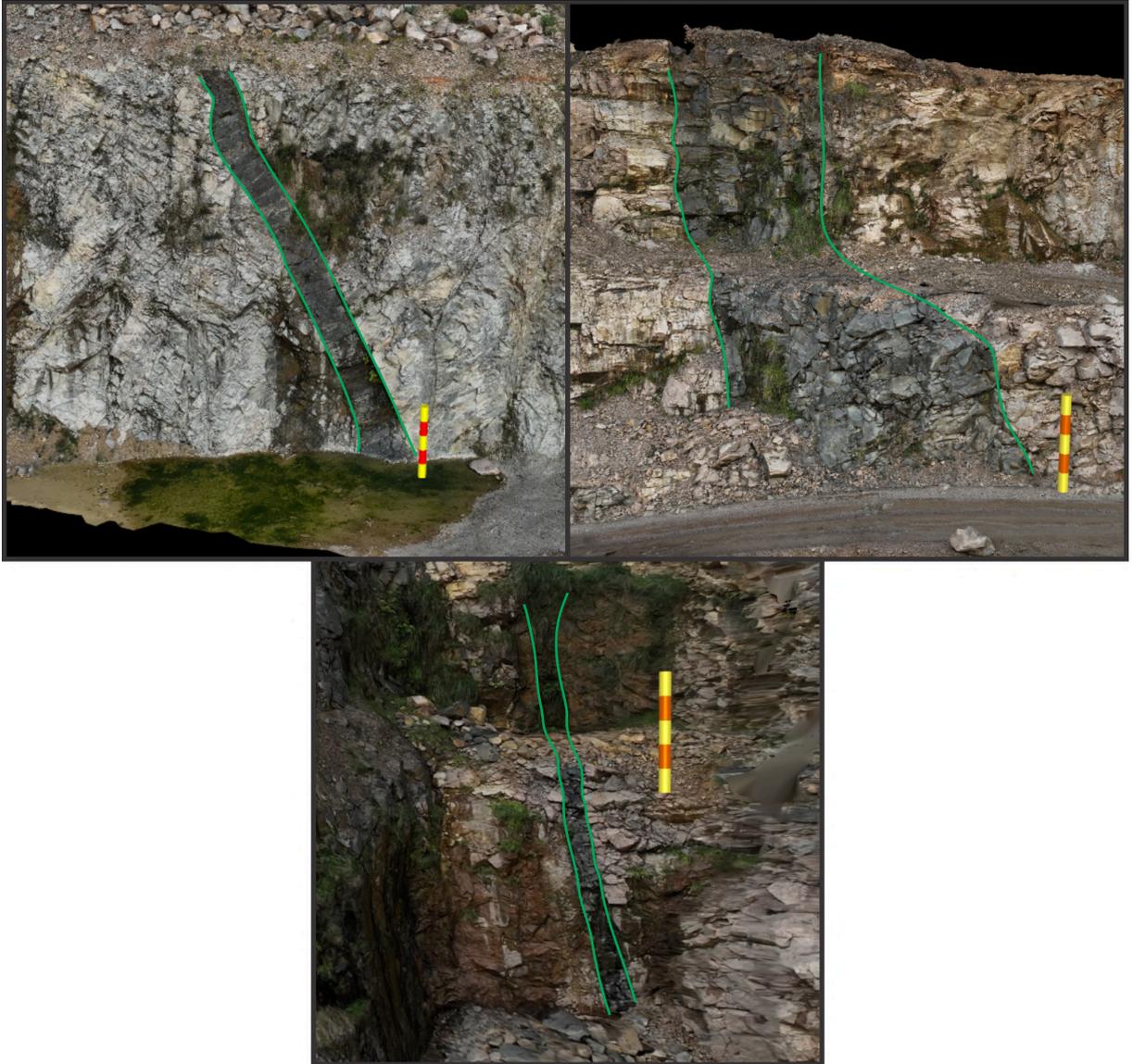


**Figura 23:** Print do MDA em RGB destacando as feições de falha.

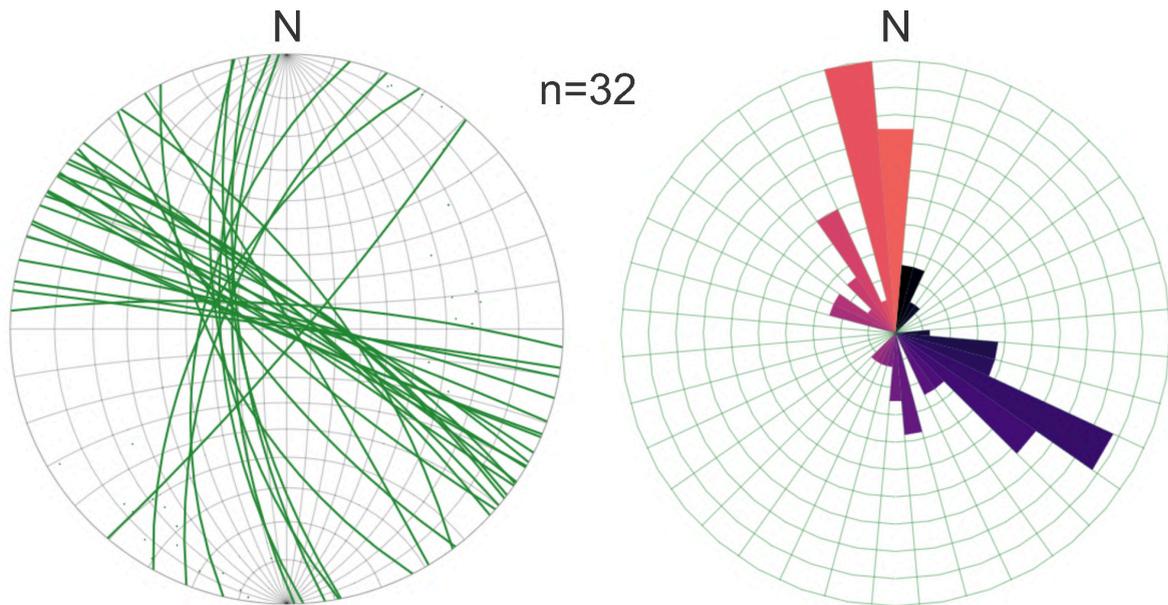


**Figura 24:** Estereograma de Schmidt-Lambert e diagrama de roseta das atitudes da falha.

Os diques traçados (figura 25) representam três corpos intrusivos de diabásio de escala métrica que cortam o maciço de migmatito com direções médias de N40W/80NE. Foram traçadas 12 feições de contato entre as litologias e os dados estruturais dos corpos intrusivos estão representados pelos diagramas da figura 26.



