



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

**Análise estrutural de taludes a partir de produtos derivados de imagens
de Remotely Piloted Aircraft (RPA)**

GARION GUIDOTTI DE SOUZA DOS SANTOS

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

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

GARION GUIDOTTI DE SOUZA DOS SANTOS

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE TALUDES A PARTIR DE PRODUTOS DERIVADOS
DE IMAGENS DE *REMOTELY PILOTED AIRCRAFT* (RPA)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em *Geociências e Meio Ambiente*.

Orientador: Marcos Eduardo Hartwig

Rio Claro – SP
2023

S237a

Santos, Garion Guidotti de Souza dos

Análise estrutural de taludes a partir de produtos derivados de imagens de Remotely Piloted Aircraft (RPA) / Garion Guidotti de Souza dos Santos. -- Rio Claro, 2023

105 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Marcos Eduardo Hartwig

1. Descontinuidades geológicas. 2. Structure-from-motion. 3. Aerofotogrametria digital. 4. Taludes rochosos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Impacto potencial desta pesquisa

O entendimento estrutural de maciços rochosos é fundamental para a avaliação da estabilidade de taludes. O surgimento de novas tecnologias tem permitido aperfeiçoar metodologias tradicionais de aquisição de dados, otimizando o processo de coleta e a representatividade dos dados. Essa dissertação buscou aplicar e testar a surgente tecnologia de RPA, com vistas ao Desenvolvimento Sustentável da ONU por meio dos objetivos 8 (Trabalho decente e crescimento econômico – itens 8.1, 8.2, 8.3, 8.4 e 8.5) e 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura – itens 9.4, 9.5 e 9.b).

Potential impact of this research

The structural understanding of rock masses is fundamental for evaluating slope stability. The emergence of new technologies has made it possible to improve traditional data acquisition methodologies, optimizing the collection process and data representativeness. This dissertation sought to apply and test the emerging RPA technology, with a view to UN Sustainable Development through objectives 8 (Decent work and economic growth – items 8.1, 8.2, 8.3, 8.4 and 8.5) and 9 (Industry, Innovation and Infrastructure – items 9.4, 9.5 and 9.b).

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

GARION GUIDOTTI DE SOUZA DOS SANTOS

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE TALUDES A PARTIR DE PRODUTOS DERIVADOS
DE IMAGENS DE *REMOTELY PILOTED AIRCRAFT* (RPA)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em *Geociências e Meio Ambiente*.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Marcos Eduardo Hartwig
UFES / Alegre (ES)

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

Prof. Dr. Carlos Henrique Grohmann
IEE / USP/São Paulo (SP)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro (SP), 29 de setembro de 2023

DEDICATÓRIA

Dedico essa pesquisa à minha Família, meu orientador
e todos aqueles que persistem em seus sonhos

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, meus guias e guardiões por mais essa oportunidade de aprendizado e crescimento. Agradeço também a minha Família e todos aqueles que me apoiaram, mas principalmente ao meu orientador Marcos Eduardo Hartwig pela paciência, pela amizade e principalmente pela confiança.

Caroline Maria Guidotti de Souza, José Carlos dos Santos, Sophia Guidotti, Tio Nenin, Tia Imperatriz, Luisa Gabrielly Hualde Paiva Oliveira, Antônio José de Souza, Magali Guidotti, André, Noemi Rocha e Pedro Henrique Okuyama, só tenho a agradecer por tudo que fizeram e fazem por mim, sem vocês nada disso seria possível.

Muitas pessoas entraram na minha vida nesse período e gostaria de dedicar também esse espaço para essas pessoas. Tive a honra de conhecer e aprender muito com o Dr. Norberto Morales, grande coração. George Alfredo Longhitano, obrigado por acreditar em mim e pela oportunidade. João Pedro Inácio me salvando quando o TeamViewer e fechando a parceria no mestrado. Professor Fábio Reis, sendo um verdadeiro guia e exemplo, obrigado por me acolher, assim como toda a sua maravilhosa equipe de pesquisa (Lucilia, Vinícius Veloso, André Kolya, Claudia Vanessa e Victor). Ogura, você tem um espaço aqui também, pela troca de conhecimento e amizade. Gostaria também de agradecer ao Vitor Alves pela parceria de sempre, apesar da distância. Dona Cirene e família, por estarem comigo em oração e pensamento. Obrigado Tiago Archioli por entender minhas sumidas da academia e pela parceria. Everton Borges da Cargill, você também tem um espaço aqui. Apesar de ter te conhecido faz pouco tempo, agradeço pela amizade e o papo cabeça. Alberlan Bargonzi, não esqueci de você também não. Muito obrigado pela paciência, ainda vou postar suas fotos!!! Prof. Joel, Juliana de Itaúnas e família também gostaria de agradecer vocês pelo acolhimento. E não posso esquecer da família Gdrones (Débora, Bruno, Naia, Pati, Theco e Felipe) por me acolherem. Eduardo Vasconcellos, você também tem participação, muito obrigado pela confiança!

Parágrafo reservado, apesar de ser o último, mas não menos importante. Gostaria de agradecer a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), *campus* Rio Claro; a PRPPG de Geociências e Meio Ambiente e, principalmente, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio e pela oportunidade e por permitirem que se concretizasse mais essa pesquisa.

Agradeço novamente à todos e saibam que sempre estarão em meu coração. Por fim, lembrem-se de todos aqueles que te ajudaram a se aproximar de seus objetivos.

EPÍGRAFE

“O quanto você está disposto a abrir mão de algo que gosta em prol de algo maior?

Quando entender essa pergunta, perceberá que, na verdade,
o saber vem da força de vontade.”

- Santos, G. G. de S dos

RESUMO

Tradicionalmente, os levantamentos estruturais são realizados com bússola na base de taludes naturais ou de escavação a partir do cadastramento manual de atitude das descontinuidades geológicas. Desse modo, a aquisição de dados é trabalhosa e morosa, particularmente, em maciços estruturalmente complexos. Nos últimos anos, a utilização RPA (*Remotely Piloted Aircraft*) tem se tornado cada vez mais frequente em estudos geológicos. Isso decorre do baixo custo dos equipamentos, da praticidade na aquisição e processamento de imagens e no elevado nível de detalhamento dos produtos gerados. Por ser ainda uma ferramenta relativamente recente no país, existem poucos estudos sobre sua eficiência e confiabilidade em levantamentos estruturais. Neste sentido, foram avaliados dois taludes rochosos com características geológicas e estruturais completamente distintas. Foram geradas nuvens de pontos 3D por meio da técnica de fotogrametria digital SfM-MVS e foram extraídos os planos estruturais por meio do *plugin FACETS* (*software* CloudCompare). O primeiro talude é constituído por paragnaisses pouco fraturados do Complexo Paraíba do Sul (Neoproterozóico), que ocorrem em um corte de estrada no km 6 da ES-482 (Cachoeiro de Itapemirim, ES). O segundo é constituído por basaltos fraturados da Formação Serra Geral (Juro-Cretáceo) que ocorrem em uma pedreira inativa no município de Iracemápolis, SP. Os resultados apontam que os dados estruturais extraídos das imagens de RPA têm aderência com os dados estruturais obtidos no método tradicional (*scanline*), mesmo em maciços estruturalmente complexos. Contudo, são necessários cuidados especiais durante o planejamento de voo e processamento da nuvem de pontos 3D. Além disso, a despeito das limitações no método tradicional, ele ainda é indispensável pois, permite identificar os tipos de descontinuidades.

Palavras Chave: descontinuidades geológicas; *structure-from-motion*; aerofotogrametria digital; taludes rochosos.

ABSTRACT

Traditionally, structural surveys are carried out using a compass at the base of natural or excavation slopes based on manual registration of the attitude of geological discontinuities. Thus, data acquisition is laborious and time-consuming, particularly in structurally complex massifs. In recent years, the use of RPA (Remotely Piloted Aircraft) has become increasingly frequent in geological studies. This is due to the low cost of the equipment, the practicality in acquiring and processing images and the high level of detail of the generated products. Because it is still a relatively recent tool in the country, there are few studies on its efficiency and reliability in structural surveys. In this sense, two rocky slopes with completely different geological and structural characteristics were studied. The 3D point clouds were generated using the SfM-MVS digital photogrammetry technique and the structural plans were extracted using the FACETS plugin (CloudCompare software). The first slope consists of slightly fractured paragneisses from the Paraíba do Sul Complex (Neoproterozoic), which occur in a road cut at km 6 of the ES-482 (Cachoeiro de Itapemirim, ES). The second consists of fractured basalts from the Serra Geral Formation (Juro-Cretaceous) that occur in an inactive quarry in the district of Iracemápolis, SP. The results indicate that the structural data extracted from the RPA images adhere to the structural data obtained in the traditional method (scanline), even in structurally complex masses. However, special care is required during flight planning and 3D point cloud processing. Furthermore, despite the limitations of the traditional method, it is still indispensable because it allows identifying the types of discontinuities.

Keywords: rock discontinuities; structure-from-motion; digital aerial photogrammetry; rock slopes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do talude de corte do km 6 da rodovia ES-482.....	20
Figura 2. Localização da Pedreira de Iracemápolis, SP.....	21
Figura 3. Mapa geológico da Folha Cachoeiro de Itapemirim (escala 1:100.000). Adaptado de Silva (1993) e Vieira et al. (2018).....	23
Figura 4. Coluna litoestratigráfica da Bacia do Paraná. Modificado de Machado (2005).....	25
Figura 5. Mapa geológico da região de Iracemápolis, SP. Adaptado de Serviço Geológico do Brasil (2022) e Machado (2005).....	26
Figura 6. Efeito da paralaxe em visão binocular.....	27
Figura 7. Vista em planta mostrando a obtenção de um par-estéreo. Legenda: c é o ângulo de convergência do eixo das câmeras e i o ângulo de intersecção dos raios de luz conectando o alvo ao centro da lente da câmera. Modificado de Dueholm (1992).....	12
Figura 8. Vista em planta de fotografias paralelas com 60% de sobreposição. Legenda: B é a distância entre as câmeras, D é a distância câmera-alvo, C é a distância focal e f o tamanho do frame. Modificado de Dueholm (1992).....	28
Figura 9. Ilustração da técnica <i>Structure-from-Motion</i> . P_1 , P_2 e P_3 são pontos de um alvo observados por uma câmera em posições distintas (C_1 , C_2 e C_3). P_{ij} é a projeção desses pontos (P_i) em C_j . V_i é o conjunto das câmeras em que P_i é visível. Adaptado de Furukawa e Ponce (2009).....	29
Figura 10. Principais etapas da técnica SfM-MVS.....	31
Figura 11. Subdivisão da nuvem de pontos 3D segundo o método <i>octree</i>	32
Figura 12. Subdivisão de um espaço 2D a partir da abordagem <i>quadtree</i> : (a) região de interesse, (b) matriz binária (0 e 1), com destaque para a região de interesse (região hachurada), (c) blocos máximos gerados na subdivisão recursiva; e (d) árvore <i>quadtree</i> . Os quadrados escuros numerados correspondem a região hachurada em roxo. Modificado de Samet (1990).....	34
Figura 13. Representação de uma árvore binária. Modificado de Tenenbaum (1995).....	34
Figura 14. Exemplo de uma árvore binária utilizando valores numéricos.....	35
Figura 15. Inserção de um ponto arbitrário na árvore binária exemplificada na Figura 14.....	36
Figura 16. Hierarquização do espaço utilizando a mediana por meio da consulta por janela: (a) exemplo básico de divisão do espaço bidimensional tendo como referência a mediana dos	

pontos; (b) exemplo da criação de nós em uma divisão recursiva para outro conjunto de pontos; (c) representação do registro de uma *quadtree*. Modificado de Robinson (1981), Procopiuc et al. (2003) e Samet (1990).....37

Figura 17. Exemplificação de como ocorre a classificação das faces em cores, de acordo com o *plugin* FACETS. Modificado de Jaboyedoff et al. (2007).....39

Figura 18. Fluxograma metodológico.....40

Figura 19. *Ground Sample Distance* (GSD): a) ilustração do sistema fotogramétrico para a obtenção do GSD; e b) influência da variação da altura no GSD e no *footprint* (cobertura) da imagem. Modificado de Gundlach (2014).....42

Figura 20. Esquema ilustrativo para aquisição das imagens de RPA para taludes.....44

Figura 21. Malhas de voo obtidas para o talude da rodovia de Cachoeira de Itapemirim: a) malha irregular manual (18/09/2020); b) malha regular automática (23/04/2023). Ao fundo, encontra-se as nuvens de pontos geradas.....45

Figura 22. Plano de voo da frente de lavra NW da pedreira de Iracemápolis (SP). Aplicativo Litchi (*Mission Hub Desktop*).....46

Figura 23. Malha de voo e nuvem de pontos da frente de lavra NW da pedreira de Iracemápolis, SP.....47

Figura 24. Ajuste do sistema de coordenadas da nuvem de pontos no *software* CloudCompare.....50

Figura 25. Parâmetros do algoritmo *Kd-tree*.....51

Figura 26. Vista geral do talude de corte do km 6 da ES-482.....52

Figura 27. Estereogramas de densidade de planos de foliação (a) e de fraturas (b). Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, igual área.....53

Figura 28. Objetos espúrios/indesejados (placa, cerca e automóvel) na nuvem de pontos do talude da ES-482 em diferentes perspectivas.....54

Figura 29. Nuvem de pontos colorida 3D da rodovia ES - 482: (a) nuvem de pontos completa; e (b) nuvem de pontos editada.....55

Figura 30. Calibração do algoritmo *Kd-tree* para o talude da ES-482 (nuvem no modo manual): (a) modelo estrutural gerado segundo o teste A; (b) modelo estrutural gerado segundo o teste B; e (c) modelo estrutural gerado segundo o teste C.....56

Figura 31. Modelo de faces gerado pelo algoritmo *Kd-tree* para o talude da rodovia ES-482 (nuvem no modo manual): (a) segmentação sem filtragem. Foram identificadas 4.248 medidas estruturais; e (b) segmentação com filtragem. Foram identificadas 1.803 medidas estruturais.