**Figura 25:** Print do MDA em RGB destacando as feições de contato dos diques.

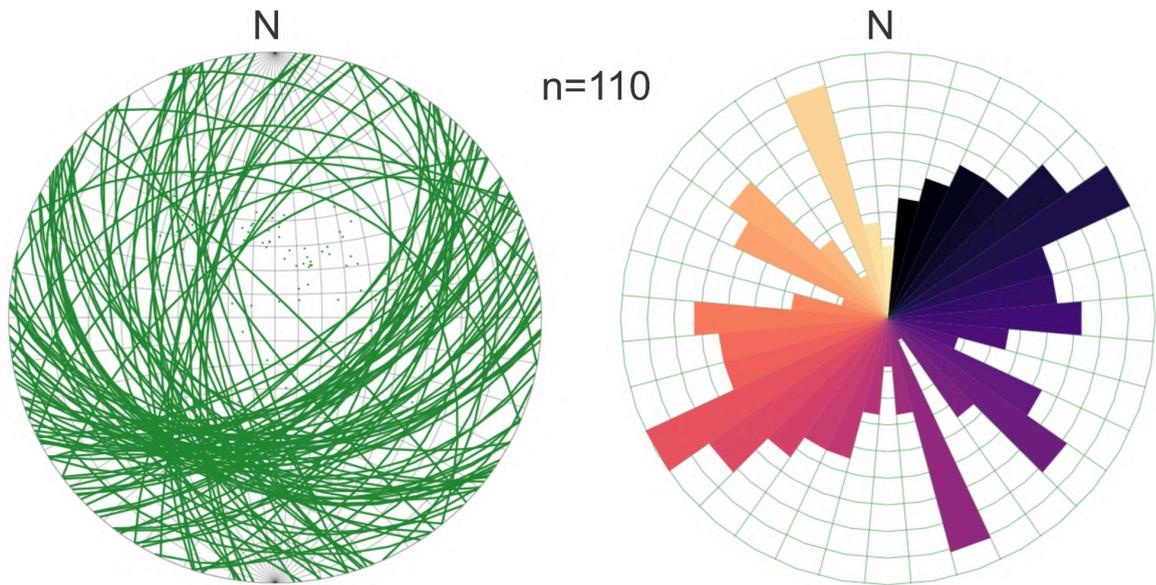


**Figura 26:** Estereograma de Schmidt-Lambert e diagrama de roseta das atitudes dos diques.

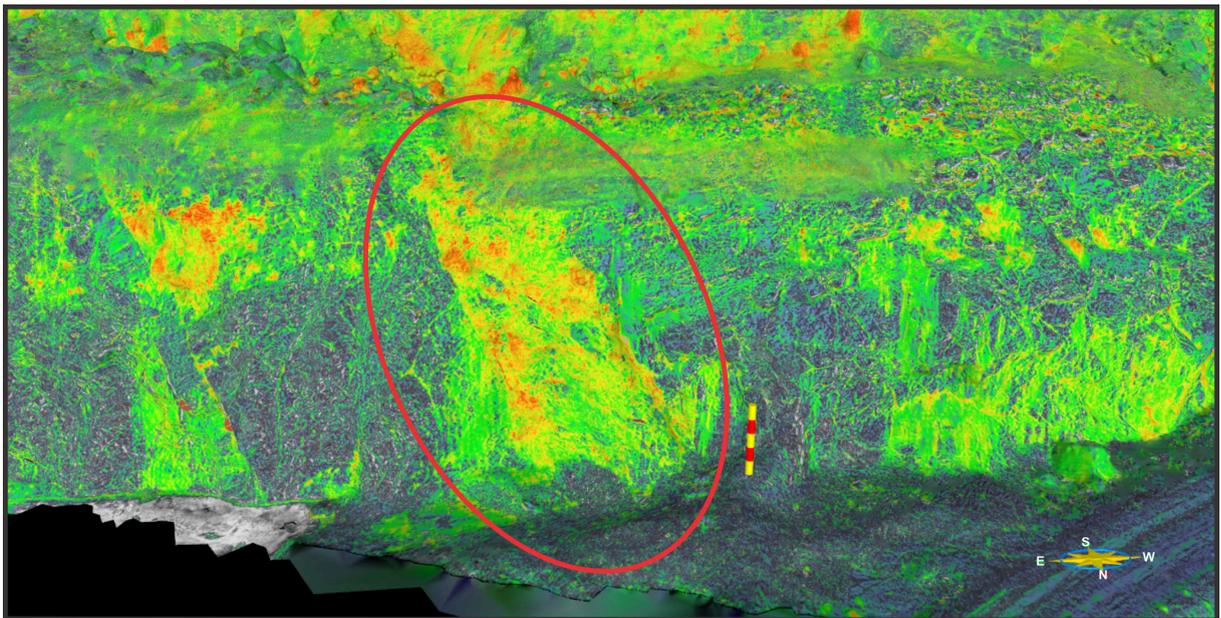
#### 4.2.2. Modelo multiespectral

As feições do modelo multiespectral foram agrupadas em uma única categoria seguindo uma lógica de interpretação baseada exclusivamente nas variações de cores de reflectância, essa visualização das respostas espectrais não permitiu distinguir a natureza geológica das estruturas apenas pela linearidade da resposta espectral, de forma que essas feições foram posteriormente comparadas às de natureza conhecida no modelo RGB. Foram traçados um total de 110 feições e as mesmas foram aglutinadas num único estereograma conforme a figura 27.

Destaca-se a concentração de feições observadas numa porção do modelo que posteriormente foi correlata à zona de falha, nesta porção são bem evidenciadas duas estruturas subverticais paralelizadas e espaçadas aproximadamente 10 metros entre si, entre essas duas estruturas principais ocorrem várias outras paralelizadas e de menor comprimento, com mesma direção porém menores ângulos de mergulho (figura 28), essas feições foram importantes para a caracterização da estrutura de falha observada também no modelo RGB.



**Figura 27:** Estereograma de Schmidt-Lambert e diagrama das feições interpretadas no multiespectral.



**Figura 28:** Porção do MDA multiespectral destacando a maior concentração de respostas espectrais linearizadas, posteriormente correlacionadas à zona de falha do modelo RGB.

## 5. DISCUSSÃO

Com o estudo desenvolvido foi possível compreender a importância dos Modelos Digitais de Afloramento e suas aplicações profissionais e acadêmicas. Os modelos gerados apresentaram altíssima nitidez de imagem e permitiram a visualização detalhada de toda a cava. Vale destacar que seria possível processar os modelos com ainda maior nível de detalhe, no entanto, não houve necessidade de um detalhamento adicional, e o tempo de processamento requerido seria inviável para os objetivos deste estudo.

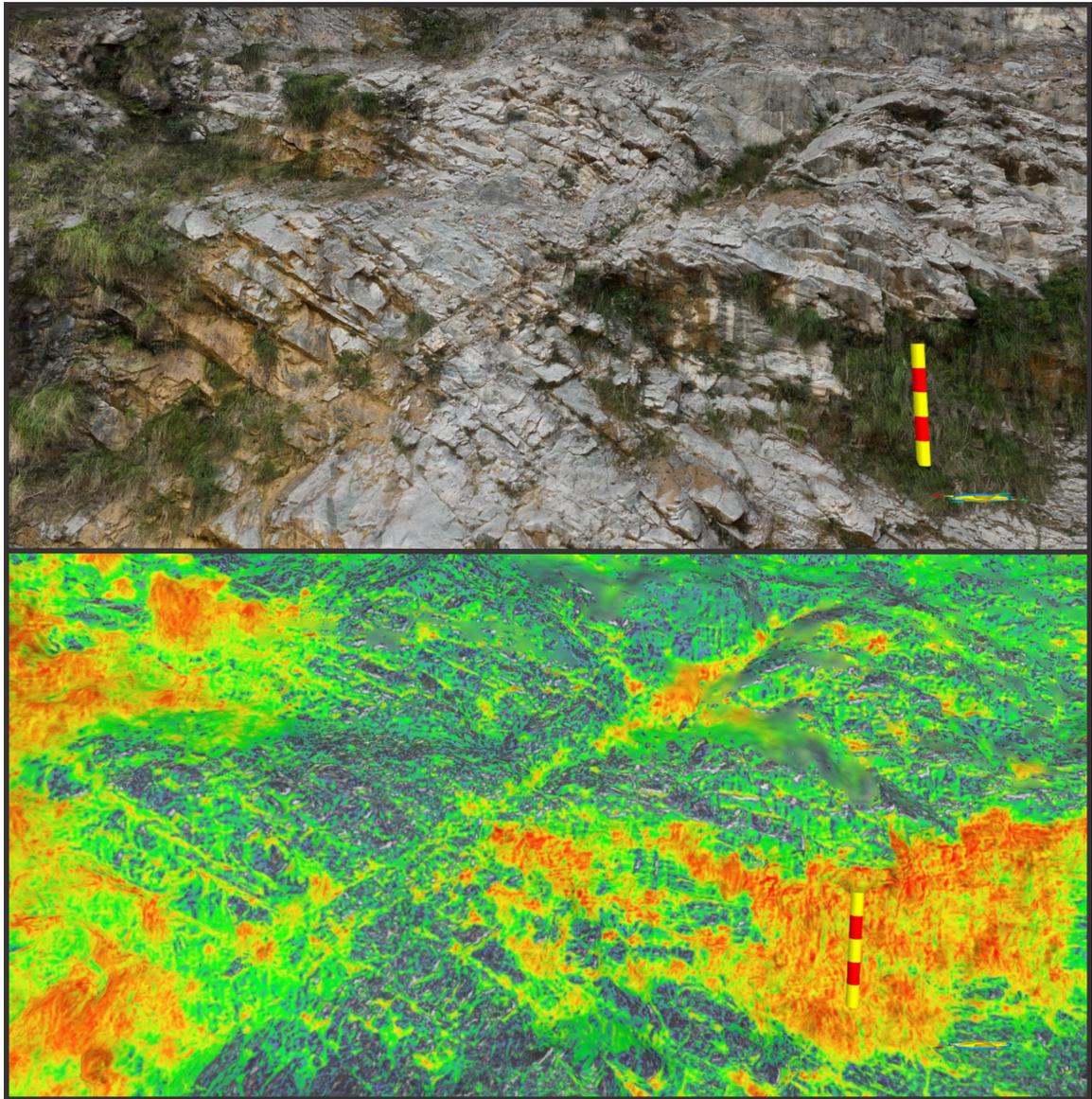
O alto nível de detalhe dos MDA possibilita inúmeras aplicações geológicas, entre elas destaca-se a utilização em análises estruturais, mapeamento estratigráfico, exploração mineral, avaliação de estabilidade geotécnica e no monitoramento ambiental. No âmbito acadêmico os MDA permitem que os usuários analisem afloramentos rochosos em detalhes e sem a necessidade de estar presencialmente no local, permitindo maior acessibilidade e capacidade de revisar dados de campo de forma virtual.

### 5.1. ANÁLISE COMPARATIVA

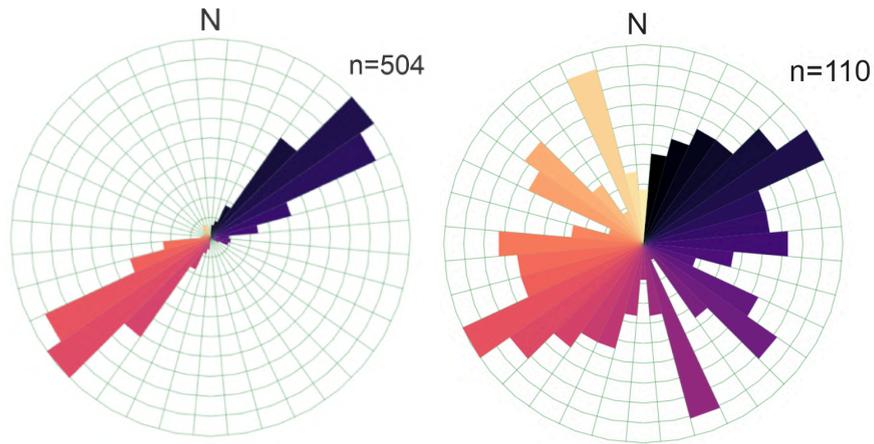
A partir das interpretações realizadas foi possível comparar os modelos e identificar quais feições geológicas se destacam nas imagens multiespectrais com a relação de bandas NDVI.