As linhas nos estereogramas à direita representam o círculo máximo modal dos pólos dos planos de foliação.....57

Figura 32. Fotografia dos planos de foliação (S) e dos planos de quebra (Q).....57

Figura 33. Mapa das normais z codificado em cores (nuvem no modo manual) para o talude da rodovia ES-482, no qual é possível visualizar a planaridade dos traços da foliação.....58

Figura 34. Modelo de faces gerado pelo algoritmo *Kd-tree* para o talude da rodovia ES-482 (nuvem no modo automático): (a) classificação sem filtragem. Foram identificadas 11.820 medidas estruturais; e (b) classificação com filtragem. Foram identificadas 5.142 medidas estruturais. As linhas nos estereogramas à direita representam o círculo máximo modal dos pólos dos planos de foliação.....59

Figura 35. Estereograma dos dados estruturais coletados pelo método tradicional (*scanline*) e derivados da segmentação da nuvem de pontos 3D. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior.....60

Figura 36. Vista em perspectiva frontal da frente de lavra NW da Pedreira de Iracemópolis, SP.....61

Figura 37. Feições geológicas verificadas na pedreira de Iracemópolis, SP: a) basalto de cor cinza; e b) veio de carbonato de granulação fina.....61

Figura 38. Estereograma de densidade de fraturas. O talude tem atitude $120^{\circ}/89^{\circ}$. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, igual área.....62

Figura 39. Mapa de densidade de fraturas da frente de lavra NW da pedreira de Iracemópolis, SP. Sistema de coordenadas arbitrário. O diagrama de roseta representa as orientações preferenciais de traços de fratura ponderadas pelo comprimento.....63

Figura 40. Exemplos de planos de fratura (irregulares, curvos) associados ao desmonte à fogo.....60

Figura 41. Nuvem de pontos colorida 3D da frente de lavra NW da pedreira de Iracemópolis, SP (nuvem câmera fixa): (a) nuvem de pontos completa; e (b) nuvem de pontos editada. As zonas oclusas correspondem as áreas brancas (vazios) do modelo.....65

Figura 42. Recorte de uma porção da nuvem de pontos 3D (câmera fixa): a) localização do recorte; e b) detalhe da feição.....66

Figura 43. Calibração dos parâmetros para a segmentação da nuvem de pontos 3D (câmera fixa) para uma estrutura geológica persistente: a) imagem do plano geológico amostrado; b) teste utilizando um raio de nucleação de 0.3 metros; c) teste utilizando um raio de nucleação de 1 metro; e d) teste utilizando um raio de nucleação de 0.8 metros. As cores indicam as famílias de planos estruturais. A cor magenta indica planos estruturais com atitude modal de $302^{\circ}/85^{\circ}$ e a cor verde planos estruturais com atitude modal $120^{\circ}/85^{\circ}$68

Figura 44. Modelo estrutural gerado pelo algoritmo *Kd-tree* para a frente de lavra *NW* da pedreira de Iracemápolis, SP (nuvem câmera fixa). À esquerda, modelo contendo 1.085 dados estruturais e à direita, estereograma de densidade de pólos, diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, igual área. Os círculos máximos no estereograma representam a atitude modal das famílias.....69

Figura 45. Modelo estrutural gerado pelo algoritmo *Kd-tree* para a frente de lavra *NW* da pedreira de Iracemápolis, SP (nuvem câmera inclinada). À esquerda, modelo contendo 1.097 dados estruturais e à direita, estereograma de densidade de pólos, diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, igual área. Os círculos máximos no estereograma representam a atitude modal das famílias.....70

Figura 46. Ilustração dos métodos de levantamento estrutural manual (scanline) e por RPA...72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Nuvens de pontos para os taludes de Cachoeiro de Itapemirim (ES) e de Iracemápolis (SP).....	48
Tabela 2. Nuvens de pontos geradas no modo <i>Ultra High</i> para os taludes estudados.....	49
Tabela 3. GSD e quantidade total de pontos obtidos para os sobrevoos do talude em Cachoeiro de Itapemirim (ES).....	54
Tabela 4. Parâmetros do algoritmo <i>Kd-tree</i> testados para a segmentação da nuvem de pontos 3D (modo manual) da rodovia ES-482.....	56
Tabela 5. Parâmetros do algoritmo <i>Kd-tree</i> adotados para a classificação da nuvem de pontos 3D (modo automático) da ES-482.....	58
Tabela 6. GSD e quantidade total de pontos obtidos para as nuvens de pontos para os sobrevoos com câmera fixa e inclinada para a frente de lavra <i>NW</i> da pedreira de Iracemápolis (SP).....	65
Tabela 7. Parâmetros do algoritmo <i>Kd-tree</i> adotados para uma porção do talude da frente de lavra <i>NW</i> da pedreira de Iracemápolis, SP (nuvem câmera fixa).....	66
Tabela 8. Parâmetros do algoritmo <i>Kd-tree</i> adotados para uma estrutura geológica de grande persistência no talude da frente de lavra <i>NW</i> da pedreira de Iracemápolis, SP (nuvem câmera fixa).....	67
Tabela 9. Parâmetros do algoritmo <i>Kd-tree</i> utilizados para a segmentação da nuvem (câmera fixa) do talude da frente de lavra <i>NW</i> da pedreira de Iracemápolis (SP).....	69
Tabela 10. Parâmetros do algoritmo <i>Kd-tree</i> utilizados para a segmentação da nuvem (câmera inclinada) do talude da frente de lavra <i>NW</i> da pedreira de Iracemápolis (SP).....	70
Tabela 11. Comparativo das famílias principais de descontinuidades identificadas pelo método tradicional e aqueles derivados da segmentação da nuvem de pontos 3D para o talude da frente de lavra <i>NW</i> da pedreira de Iracemápolis (SP).....	71
Tabela 12. Comparativo entre o método tradicional (scanline) e o método semiautomático para a obtenção de dados estruturais.....	73

LISTA DE ACRÔNIMOS

ESC - *Eletronic Speed Controller*

FOV - *Field of View*

GCP - *Ground Control Point*

GSD - *Ground Sample Distance*

IMU - *Inertial Measurement Unit*

RPA - *Remotely Piloted Aircraft Systems*

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

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	OBJETIVO.....	19
2.1	OBJETIVO GERAL.....	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3	ÁREAS DE ESTUDOS.....	20
3.1	TALUDE DO KM 6 DA RODOVIA ES-482	20
3.2	PEDREIRA DE IRACEMÁPOLIS.....	20
4	ASPECTOS GEOLÓGICOS E ESTRUTURAIS REGIONAIS.....	22
4.1	TALUDE DE CORTE DO KM 6 DA RODOVIA ES-482.....	22
4.2	PEDREIRA DE IRACEMÁPOLIS.....	24
5	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	27
5.1	STRUCTURE-FROM-MOTION E MULTI-VIEW STEREO.....	27
5.2	CLASSIFICAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS 3D.....	32
6	MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
6.1	LEVANTAMENTO TRADICIONAL	41
6.2	LEVANTAMENTO POR RPA.....	41
6.2.1	<i>Planejamento do sobrevoo</i>	<i>41</i>
6.2.2	<i>Execução do sobrevoo</i>	<i>45</i>
6.2.3	<i>Processamento das imagens aéreas</i>	<i>47</i>
6.3	IDENTIFICAÇÃO DAS FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES A PARTIR DA NUVEM DE PONTOS	49
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
7.1	TALUDE DO KM 6 DA RODOVIA ES-482	52
7.1.1	<i>Levantamento tradicional de campo</i>	<i>52</i>
7.1.2	<i>Nuvem de pontos 3D.....</i>	<i>53</i>
7.2	PEDREIRA DE IRACEMÁPOLIS.....	60
7.2.1	<i>Levantamento tradicional de campo</i>	<i>60</i>
7.2.2	<i>Interpretação fotolitológica</i>	<i>62</i>
7.2.3	<i>Nuvem de pontos 3D.....</i>	<i>64</i>
8	BENEFÍCIOS E LIMITAÇÕES.....	72
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74

10	REFERÊNCIAS.....	76
11	APÊNDICE – RELATÓRIOS DE QUALIDADE.....	85
11.1	APÊNDICE A – RODOVIA ES-482 (VOO MANUAL).....	85
11.2	APÊNDICE B – RODOVIA ES-482 (VOO AUTOMÁTICO).....	90
11.3	APÊNDICE C – PEDREIRA IRACEMÁPOLIS (CÂMERA FIXA).....	96
11.4	APÊNDICE D – PEDREIRA IRACEMÁPOLIS (CÂMERA INCLINADA).....	101

1 INTRODUÇÃO

As descontinuidades geológicas são planos estruturais que possuem um papel crítico na estabilidade e comportamento dos taludes (STEAD e WOLTER, 2015). Essas feições que abarcam juntas, foliações, acamamento sedimentar e veios, são responsáveis por controlar a estabilidade de taludes rochosos (MATHESON, 1988; HARTWIG e PINHEIRO, 2022), uma vez que provocam mudanças em suas propriedades mecânicas (HUDSON e HARRISON, 1997; WYLLIE e MAH, 2004), podendo levar à desestabilização. Por esta razão, é fundamental a caracterização estrutural de taludes para a orientação de projetos de engenharia e estabilização de taludes naturais (HUDSON e HARRISON, 1997; STEAD e WOLTER, 2015).

A coleta de dados estruturais é realizada usualmente na base da face exposta do talude, visando identificar as famílias de fratura e as propriedades mecânicas dos planos, como abertura, rugosidade, persistência etc. A determinação da atitude baseia-se na utilização de bússolas ao longo de perfis, denominados como *scanlines* (HERGET, 1977; DAVIS e REYNOLDS, 1996). Esses levantamentos são realizados de forma manual e, segundo Buyer, Aichinger e Schubert (2019), são dependentes da experiência do analista. Consequentemente, os dados podem exibir viés humano, especialmente em maciços com geometrias complexas (ISRM, 2007; MENEGONI *et al.*, 2019). Além disso, o método manual apresenta limitações, como o elevado tempo para a coleta dos dados, a representatividade (NAGENDRAN, ISMAIL e TUNG, 2019a) e dificuldade de acesso a áreas específicas, como áreas instáveis, densamente vegetadas ou devido a presença de animais peçonhentos.

Neste sentido, os VANTs (Veículos Aéreos Não-Tripulados) ou RPA (*Remotely Piloted Aircraft*) têm se mostrado uma ferramenta valiosa para fins de levantamento estrutural de taludes rochosos, pois permitem a cobertura completa do talude de forma rápida e econômica, não se restringindo apenas as seções acessíveis pelo método manual (SALVINI *et al.*, 2017; MENEGONI *et al.*, 2019; PAPATHANASSIOU *et al.*, 2020; VILLAREAL, ROJAS e RÍOS, 2020; BATTULWAR *et al.*, 2021; COLICA *et al.*, 2021; FILICE *et al.*, 2022; MINEO, CALIÓ e PAPPALARDO, 2022).

Além disso, os produtos derivados de imagens de RPA são comparáveis com outros métodos de levantamento estrutural bastante precisos, porém muito onerosos, como o 3D *laser scanner* terrestre (COLOMINA *et al.*, 2008; REMONDINO *et al.*, 2012; HUGENHOLTZ *et al.*, 2013; BARLOW, GILHAM e IBARRA COFRÃ, 2017; BATTULWAR *et al.*, 2021). Cawood *et al.* (2017) compararam a cobertura dos dados e a precisão de modelos estruturais gerados a partir de levantamentos tradicionais, 3D *laser scanner* terrestre e RPA. Apesar do *laser scanner* possuir maior precisão e fidelidade na representação das estruturas, o modelo estrutural do RPA apresenta-se mais confiável devido ao melhor recobrimento do afloramento, permitindo assim uma maior continuidade e regularidade na obtenção dos dados.

O processamento das imagens aéreas obtidas por RPA resulta em uma nuvem de pontos 3D, podendo conter milhões de pontos que representam a estrutura do objeto imageado. Esta nuvem de pontos pode então ser segmentada por meio de critérios de coplanaridade para a determinação semiautomática das famílias de descontinuidade geológica (LYONS-BARAL e KEMENY, 2016; BARLOW, GILHAM e IBARRA COFRÃ, 2017; TUNG, NAGENDRAN, ISMAIL, 2018; ZIMMERER, 2018; GIORDAN *et al.*, 2020). O uso de *software* de processamento de nuvem de pontos para a caracterização estrutural tem se tornado cada vez mais frequente nas Geociências (NAGENDRAN, ISMAIL e TUNG, 2019b; FILICE *et al.*, 2022; MINEO, CALIÒ e PAPPALARDO, 2022). Apesar das vantagens desta abordagem, ainda são bastante escassos estudos utilizando produtos derivados de RPA para fins de levantamentos estruturais de taludes no país (VIANA *et al.*, 2019; HARTWIG e SANTOS, 2022). Dessa forma, o objetivo desse trabalho é avaliar o uso de produtos derivados de imagens de RPA em levantamentos estruturais de maciços rochosos com características estruturais e geológicas distintas. Foram selecionados dois taludes de estudo, um no qual a principal feição estrutural é o bandamento gnáissico e o outro que compreende um maciço fraturado constituído por basaltos.

2 OBJETIVO

2.1 *Objetivo geral*

Avaliar o uso de produtos derivados de imagens de RPA em levantamentos estruturais de maciços rochosos com características estruturais e geológicas distintas.

2.2 *Objetivos específicos*

- Analisar as limitações de cada método;
- Analisar a aplicação de RPA na extração de estruturas geológicas;
- Analisar o comportamento da classificação semiautomática em diferentes estruturas;
- Comparar os resultados do método tradicional e do método semiautomático.

3 ÁREAS DE ESTUDOS

3.1 Talude do km 6 da rodovia ES-482

O talude em questão está localizado na região central do município de Cachoeiro de Itapemirim, porção sul do estado do Espírito Santo. O talude é do tipo corte de estrada e está localizada no km 6 da rodovia ES – 482, que liga os municípios de Jerônimo Monteiro e Cachoeiro de Itapemirim (Figura 1).

Figura 1. Localização do talude de corte do km 6 da rodovia ES-482.

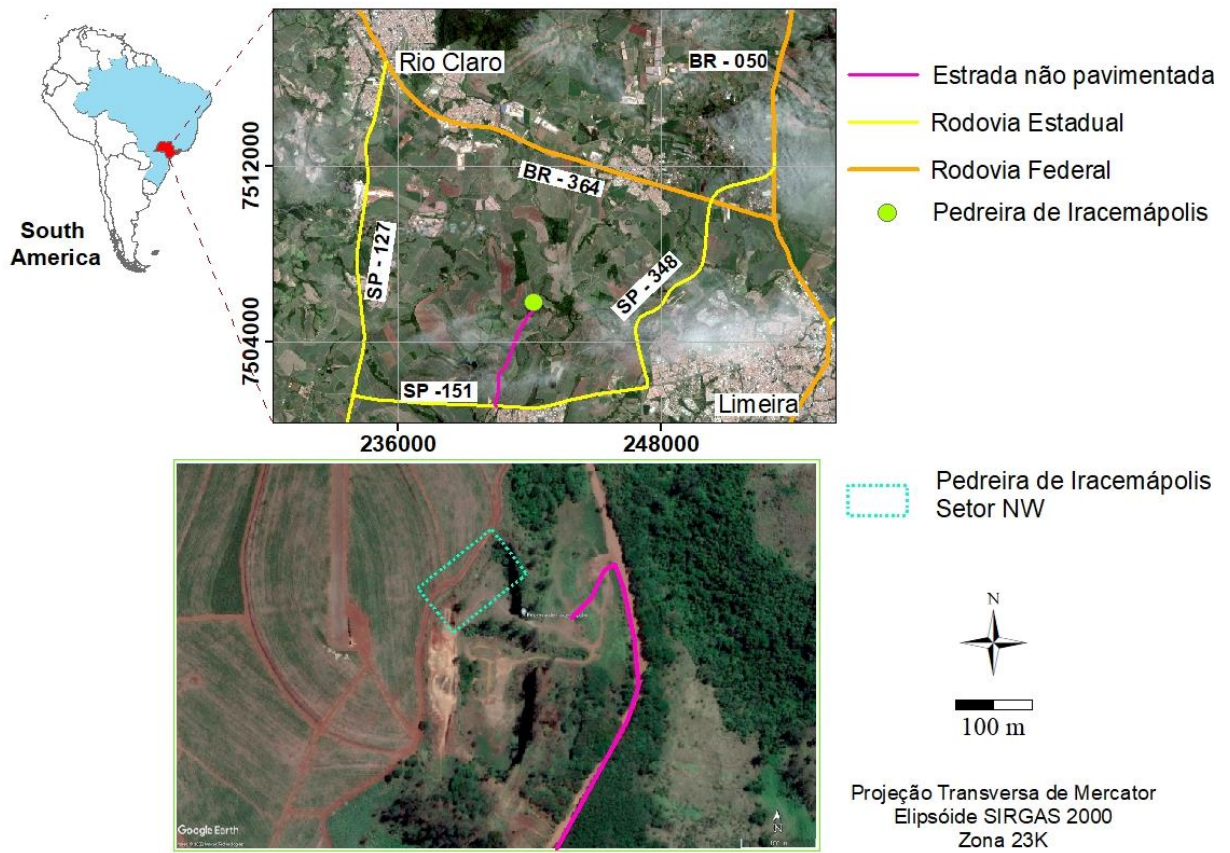


Fonte: Elaborado pelo autor

3.2 Pedreira de Iracemápolis

A Pedreira de Iracemápolis está localizada no extremo norte do município de Iracemápolis (SP), próximo ao limite do município de Santa Gertrudes (Figura 2). A Pedreira possui 319 metros de comprimento e 138 metros de largura. Atualmente, encontra-se inativa, mas é utilizada para fins recreativos e práticas esportivas. O talude estudado corresponde à frente de lavra NW e foi selecionado devido à presença de escombros em sua base, decorrentes da queda de blocos (rupturas passadas).

Figura 2. Localização da Pedreira de Iracemápolis, SP.



Fonte: Elaborado pelo autor

4 ASPECTOS GEOLÓGICOS E ESTRUTURAIS REGIONAIS

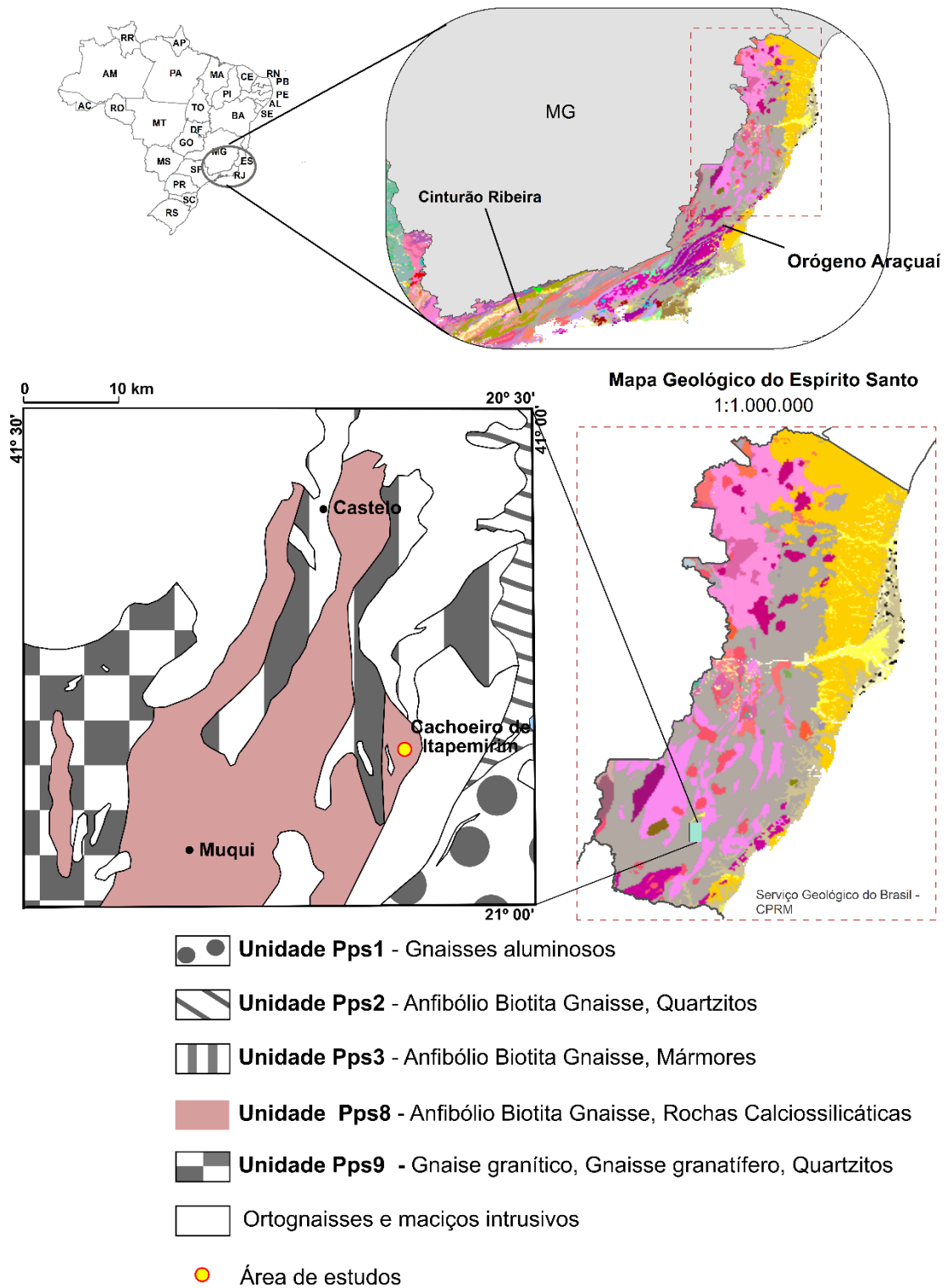
4.1 Talude de corte do km 6 da rodovia ES-482

A área de estudos está contida no Núcleo Cristalino do Orógeno Araçuaí, o qual desenvolveu-se no final do Neoproterozoico, em virtude da amalgamação do Gondwana ocidental. Contido nesse núcleo está o arco magmático do Rio Doce, cujas sequências supracrustais são caracterizadas pelas sucessões metavulcano-sedimentares do Grupo Rio Doce e sequências metassedimentares depositadas em bacias de antearco (PEIXOTO *et al.*, 2015) e retroarco (GRADIM *et al.*, 2014), que incluem os complexos paragnáissicos Nova Venécia e Paraíba do Sul.

Baltazar (1993) relata que os principais agrupamentos litológicos cartografados na Folha Cachoeiro de Itapemirim incluem terrenos orto- e paraderivados. Os terrenos ortoderivados são caracterizados por gnaisses e granitoides porfiroblásticos equigranulares, de composição tonalítica. Já os terrenos paraderivados englobam gnaisses aluminosos migmatizados ou não. O metamorfismo dessas rochas é de médio a alto grau e varia desde a isógrada da cordierita até da estauroлита (PADILHA, 1993).

Silva (1993) reconheceu nove unidades de mapeamento (Pps1 a Pps9) no Complexo Paraíba do Sul, descritas como uma assembleia de rochas supracrustais com características vulcano-sedimentares, migmatizadas e granitizadas. A área de estudos se encontra na unidade Pps8 (Figura 3), que compreende um anfibólio biotita gnaisse com intercalações de anfibólitos, quartzitos, rochas calciossilicáticas e gnaisses aluminosos, com estrutura migmatítica dobrada.

Figura 3. Mapa geológico da Folha Cachoeiro de Itapemirim (escala 1:100.000).