As estruturas Fr1 e Fr2, bem definidas no modelo RGB, apresentaram moderada resposta multiespectral, sendo reconhecidas pela linearidade de faixas espectrais amarelas e vermelhas (figura 29). No entanto, observou-se que algumas dessas feições são ocultadas em áreas com maior cobertura vegetal ou com um leve aumento na cobertura de solo, sendo neste caso a observação em RGB mais eficaz para a distinção de características do terreno.

A análise dos diagramas do levantamento multiespectral revela uma incipiente preferência direcional em NE-SW, correlacionada às estruturas Fr1 e Fr2 delineadas no modelo RGB (figura 30). Os diagramas das estruturas Fr1, gerados a partir da interpretação do modelo RGB, apresentaram um padrão estrutural robusto com direção média em NE-SW, é possível correlacionar esse padrão a um sistema de fraturas de mesma orientação descrito por Baldin et al. (2021) nas regiões ao sul do Complexo Atuba (figura 3 “B”).

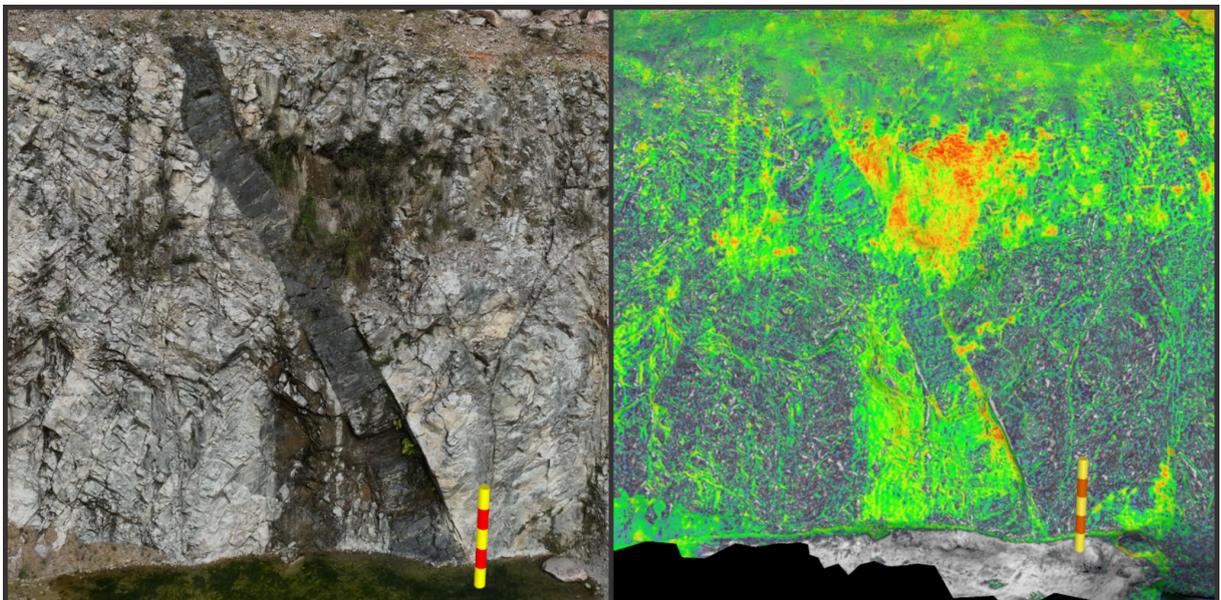


**Figura 29:** Comparativo das estruturas Fr1 e Fr2 nas imagens RGB e multiespectral, na porção inferior esquerda da imagem multiespectral observa-se o ocultamento das feições rochosas devido a maior cobertura de vegetação e solo.



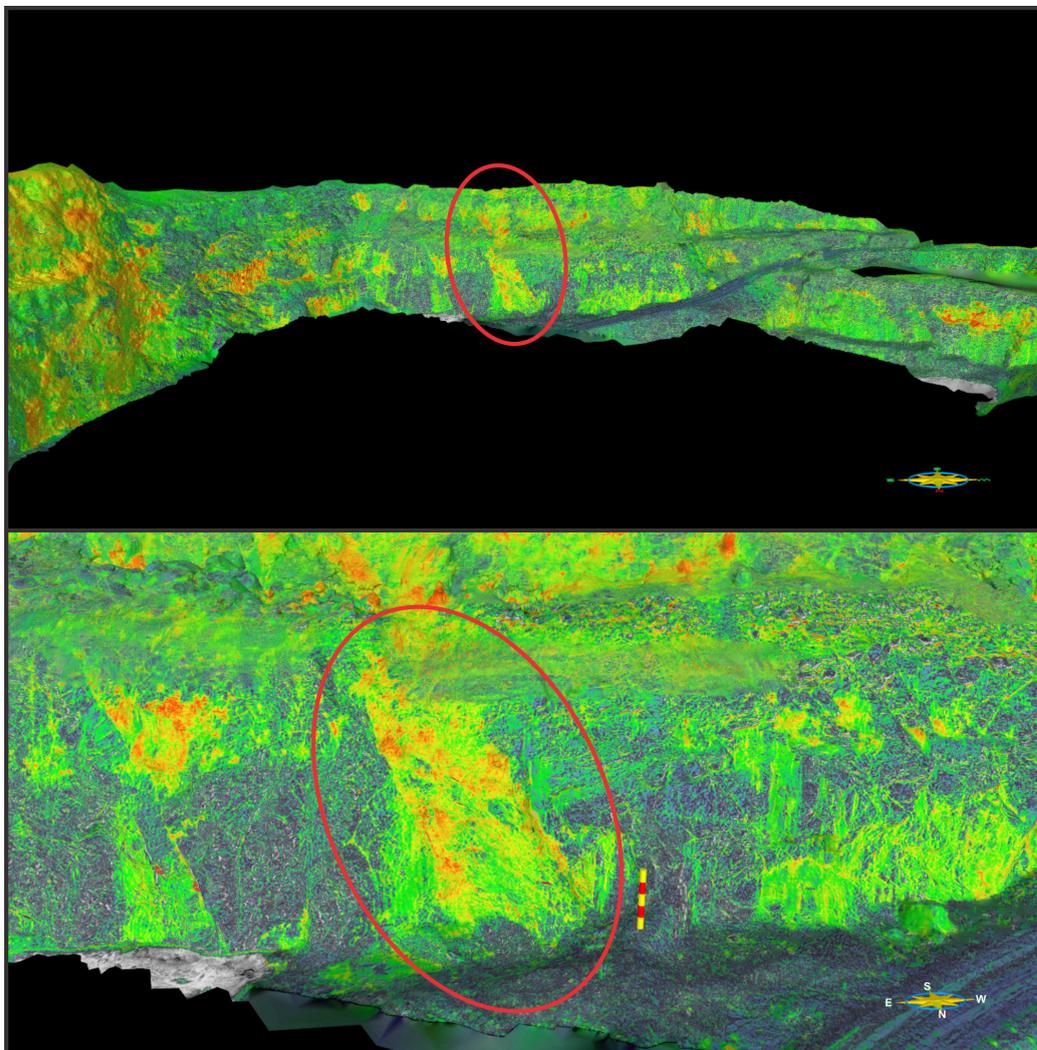
**Figura 30:** Comparativo dos diagramas de roseta das estruturas Fr1 e Fr2 traçadas no modelo RGB (esquerda) e das feições traçadas no modelo multiespectral (direita).

A análise dos diques no imageamento multiespectral não revelou variação significativa na assinatura espectral que corresponda à diferença litológica entre o migmatito e o diabásio, sendo apenas o contato entre as rochas levemente delineado possivelmente devido à percolação de água nessas estruturas e à consequente concentração vegetal (figura 31). Nesse sentido, a relação de bandas NDVI não se mostrou eficaz na distinção dos litotipos observados com facilidade nas imagens RGB.