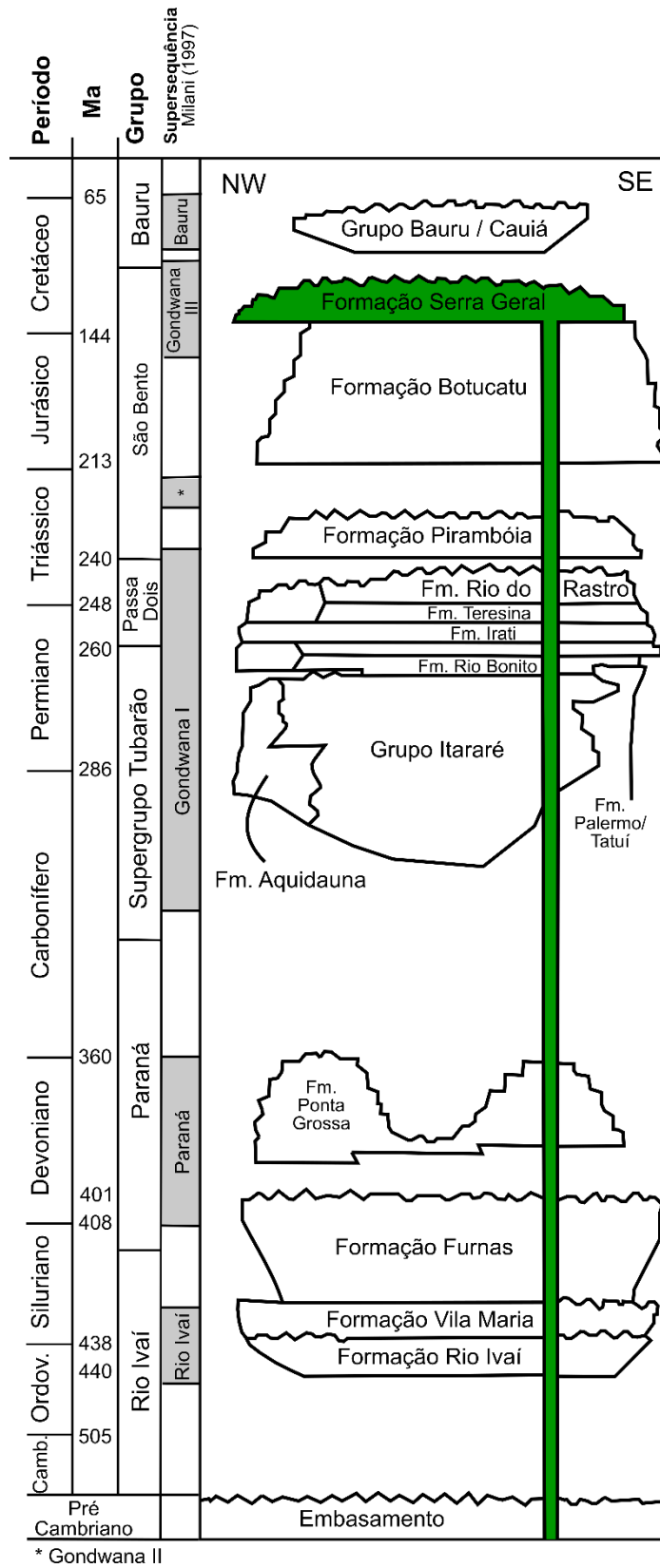
Fonte: Adaptado de Silva (1993) e Vieira *et al.* (2018).

4.2 Pedreira de Iracemópolis

A pedreira está situada na Bacia Sedimentar do Paraná de idade Siluriana (ALMEIDA, 1977). A Bacia do Paraná é uma sinéclise intracratônica, cuja origem está atrelada ao Supercontinente Gondwana e seus ciclos tectônicos (PEREIRA *et al.* 2012). Ela é constituída por espessas camadas de sedimentos com leve mergulho para W, as quais foram separadas por Milani (1997) em seis supersequências: Rio Ivaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Bauru (Figura 4). Cada sequência apresenta características próprias, relacionadas às condições tectônicas e climáticas vigentes à época. Registros magmáticos estão relacionados a Supersequência Gondwana III, caracterizados por extensos derrames de basalto toleítico sub-horizontais, com inclinação média de 5° para o centro da bacia (ALMEIDA, CARNEIRO e BARTORELLI, 2012), originadas pelo processo de rifteamento do Supercontinente Gondwana, e que culminou na abertura do Oceano Atlântico Sul (MARQUES e ERNESTO, 2004).

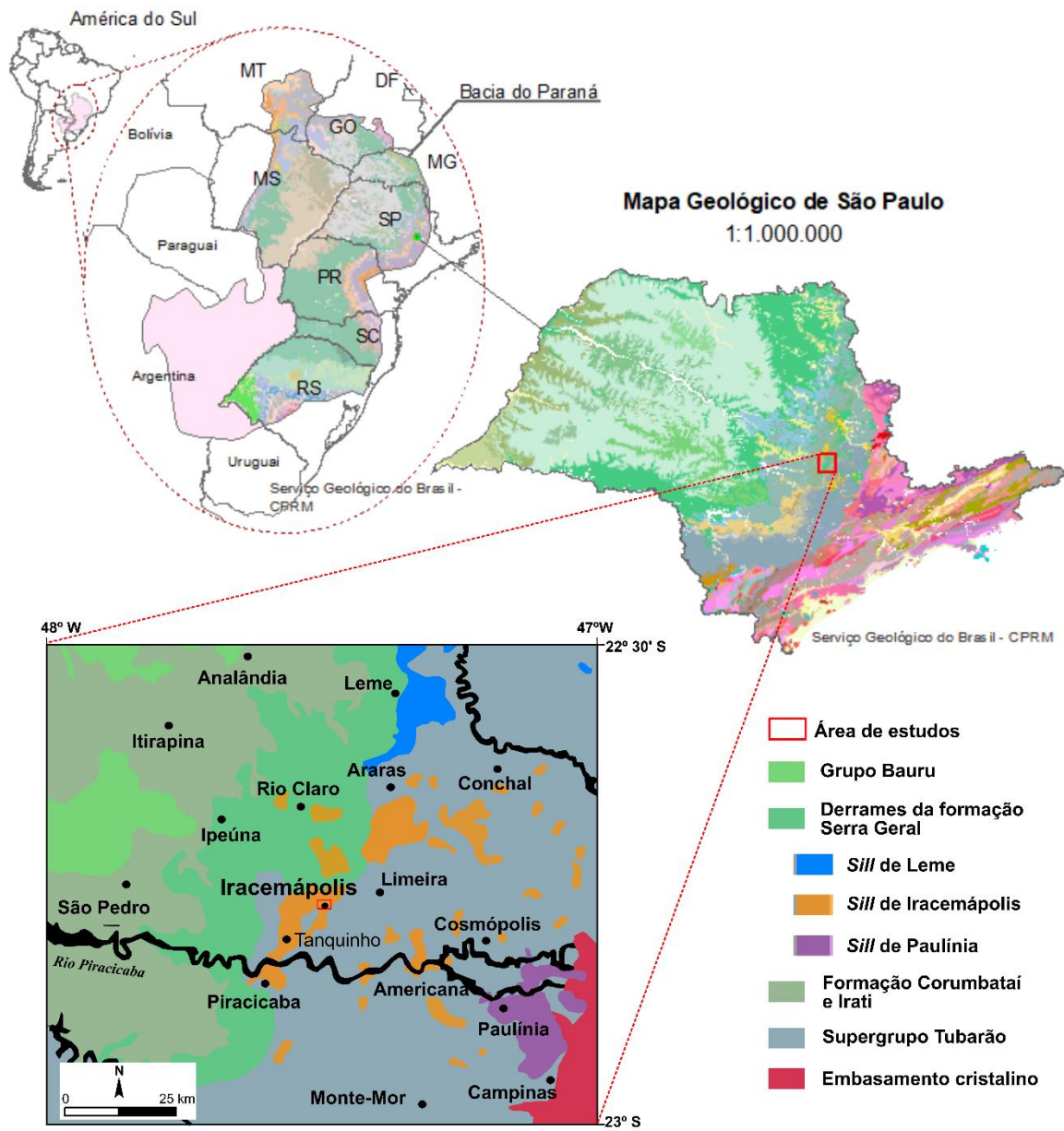
Estes derrames integram a Formação Serra Geral (Figura 5), datada do Cretáceo Inferior, constituída principalmente por basalto e diabásio (MEZZALIRA, 1965; MACHADO *et al.*, 2005; MILANI *et al.*, 2007). Sobreposto e sotoposto a essa unidade ocorrem, respectivamente, o Grupo Bauru e a Formação Botucatu (Grupo São Bento). O afloramento estudado pertence ao Grupo de *Sills* de Iracemópolis (GSI) descrito por Machado (2005).

Figura 4. Coluna litoestratigráfica da Bacia do Paraná.



Fonte: Modificado de Machado (2005).

Figura 5. Mapa geológico da região de Iracemápolis, SP.



Fonte: Adaptado de Serviço Geológico do Brasil (2022) e Machado (2005).

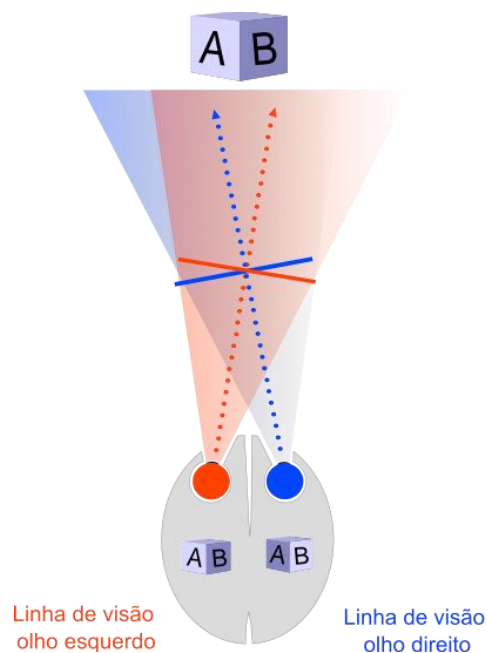
5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A identificação de planos estruturais em maciços rochosos por meio de produtos derivados de RPA é baseada em técnicas de aerofotogrametria digital, que utilizam algoritmos de correspondência de imagens (GAICH e PISCHINGER, 2016), combinadas a algoritmos de agrupamento de pontos por meio de critérios de coplanaridade.

5.1 *Structure-from-Motion e Multi-view Stereo*

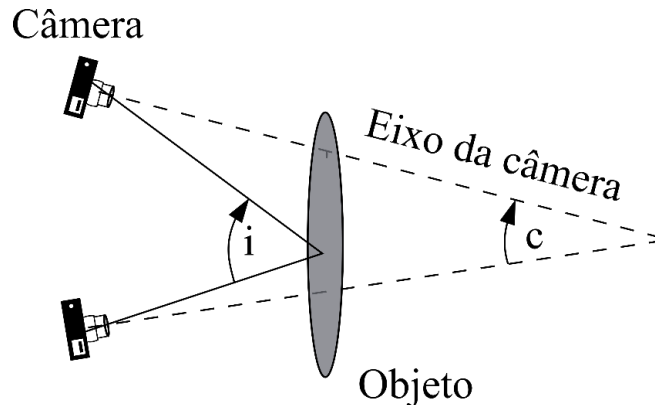
A paralaxe é o princípio básico da fotogrametria. Ela consiste no deslocamento relativo de um objeto em função da diferença de perspectiva do observador (Figura 6). Bolles, Baker e Marimont (1987) afirmam que a dificuldade na correspondência de objetos em uma imagem aumenta quando aumenta a distância entre os centros perspectivos de suas lentes. Consequente, Dueholm (1992) menciona que a visualização estereoscópica começa a ser comprometida quando o ângulo de convergência desses centros perspectivos em relação ao objeto é maior que 20° , uma vez que a percepção estereoscópica depende de um ângulo de convergência (c) entre os eixos da câmera (Figura 7).

Figura 6. Efeito da paralaxe em visão binocular.



Fonte: Elaborado pelo autor

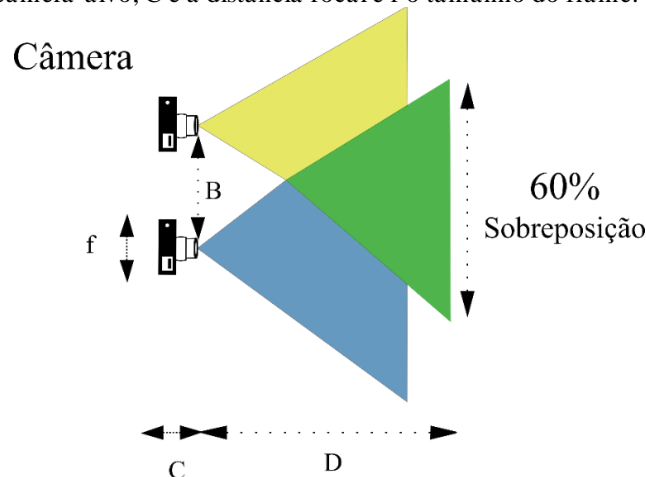
Figura 7. Vista em planta mostrando a obtenção de um par-estéreo. Legenda: c é o ângulo de convergência do eixo das câmeras e i o ângulo de intersecção dos raios de luz conectando o alvo ao centro da lente da câmera.



Fonte: Modificado de Dueholm (1992).

Dessa forma, a fotogrametria é uma técnica que permite extrair medidas a partir de fotografias, possibilitando a reconstrução de um objeto tridimensional a partir de imagens bidimensionais (BRITO e COELHO, 2007). Para que haja a visão estereoscópica para a reconstrução, é necessário que ao menos duas imagens sejam tomadas de ângulos diferentes e que haja sobreposição entre elas. Segundo Dueholm (1992), as imagens devem ter, no mínimo, uma sobreposição de 60% e os eixos da câmera devem estar paralelos para que haja uma melhor percepção estereoscópica. Todavia, o autor comenta que variações excessivas de profundidade podem dificultar a percepção estereoscópica (Figura 8), sendo recomendável, nesses casos, aumentar a sobreposição para 80%. Nex e Remondino (2014) relatam que na fotogrametria digital, as sobreposições são calculadas a partir do centro perspectivo da câmera (*waypoints*) e podem variar de acordo com o objetivo do voo. Dessa forma, *waypoints* são pontos fixos utilizados para a tomada fotográfica.