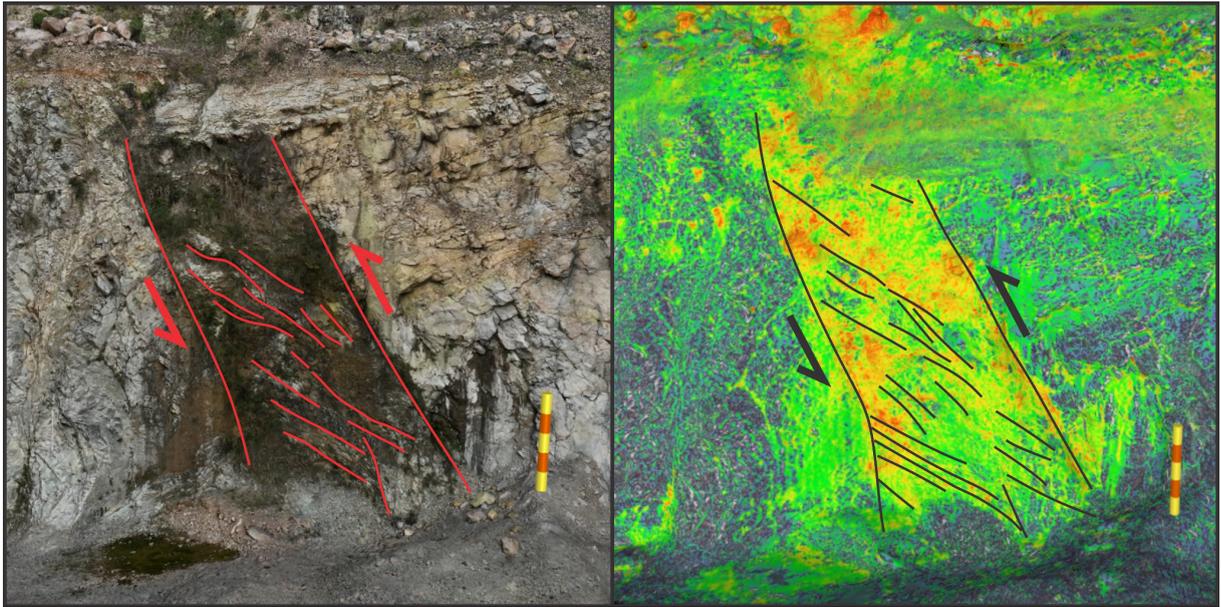


**Figura 31:** Comparativo das imagens RGB e multiespectral evidenciando um dos diques observados.

As estruturas associadas à zona de falha apresentaram forte resposta multiespectral com a relação de bandas NDVI e suas feições ressaltaram em diferentes escalas no MDA (figura 32), seus limites são demarcados por respostas espectrais bem definidas e destacam-se também fraturas internas da zona de falha que podem indicar sua natureza cinemática (figura 33). A associação de ambos os imageamentos foi importante para a caracterização da estrutura, as imagens RGB foram úteis no entendimento da falha ao observar a diferença de cor e cominuição da rocha na zona cisalhada, já as imagens multiespectrais destacaram com facilidade as estruturas internas da falha que em parte são ocultadas nas imagens RGB devido à maior cobertura de solo.



**Figura 32:** Observação em diferentes escalas do MDA multiespectral evidenciando a zona de falha como uma das mais importantes estruturas observadas em linearidade e índice de reflectância.



**Figura 33:** Interpretação cinemática da zona de falha a partir de suas estruturas internas que indicam movimento de falha inversa.

A presença de material fraturado e cominuído associado à zona de falha é o provável responsável pela elevação do índice de reflectância NDVI dessas estruturas. A argilização do material associada ao aumento da hidratação e cobertura vegetal do maciço, são fatores que a relação de bandas utilizada tende a ressaltar.

## 6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos e da análise comparativa dos modelos foi possível tirar as seguintes conclusões:

- O levantamento fotogramétrico por drones demonstra ser uma ferramenta eficaz para a obtenção dos dados necessários à geração de Modelos Digitais de Afloramento, o equipamento permite ao usuário capturar um grande número de fotografias em alta resolução, inclusive de locais de difícil acesso, de forma rápida e segura.
- A geração de MDA's foi possível de forma eficaz através do *software Agisoft Metashape Pro*, com o programa foram obtidos três modelos diferentes, um geral da cava da Mineração São Matheus em RGB e dois de bancadas de lavra em RGB e multiespectral.

- O estudo destacou a importância dos Modelos Digitais de Afloramento (MDA) e suas aplicações acadêmicas e profissionais. A utilização desta ferramenta na geologia tem demonstrado ser muito eficaz, principalmente quando associada a trabalhos de campo que confirmem ou descartem dados obtidos pelo sensoriamento remoto por drones.
- A interpretação de feições no *software* VRGS possibilitou a demarcação de 548 feições no modelo RGB e 110 feições no modelo multiespectral. O modelo em RGB permitiu boa visualização das estruturas Fr1, Fr2 e dos diques, ao passo que apresentou moderada qualidade de visualização das estruturas de falha.
- Comparado às imagens RGB, o modelo multiespectral exibiu moderada representatividade das estruturas Fr1 e Fr2, pouca representatividade para os diques e boa resposta espectral na zona de falha, esta zona foi a única porção do modelo multiespectral onde as feições foram melhor ressaltadas e delineadas quando comparadas à mesma porção no modelo RGB.
- O índice NDVI comumente já vem com suas imagens processadas em drones com câmeras multiespectrais instaladas, desta forma, compreender a aplicação do NDVI sobre afloramentos rochosos pode ser útil para saber em que esfera de trabalho os produtos deste índice podem ser utilizados sem a necessidade de processar dados espectrais e saber de que forma o geólogo pode, ou não, utilizar dessas imagens.
- A utilidade do imageamento multiespectral com a relação de bandas NDVI para o sensoriamento de maciços rochosos aponta ser menos eficaz que o imageamento convencional RGB para o mapeamento de variações litológicas, no entanto, pode ser uma ferramenta útil na definição de falhas ou zonas de cisalhamento que possuam rochas de falha cominuídas e mais suscetíveis à percolação de água. De qualquer forma, a confirmação das interpretações deve ser invariavelmente feita em campo.
- Com base na revisão bibliográfica e nos resultados deste estudo, recomenda-se para pesquisas futuras na área o aprofundamento do estudo de relações de bandas multiespectrais capazes de evidenciar características