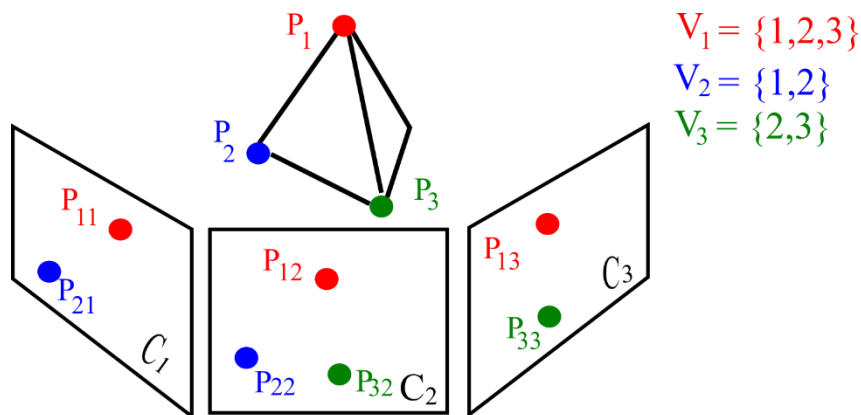
Figura 8. Vista em planta de fotografias paralelas com 60% de sobreposição. Legenda: B é a distância entre as câmeras, D é a distância câmera-alvo, C é a distância focal e f o tamanho do frame.



Fonte: Modificado de Dueholm (1992).

Structure-from-Motion (SfM), segundo Westoby *et al.* (2012), é uma técnica que deriva da visão computacional e funciona sob os mesmos preceitos básicos da fotogrametria estereoscópica tradicional, sendo diferenciada pela utilização de um algoritmo que, por meio de um procedimento iterativo, extrai de forma automática a geometria e a orientação do alvo na cena a partir da posição e pose da câmera. Este algoritmo é baseado no deslocamento e sobreposição de pares-estéreo a partir de pontos homólogos das imagens (Figura 9), seguindo o preceito da colineariedade ou coplanaridade de uma sequência de imagens (WESTOBY *et al.*, 2012; NASRULLAH, 2016; AMORIM, 2020). Essa é uma técnica flexível, pois permite a geração de uma estrutura 3D por meio de pontos similares (homólogos) em um conjunto de imagens, a partir de sua radiância (HEEL, 1990; VIANA, 2021), denominado por Kutulakos e Seitz (2000) de fotoconsistência. Para Mineo, Caliò e Pappalardo (2022), essa técnica possibilita a reconstrução de modelos tridimensionais de forma confiável. Além disso, ela também permite estimar as posições da câmera e as coordenadas dos alvos.

Figura 9. Ilustração da técnica *Structure-from-Motion*. P_1 , P_2 e P_3 são pontos de um alvo observados por uma câmera em posições distintas (C_1 , C_2 e C_3). P_{ij} é a projeção desses pontos (P_i) em C_i . V_i é o conjunto das câmeras em que P_i é visível.



Fonte: Adaptado de Furukawa e Ponce (2009).

Na abordagem SfM não há a necessidade de uma informação tridimensional, nem de um controle rigoroso quanto aos parâmetros da câmera (*e.g.* distância focal, objetiva, distorção de lente), o que possibilita trabalhar com um conjunto maior de imagens de uma única vez. Esses fatores permitem a redução de erros, pois cada ponto no modelo é visto por diversas fotografias, ao contrário da fotogrametria tradicional. Contudo, segundo Nasrullah (2016), a não utilização de câmeras calibradas exige estimativas robustas para a determinação de seus parâmetros internos como a geometria da cena, o que pode demandar maior tempo de processamento. Para Dueholm (1992), as posições de coordenadas tridimensionais podem ser

calculadas a partir de um par de fotografias, desde que elas sejam obtidas a partir de diferentes posições. Para este autor, a percepção estereoscópica do modelo é importante para a interpretação e estimativa de coordenadas, uma vez que são dependentes dessa geometria. Essa estimativa é realizada por meio de uma matriz de pontos correspondentes. De tal forma que, a partir de um par de imagens iniciais, o algoritmo buscará a próxima imagem que compartilhará o mesmo ponto comum e irá adicioná-la em seguida. Esse processo ocorre de forma automática e resultará em um conjunto de imagens conectadas, os quais definirão a técnica *Structure-from-Motion* (SfM).

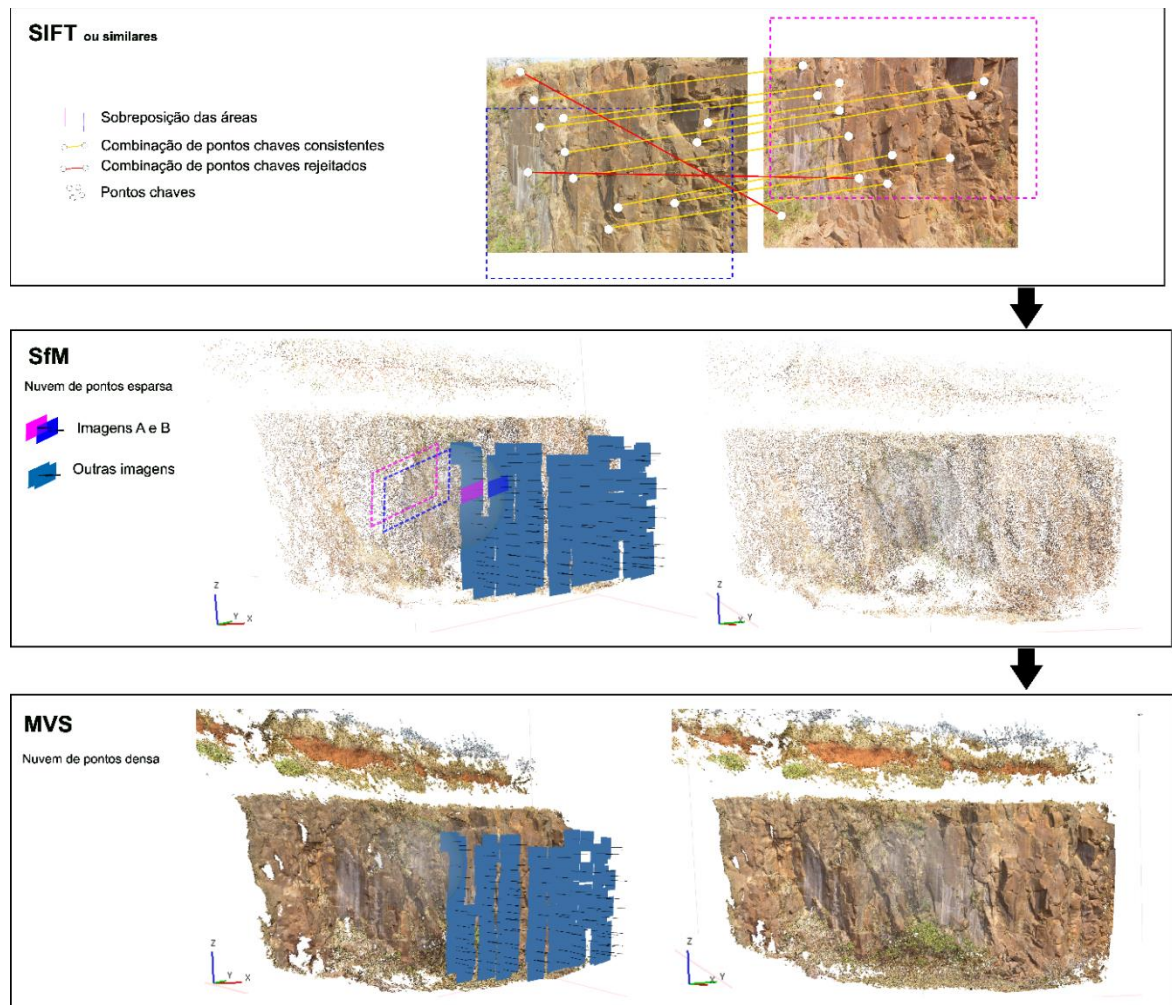
Lowe (2004) afirma que as imagens possuem feições características que permitem combinar diferentes imagens de um objeto ou cena. Cada feição é distinta entre si e não varia a mudanças sutis de iluminação e do ponto de vista da câmera, em decorrência de sua frequência e de suas localizações espaciais, reduzindo assim possíveis confusões e ruídos. Westoby *et al.* (2012) relatam que o tempo de processamento está relacionado a complexidade da imagem. Os mesmos autores afirmam que após a identificação das características individuais em cada imagem e realizada a correspondência entre essas imagens, combinando os pontos chave a partir de um algoritmo de vizinho mais próximo aproximado, é gerada uma nuvem de pontos 3D esparsa. Essa nuvem de pontos 3D ao ser gerada está em um sistema de coordenadas relativo denominada de ‘imagem-objeto’. Esse sistema de coordenadas é derivado dos sistemas de coordenadas das imagens (bidimensionais), denominado de ‘espaço-imagem’, o qual é utilizado para reconhecimento pelo algoritmo (BISTACCHI *et al.*, 2015). O autor acrescenta que em muitos casos, a transformação das coordenadas relativas em um sistema de coordenadas absoluto pode ser feita usando uma transformação de similaridade baseada em pontos de controle do solo com coordenadas reais conhecidas.

Segundo Bistacchi *et al.* (2015), a técnica SfM-MVS compreende quatro etapas:

1. Reconhecimento automático de feições em cada imagem, invariantes da escala e rotação da imagem – *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT);
2. Reconhecimento automático de características comuns (pontos chaves) em todas as imagens;
3. Orientação dos parâmetros internos e externos da câmera, assim como a solução do sistema de equações de projeção e a saída das coordenadas X, Y e Z das feições vistas na imagem para a geração a nuvem de pontos esparsos (SfM);
4. Geração da nuvem densa de pontos (MVS).

Nasrullah (2016) descreve que o produto da correspondência de pontos homólogos nas imagens é uma nuvem esparsa de pontos. Consequentemente, esse resultado é insuficiente para muitas aplicações. O algoritmo *Multi-View Stereo* (MVS) permite adensar a nuvem de pontos 3D. Ele é capaz de reconstruir tridimensionalmente um objeto a partir de um conjunto de imagens calibradas, mesmo possuindo câmeras de baixa resolução (SEITZ *et al.*, 2006; FURUKAWA e PONCE, 2009). Para essa reconstrução ser confiável é necessário que o objeto seja recoberto por imagens em diferentes ângulos e que haja um alto grau de sobreposição dessas imagens. O produto final será uma nuvem de pontos 3D densa, gerada a partir desse conjunto de imagens. Essa nuvem de pontos é gerada em um sistema de coordenadas relativo, o qual deve ser alinhado a um sistema de coordenadas real. A Figura 10 ilustra as principais etapas envolvidas para a geração da nuvem de pontos densa. Cabe lembrar que todas essas etapas ocorrem de forma automática em grande parte dos softwares de fotogrametria digital.

Figura 10. Principais etapas da técnica SfM-MVS.

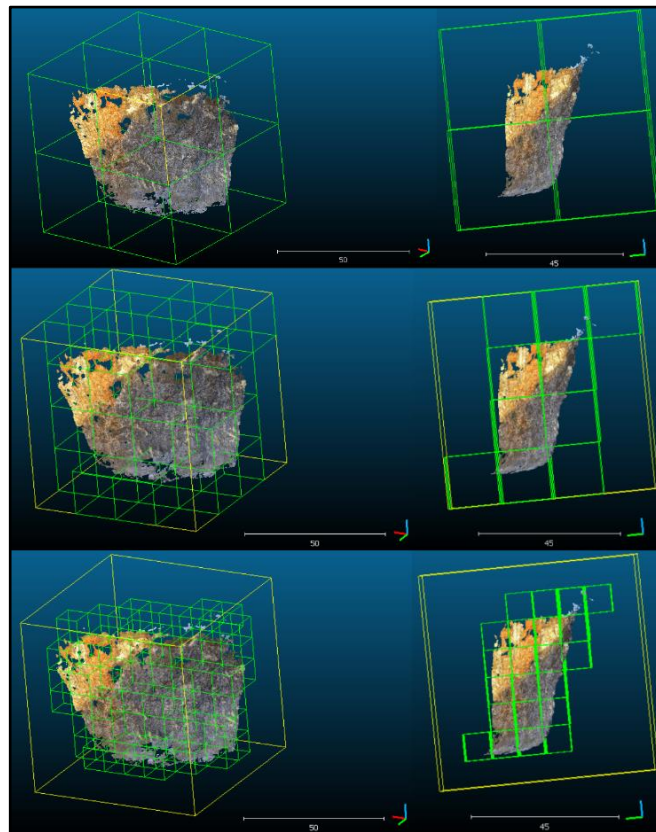


Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 Classificação da nuvem de pontos 3D

O CloudCompare é um aplicativo computacional dedicado a edição e processamento de nuvens de pontos 3D. Para tal, utiliza uma estrutura de dados em árvore denominada *octree* devido a sua eficiência (BENTLEY, 1975). O aplicativo simula uma estrutura de árvore hierárquica, a partir de um valor raiz (nó pai), origina-se subárvores filhas (conjunto de nós vinculados). Em outras palavras, o aplicativo subdivide uma caixa delimitadora inicial em oito subcubos equivalentes menores. Dessa forma, as células *octrees* serão partições recursivas de um volume cúbico no espaço, conforme observado na Figura 11.

Figura 11. Subdivisão da nuvem de pontos 3D segundo o método *octree*.



Fonte: Elaborado pelo autor

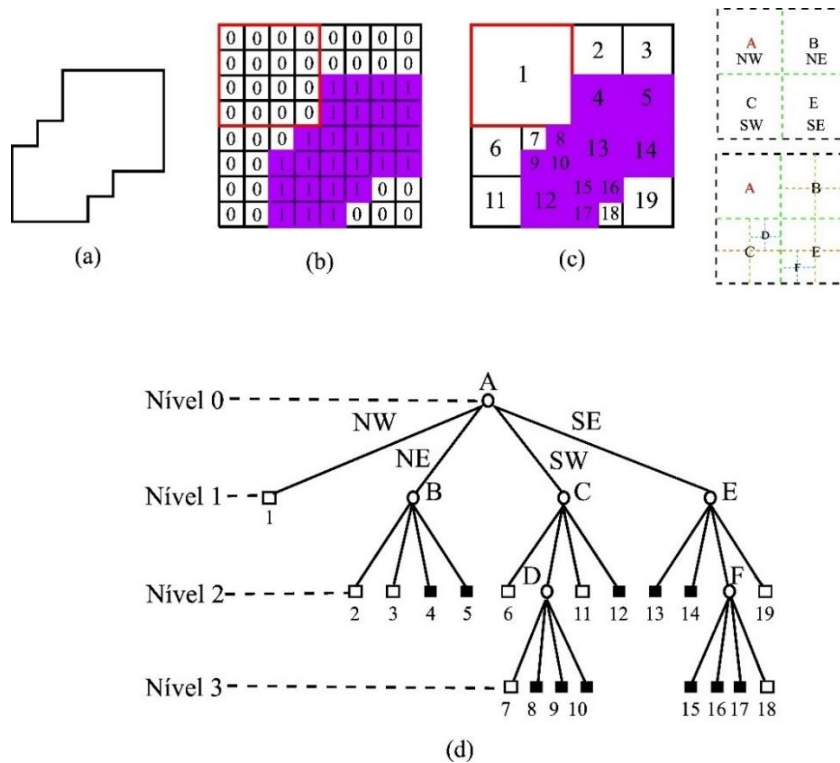
Os trabalhos de Samet (1990) e Tenenbaum (1995) serviram de base para a explicação de estruturas de dados tipo árvore. A fim de facilitar a compreensão desse tipo de estrutura, considerar-se-á primeiramente dados bidimensionais.

Uma imagem é composta por uma matriz de elementos denominada pixel. Quando esses elementos assumem valores igual a 0 (preto) ou 1 (branco), os dados são do tipo binário. A

partir de uma matriz de elementos de imagem em duas dimensões, cuja borda é o limite da matriz de pixels, dois pixels são adjacentes caso sejam adjacentes horizontalmente, verticalmente ou diagonalmente e podem ser considerados um conjunto caso exista uma sequência de pixels. Uma fronteira é formada por um conjunto de pixels pretos em contato com um conjunto de pixels brancos. No caso de blocos 3D regulares as definições são semelhantes.

Algumas classes de estruturas de dados hierárquicos como o *quadtree* e *octree* são baseadas no princípio da decomposição recursiva do espaço. A decomposição pode ser em partes iguais em cada nível (polígonos regulares, denominados como decomposição regular), ou pode ser estabelecida pelo usuário. A representação *quadtree* de dados está relacionada com a representação de dados bidimensionais, enquanto o *octree* está relacionada a dados tridimensionais. A abordagem *quadtree* é baseada na subdivisão sucessiva de uma matriz de dados limitada em quatro quadrantes de tamanhos iguais. Se a matriz não consiste inteiramente de pixels com valor igual a 1 ou inteiramente igual a 0, ela é subdividida em quadrantes, subquadrantes e assim por diante, até que sejam obtidos blocos regulares que consistem inteiramente de pixels com valores iguais a 1 ou inteiramente iguais a 0. Em outras palavras, cada bloco está inteiramente contido na região delimitada ou totalmente desarticulado dela. Na Figura 12, 1 corresponde aos elementos (pixels) da região de interesse e 0 corresponde aos elementos fora dela. Os resultados dos blocos foram gerados a partir de matriz binária e o processo é representado por uma árvore de nível 4.

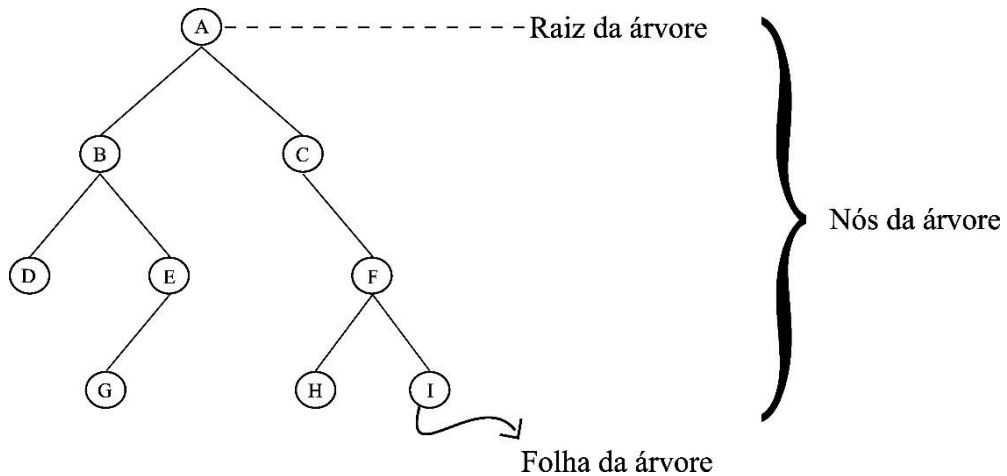
Figura 12. Subdivisão de um espaço 2D a partir da abordagem *quadtree*: (a) região de interesse, (b) matriz binária (0 e 1), com destaque para a região de interesse (região hachurada), (c) blocos máximos gerados na subdivisão recursiva; e (d) árvore quadtree. Os quadrados escuros numerados correspondem a região hachurada em roxo.



Fonte: Modificado de Samet (1990).

O preenchimento da árvore segue uma lógica simples. A partir do nó principal (raiz da árvore) serão derivados dois subconjuntos denominados subárvore da esquerda e da direita. A Figura 13 representa uma árvore com nove nós, sendo o nó A a raiz, a subárvore da esquerda está enraizada em B e a subárvore da direita, em C.

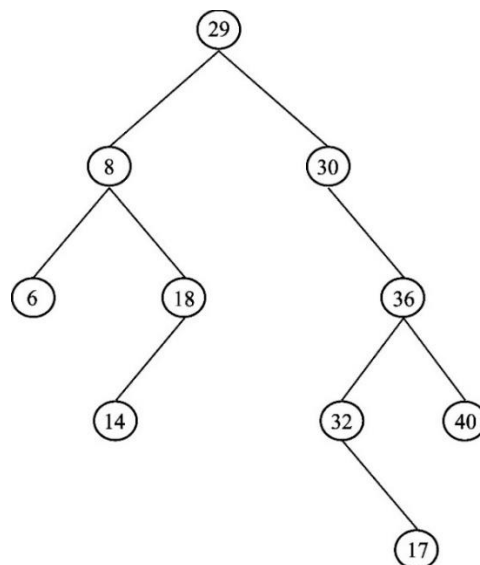
Figura 13. Representação de uma árvore binária.



Fonte: Modificado de Tenenbaum (1995).

A título de exemplo, irá ser seguido o caminho da esquerda. A mesma lógica funcionará para o caminho da direita. O nó B é ancestral dos nós D e E, além de ser descendente (filho) esquerdo do nó A. O nó E possui uma subárvore esquerda e uma subárvore direita vazia. O nó que não apresentar nenhuma subárvore é denominado folha da árvore. A profundidade de uma árvore é o nível máximo de uma folha na árvore. A enumeração dos nós é feita em diferentes ordenamentos a depender de cada caso. Cada uma dessas metodologias é definida recursivamente, de modo a visitar a raiz e suas subárvores. Vários algoritmos que utilizam árvores binárias seguem duas fases, a primeira constrói a árvore e a segunda percorre a árvore. Para facilitar a compreensão, será dado um exemplo com valores numéricos (Figura 14).

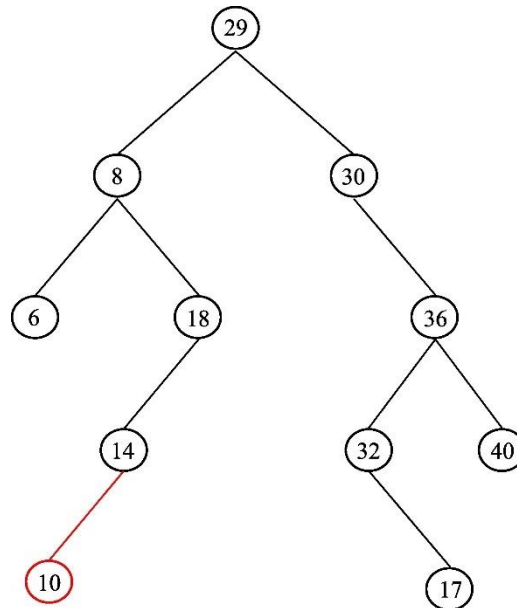
Figura 14. Exemplo de uma árvore binária utilizando valores numéricos.



Fonte: Elaborado pelo autor

Bentley (1979) descreve que a ramificação esquerda (subárvore esquerda) ocorre quando um número é comparado ao conteúdo do nó ancestral e seu valor é menor que o nó. Na ramificação direita ocorre o oposto, ou seja, se ele for maior ou igual ao nó. Compara-se então o valor (X) ao valor do nó raiz (Y). Se X é menor que Y, então a busca para inserir X continua pelo filho da esquerda do nível superior. Se X é maior que Y, então a busca continuará para o filho direito do nível superior. Se X for igual a Y, então seu local foi encontrado e será gerado um nó à árvore. Esse processo continua descendo a árvore até que todos os elementos de busca sejam localizados. Dessa forma, os nós funcionam como registro e como direção de pesquisa (BENTLEY, 1979; PROCOPIUC *et al.*, 2003). Como exemplo prático, a inserção do número 10 à árvore da Figura 14, segundo a metodologia acima descrita, ela ficará conforme a Figura 15.

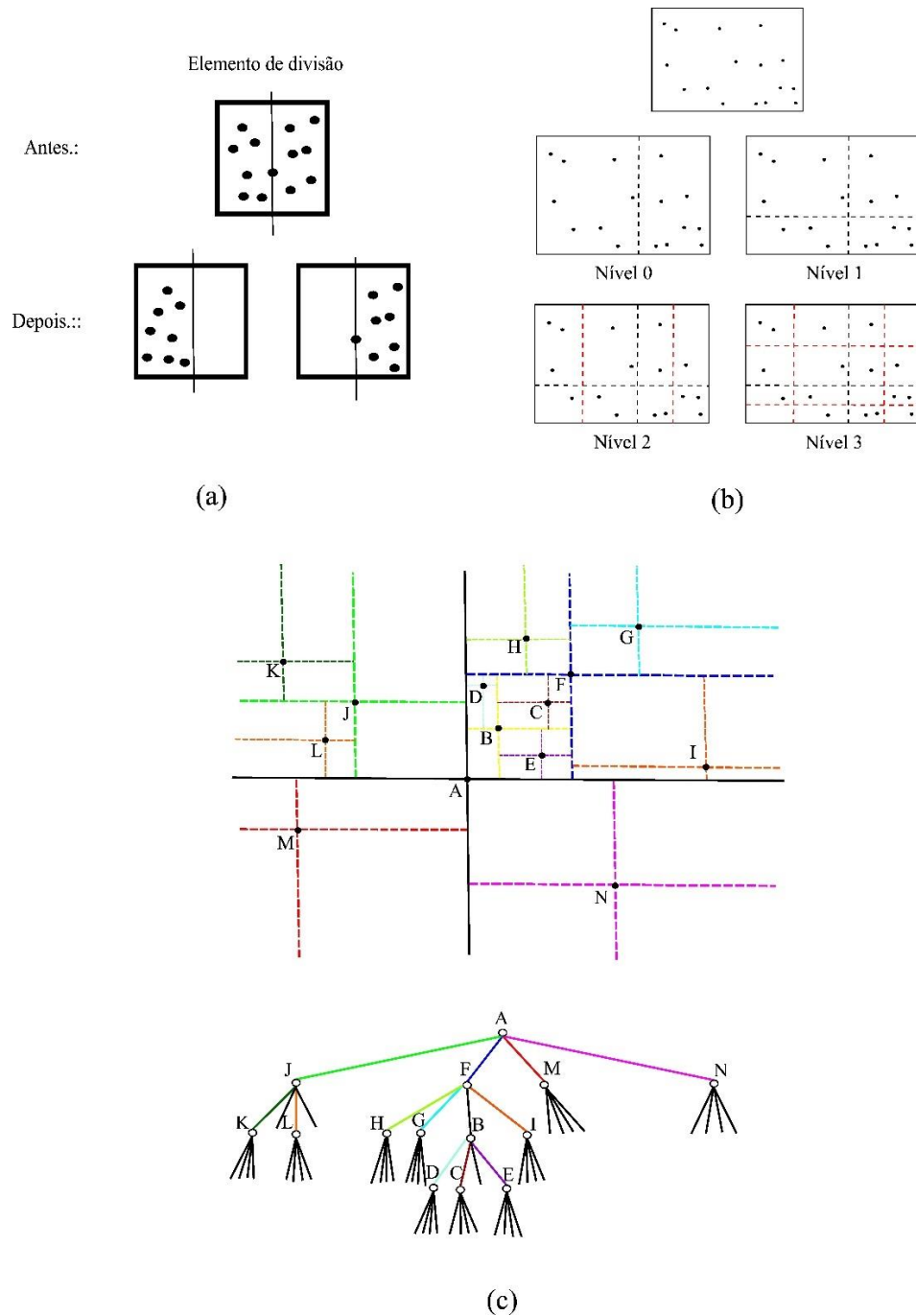
Figura 15. Inserção de um ponto arbitrário na árvore binária exemplificada na Figura 14.