específicas das rochas, com o objetivo de filtrar objetos que possam ofuscar informações e determinar quais relações são mais eficazes para o imageamento multiespectral com drones para fins geológicos. No contexto desta pesquisa recomenda-se testar relações de bandas descritas na literatura que possam destacar outras feições. A exemplo dos estudos de Barnes (2020) e Jackisch et al. (2021) que sugerem relações de bandas capazes de ressaltar óxidos de ferro, os quais, segundo Baldin et al. (2021), ocorrem preenchendo fraturas abertas em afloramentos do Complexo Atuba.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHLEY, R. P.; ABRAMS, M. J. Alteration mapping using multispectral images; Cuprite mining district, Esmeralda County, Nevada. **Open-File Report**, 1980. <https://doi.org/10.3133/ofr80367>
- BACHI, L. **Proposta de Fluxo de Otimização de Modelos 3D de Afloramentos para uso em Geologia**. 2022. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, São Leopoldo, 2022.
- BALDIN, M. T.; SALAMUNI, E.; GIMENEZ, V. B.; LAGOEIRO, L. E. Dados Aeromagnetométricos da Porção Sudoeste do Complexo Atuba – Terreno Curitiba, Cinturão Ribeira Meridional. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, 2021. [https://doi.org/10.11137/1982-3908\\_2021\\_44\\_41045](https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_41045)
- BASEI, M. A. S.; SIGA JR., O.; MACHIAVELLI, A.; MANCINI, F. Evolução Tectônica dos Terrenos entre os Cinturões Ribeira e Dom Feliciano (PR-SC). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 22, n. 2, p. 216–221, 1992. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1992216221>
- BEMIS, S. P.; MICKLETHWAITE, S.; TURNER, D; *et al.* Ground-based and uav-based photogrammetry: a multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. **Journal of Structural Geology**, v. 69, p. 163–178, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.10.007>
- CHANG, C-I. **Hyperspectral Imaging: Techniques for Spectral Detection and Classification**. Kluwer Academic/Plenum Publishers, p. 370, 2003.
- CHIEREGATI, L. A.; SARDOU FILHO, R. **Projeto materiais de construção da região metropolitana de Curitiba: estado do Paraná**. [s.l.] CPRM, 2017.
- CLARK, R. N. **Spectroscopy of rocks and minerals and principles of spectroscopy**. p. 3–58, 1999.
- FERNÁNDEZ-LOZANO, J.; GUTIÉRREZ-ALONSO, G. Aplicaciones Geológicas de los Drones Geological applications of UAVs. **Revista de la Sociedad Geológica de España**, v. 29, n. 1, p. 105, 2016.

- FERNÁNDEZ-LOZANO, J.; GUTIÉRREZ-ALONSO, G.; CALABRÉS-TOMÉ, S.; GARCIA TALEGÒN, J. Drones: Nuevas aplicaciones geomáticas en el campo de las Ciencias de la Tierra. Geo-Temas. IX Congreso Geológico de España. **Anais...** Madrid, v. 16 (1), p. 725-728, 2016.
- JACKISCH, R.; HEINCKE, B. H.; ZIMMERMANN, R.; *et al.* Drone-based magnetic and multispectral surveys to develop a 3D model for mineral exploration at Qullissat, Disko Island, Greenland. **Solid Earth**, v. 13, n. 4, p. 793–825, 2022. <https://doi.org/10.5194/se-13-793-2022>
- MASCHIO, A. V. **A Estereoscopia: Investigação de processos de aquisição, edição e exibição de imagens estereoscópicas em movimento.** 2008, 231 f. Dissertação (Mestrado) - UNESP, Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Curso de Pós Graduação em Desenho Industrial. Bauru, SP, p. 231, 2008.
- SIGA JÚNIOR, O.; BASEI, M. A. S.; REIS NETO, J. M.; MACHIAVELLI, A.; HARARA, O. M. O complexo Atuba: um cinturão paleoproterozóico intensamente retrabalhado no Neoproterozóico. **Boletim IG-USP. Série Científica**, v. 26, n. 0, p. 69, 1995.
- VAN DER MEER, F. D.; VAN DER WERFF, H. M. A.; VAN RUITENBEEK, F. J. A.; *et al.* Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 14, n. 1, p. 112–128, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.08.002>