Fonte: Elaborado pelo autor

Em um banco de dados espaciais, a consulta de intervalo ortogonal ou consulta de janela é fundamental (PROCOPIUC *et al.*, 2003). A consulta de janela, para duas dimensões, consiste em um retângulo alinhado ao eixo do plano, cujo objetivo é encontrar todos os pontos do banco de dados dentro desse retângulo. Para englobar todo o domínio, é gerado um elemento maior que todos os elementos desse domínio (ROBINSON, 1981). Por isso na Figura 12b o quadrante é maior que a região em roxo. Esses planos são decompostos recursivamente por meio de linhas ortogonais de eixo que dividem o conjunto de pontos em dois subconjuntos iguais (PROCOPIUC *et al.*, 2003), conforme observado na Figura 16. Em níveis pares, a linha é ortogonal ao eixo X, enquanto em níveis ímpares, é ortogonal ao eixo Y (Figura 16b). Um ponto de dados equivale a uma folha da árvore (BENTLEY, 1975), a qual corresponde ao retângulo que contém essa folha.

Figura 16. Hierarquização do espaço utilizando a mediana por meio da consulta por janela : (a) exemplo básico de divisão do espaço bidimensional tendo como referência a mediana dos pontos; (b) exemplo da criação de nós em uma divisão recursiva para outro conjunto de pontos; (c) representação do registro de uma *quadtree*.



Fonte: Modificado de Robinson (1981), Procopiuc *et al.* (2003) e Samet (1990).

Compreendido o funcionamento de uma árvore bidimensional, será mais fácil entender o funcionamento de uma árvore multidimensional. *Kd-tree* ou árvore de busca multidimensional binária veio suprir algumas deficiências e limitações do *quadtree* (SAMET, 1990). *Kd-tree* é uma estrutura de dados para armazenamento de registros e sua estrutura é muito usada para resolver problemas de análise de dados. Ela representa um conjunto de N pontos em K

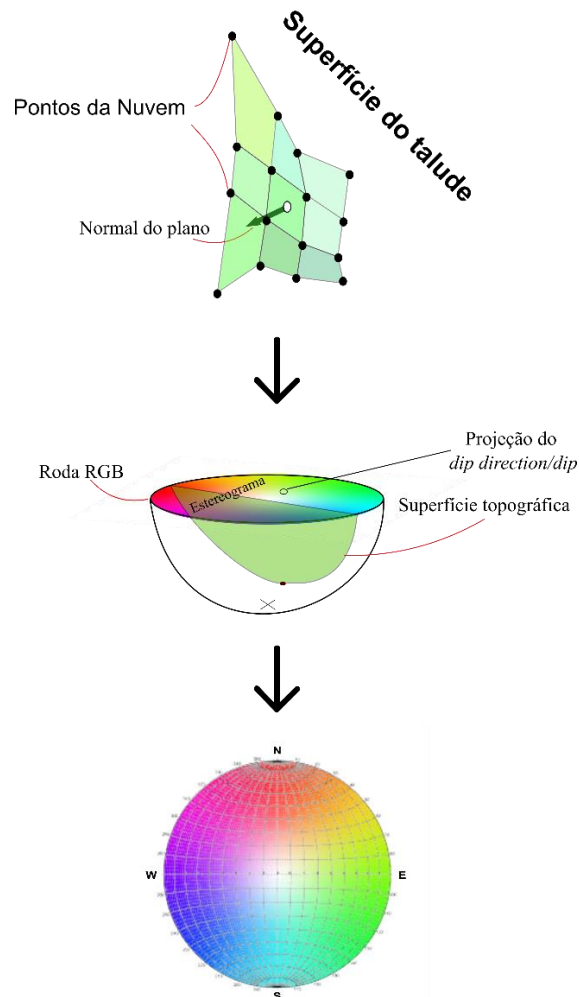
dimensões do espaço (BENTLEY, 1990; SAMET, 1990). Ao contrário das árvores bidimensionais, ela é adequada quando houver registros com diversos campo-chave. Operações de busca como raio fixo próximo ao vizinho e vizinho mais próximo são feitas em uma árvore *Kd-tree* (BENTLEY, 1990). Ao executar o vizinho mais próximo, o algoritmo utiliza funções para buscar as coordenadas do ponto e a partir delas realizar o procedimento recursivo buscando o primeiro vizinho mais próximo a partir do quadrado da distância, posteriormente, para seu filho mais próximo, sequencialmente em todas as dimensões. Os planos de corte particionam em torno da mediana a amostra em dois subespaços. Nessa divisão, um ponto é escolhido de modo a colocar aproximadamente o mesmo número de pontos ou regiões nesse novo espaço gerado (ROBINSON, 1990).

FACETS é um *plugin* do *software* CloudCompare que, segundo Dewez *et al.* (2016), realiza a extração de faces planares a partir de uma nuvem de pontos 3D, assim como suas respectivas atitudes, apresentando-as em formato alfanumérico e/ou visual (estereogramas). Para tal, o *plugin* utiliza dois algoritmos de segmentação e reagrupamento de pontos: i) *Kd-Tree*; e ii) *Fast Marching*. Ambos os algoritmos subdividem a nuvem em subcélulas que compartilham algum grau de coplanaridade, a partir do ajuste por mínimos quadrados. Ou seja, 3 pontos com coordenadas X, Y (coordenada cardinal N, E) e Z conhecidas são escolhidos arbitrariamente pelo *software*, o qual realizará o cálculo da orientação do plano que melhor se ajuste a esses pontos (FERNANDEZ, 2005). Dessa forma, a superfície formada é adotada como plana e os 3 pontos selecionados definirão a atitude representativa dessa superfície. Para Fernandez (2005), essa metodologia é muito utilizada em afloramentos ou qualquer outro conjunto de dados com georreferenciamento 3D. O algoritmo *Kd-Tree* realiza uma subdivisão irregular dos planos, enquanto o *Fast Marching* uma subdivisão regular. Cada subcélula será reagrupada em polígonos de acordo com os parâmetros de planaridade a serem definidos pelo usuário. Os algoritmos tendem a produzir resultados semelhantes.

O agrupamento é feito em três etapas. A primeira calcula as faces elementares a partir da regressão planar, ou seja, pequenos fragmentos de faces que corresponderão a um plano e suas respectivas orientações. Essa etapa provê um vetor normal ao plano de melhor ajuste, o qual será convertido em *dip direction/dip* (FERNANDEZ, 2005). A segunda etapa agrupa esses planos elementares em planos mais abrangentes. Na terceira etapa ocorre a fusão de planos abrangentes paralelos em famílias, e, posteriormente, as suas classificações em uma rampa de cores baseada em suas orientações (Figura 17). Famílias de mesma cor possuem orientações iguais, mudança na matiz (tonalidade) indica orientações semelhantes, enquanto cores

diferentes indicam orientações diferentes. Dessa forma, o *dip direction* é indicado pelas diferentes cores, enquanto o *dip* é indicado pela saturação da cor.

Figura 17. Exemplificação de como ocorre a classificação das faces em cores, de acordo com o *plugin* FACETS.



Fonte: Modificado de Jaboyedoff *et al.* (2007).

Os resultados da classificação da nuvem de pontos podem ser visualizados em um estereograma colorido de interface interativa. É possível exibir a atitude das faces em *dip direction/dip*, assim como consultá-las, ou seja, destacar famílias de estruturas específicas presentes no afloramento. As faces também podem ser exportadas em arquivo texto (ASCII), o que permite sua integração com outros softwares.

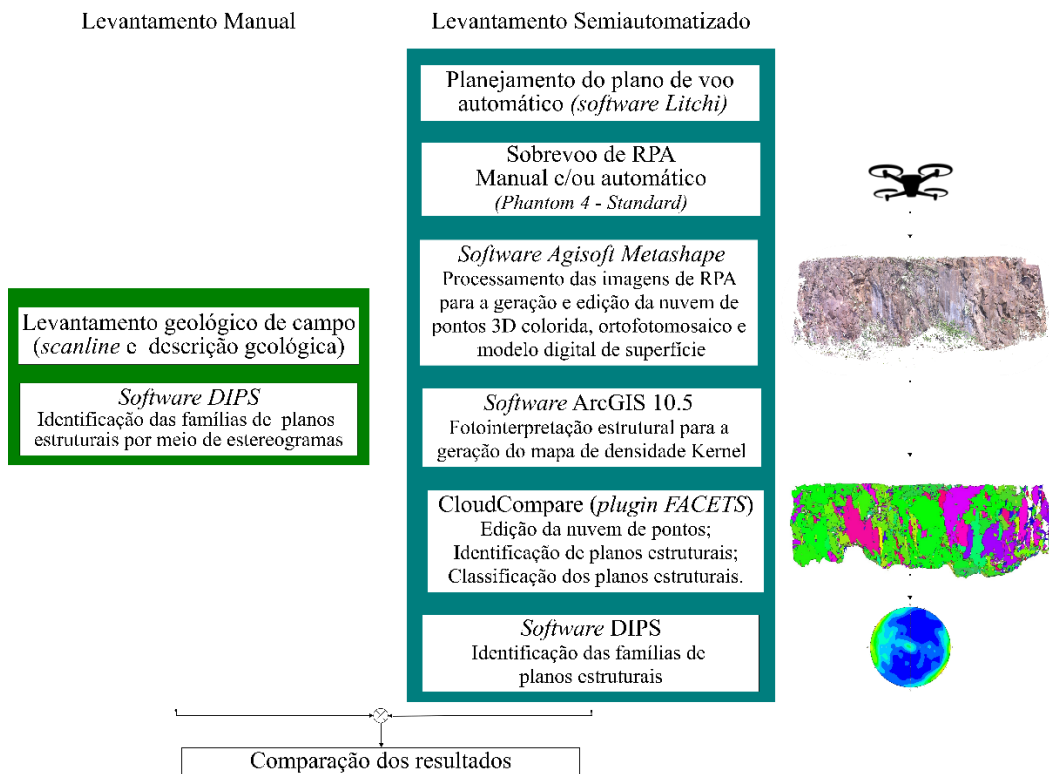
6 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foram utilizados os seguintes materiais, equipamentos e softwares:

- Aplicativos Litchi e DJI GO4;
- Drone Phantom 4 Standard (DJI);
- *Software* Agisoft Metashape (*Photoscan*);
- *Software* livre *CloudCompare* (*plugin FACETS*);
- *Software* ArcGIS 10.5 (ESRI);
- *Software* QGIS 3.32 Lima (QGIS);
- *Software* DIPS (Rocscience).

A metodologia adotada no presente estudo está dividida em duas partes: levantamento tradicional e levantamento por RPA. Cada uma delas compreende diferentes etapas de trabalho (Figura 18).

Figura 18. Fluxograma metodológico.



Fonte: Elaborado pelo autor

6.1 Levantamento tradicional

O levantamento de campo compreendeu a descrição dos litotipos aflorantes (THORPE e BROWN, 1993; FETTES e DESMONS, 2014) e o cadastramento de feições estruturais. A metodologia de amostragem seguiu os procedimentos de ISRM (1981). Dessa forma, o levantamento estrutural baseou-se no método das *scanlines* (HERGET, 1977; PRIEST, 1993, 2004). Esse é um método amplamente utilizado para o mapeamento estrutural de faces expostas de maciços rochosos. Consiste na disposição de uma linha horizontal na base da face do talude e na medição e descrição de todas as estruturas que interceptam esta linha. É assumido que o viés da amostragem pelo método da *scanline* seja pequeno para os taludes estudados, pois as *scanlines* foram suficientemente extensas para amostrar as estruturas do maciço rochoso.

Os dados estruturais de campo foram analisados por meio de estereogramas Schmidt-Lambert (hemisfério inferior de igual área) no *software* Dips (Rocscience), conforme Carneiro (1996). Foi adotada a nomenclatura *dip direction/dip*. Maiores informações sobre a obtenção e processamento de dados estruturais podem ser consultadas em Herget (1977), Carneiro (1996) e Fossen (2012).

6.2 Levantamento por RPA

O levantamento por RPA consiste de três etapas sequenciais: planejamento do sobrevoo, execução do sobrevoo e processamento das imagens aéreas.

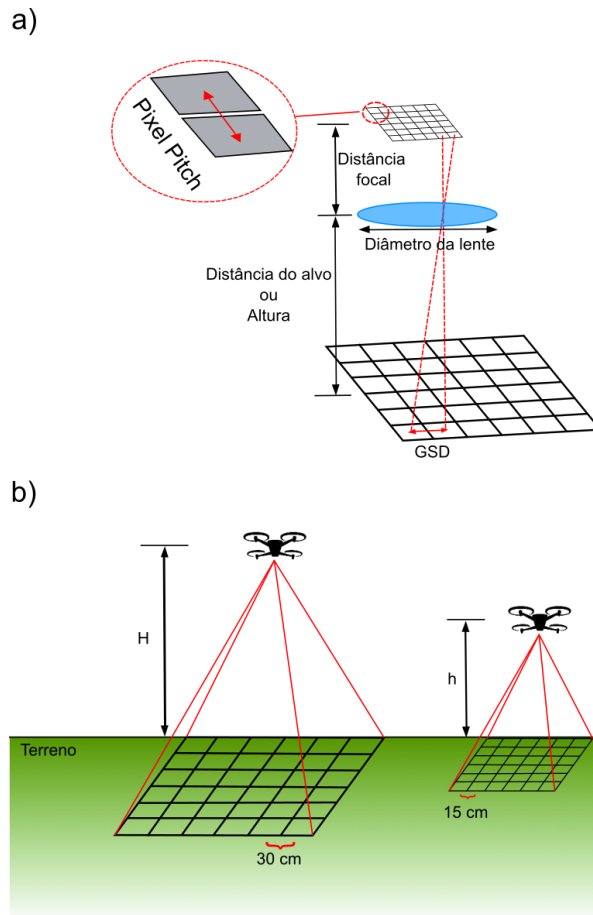
6.2.1 Planejamento do sobrevoo

A qualidade dos produtos derivados de imagens de RPAs, depende da sobreposição das fotos, distância do alvo, condições de iluminação, condições climáticas e resolução do sensor (BUYER, PISCHINGER e SCHUBERT, 2018; MEDINAC e ESMAEILI, 2020), assim como o tipo de objeto a ser imageado, devendo ser evitado objetos sem textura, brilhantes, altamente reflexivos ou transparentes (AGISOFT LLC, 2023). Todavia, com o avanço da tecnologia, muitos desses efeitos são compensados automaticamente.

Menegoni *et al.* (2019) descrevem que a resolução dos modelos digitais de afloramento está diretamente ligada à resolução do sensor da câmera (número de pixels e tamanho do pixel), distância focal e a distância entre o objeto e a câmera. A distância sensor-objeto afeta diretamente o GSD (*ground sample distance*) da imagem. (Figura 19). O GSD é uma medida da escala da imagem e determina o menor elemento visível na mesma (COMER, 1998). Como

regra geral, a identificação de um objeto na imagem exige um GSD 3-5 vezes menor que o tamanho do objeto.

Figura 19. *Ground Sample Distance (GSD):* a) ilustração do sistema fotogramétrico para a obtenção do GSD; e b) influência da variação da altura no GSD e no *footprint* (cobertura) da imagem.



Fonte: Modificado de Gundlach (2014).

Em outras palavras, em uma imagem com GSD de 15 cm que contenha uma moeda de 1 real, significa que a distância média entre os pixels dessa imagem está representando 15 cm do mundo real e que, provavelmente, essa moeda não será resolvida (“vista” pelo sensor). Dessa forma, deve ser buscada, para cada caso, uma distância que represente a feição desejada de maneira nítida, assim como manter a integridade física do RPA (*i.e.* colisão com o talude, vegetação etc.) e de objetos ou pessoas não anuentes (*i.e.* veículos).

Menegoni *et al.* (2019) ainda relatam que a precisão do modelo depende da qualidade da câmera, dos componentes do RPA (*e.g.* lente, estabilizador interno e externo da câmera, sistema GNSS e IMU) e do planejamento de voo (*e.g.* sobreposição das imagens, iluminação, condições

climáticas, presença ou ausência de pontos de controle). Os RPAs da fabricante chinesa DJI são embarcados com os componentes necessários para a realização de um voo eficiente, como:

- Placa controladora - recebe e processa todos os dados gerados pelo IMU, pelos sensores, pela bússola e pelo GPS;
- GPS – possui um sistema GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite) que realiza o *geotagging* das imagens obtidas;
- Bússola digital – permite a orientação do RPA.
- Sistema ESC (*Electronic Speed Controller*) - controla a velocidade do equipamento, gerenciando o giro dos motores, permitindo sua estabilização;
- Sistema IMU (*Inertial Measurement Unit*) - permite a medição de estabilidade, da aceleração, da altura e da temperatura por meio dos respectivos sensores giroscópio, acelerômetro, barômetro e termômetro;

Conforme visto, esses RPAs vêm equipados com uma bússola digital e um sistema GNSS. As bússolas digitais, segundo Marchi (2009), funcionam da mesma forma que as bússolas tradicionais, diferindo apenas pelo material induzido magneticamente. O autor relata que a orientação magnética realizada pelas bússolas digitais é feita por dois sensores magnetos resistivos monolíticos de silício que permitem uma medição precisa e rápida.

O sistema GNSS permite a localização da câmera em cada imagem capturada (MENEGONI *et al.*, 2019), auxiliando na previsão dos pontos de captura e na realização do georreferenciamento nos *software* de processamento de forma automática ou com eventuais interações do usuário (NEX e REMONDINO, 2014). Mineo, Calì e Pappalardo (2022) expõe que um modelo digital de maciço rochoso bem georreferenciado fornece a base para levantamentos estruturais remotos, uma vez que permite a extração da atitude dos planos expostos.

Nex e Remondino (2014) afirmam que a extração automática dos dados de GNSS permite o georreferenciamento direto das imagens capturadas. Eles recomendam o uso de GCPs (*Ground Control Points*) para dimensionamento e georreferenciamento quando o sistema de posicionamento de navegação do RPA não puder ser usado diretamente, ou seja, caso haja perda de sinal ou degradação do mesmo por interferências físicas. O objetivo do projeto também implicará na utilização ou não de GCPs (projetos de planialtimetria que exigem alta precisão, como o cadastro de imóveis). A não utilização de GCPs, implica em uma diferença na precisão

espacial (georreferenciamento) e não em escala e/ou orientação do modelo (BUYER, AICHINGER e SCHUBERT, 2019; MENEGONI *et al.*, 2019). Gaich e Pischinger (2016) também afirmam que as escalas e a relação de proporcionalidade são mantidas. Segundo Menegoni *et al.* (2019), não há diferenças significativas de precisão entre modelos de afloramento digitais construídos com ou sem GCPs. Para Freitas *et al.* (2021) e Nesbit, Hubbard e Hugenholtz (2022) a qualidade do modelo virtual de afloramento não é alterada em modelos construídos sem o uso de GCPs. Assim, no presente estudo não foram utilizados pontos de controle de campo.

Para a obtenção das imagens aéreas utilizou-se um drone quadricóptero modelo *Phantom 4 Standard* da fabricante chinesa DJI. O drone possui uma câmera RGB CMOS de 12.4 MP, FOV de 94°, lente de 20 mm, ISO 100-1600 e velocidade de disparador eletrônico de 8 - 1/8000s.

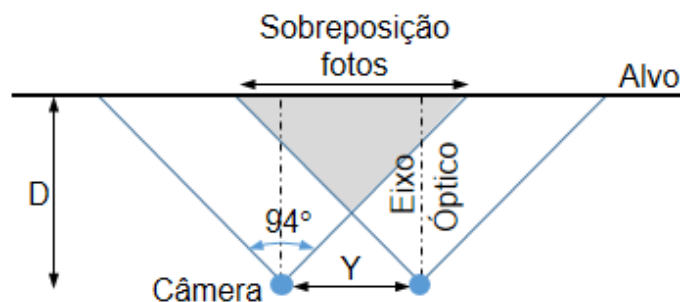
O planejamento dos sobrevoos foi baseada nas condições de iluminação do talude, interferências e regularidade na malha de fotos. Procurou-se manter uma sobreposição > 60% (DUEHOLM, 1992). As imagens foram tomadas de forma a cobrir toda a superfície dos dois taludes estudados, a partir de linhas de voo uniformes e com a câmera apontada perpendicularmente à face do talude.

Baseado no fato de que os aplicativos de planejamento e execução de sobrevoos de RPA utilizados nesta pesquisa não estimam a sobreposição das fotos, considerando que o campo de visada do equipamento utilizado é de 94° e considerada uma sobreposição mínima de fotos de 70%, foi estimada a malha de aquisição de fotos conforme a expressão (Figura 21):

$$Y \leq \frac{D}{2}$$

Onde Y é a distância horizontal entre os pontos de aquisição de fotos (*waypoints*) e D é a distância sensor-alvo (Figura 20).

Figura 20. Esquema ilustrativo para aquisição das imagens de RPA para taludes.



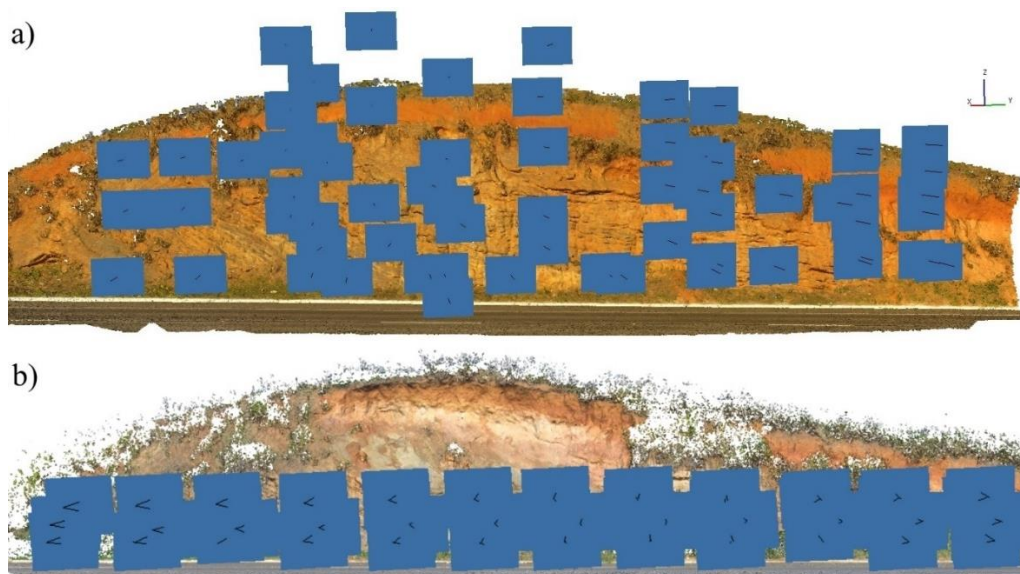
Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.2 Execução do sobrevoo

A execução do voo foi realizada de duas maneiras: manual e automático. Para o voo manual foi utilizado o aplicativo DJI GO 4 (DJI) e para o voo automático o aplicativo Litchi (*Mission Hub Desktop*), conforme Grohmann *et al.* (2023).

Para o talude rodoviário, localizado no município de Cachoeiro de Itapemirim (ES), as imagens foram obtidas de duas formas, manual e automática (Figura 21). A câmera em ambos os casos estava apontada para N227° (ortogonal à face) e afastada a cerca de 12 metros do talude. No modo manual foi obtido uma malha de voo irregular e a câmera fixada na posição horizontal. O sobrevoo teve duração aproximada de 20 minutos e ocorreu em condições de céu limpo no dia 18/09/2020. Foram obtidas 71 imagens. O sobrevoo no modo automático ocorreu no dia 23/04/2023. Foram obtidas 100 imagens. Programou-se três linhas de voo empilhadas na vertical com 17 pontos de aquisição de imagens em cada uma delas, totalizando 51 pontos. Os pontos de aquisição estão espaçados na horizontal de 4 m. As linhas de voo foram realizadas a 1,5, 2,5 e 3,5 metros de altura sobre o solo. Foram programadas seis ações em cada ponto de aquisição: a) *stay for 1s*; b) *rotate aircraft 227°*; c) *take photo*; d) *tilt camera -10°*; e) *take photo*; e f) *tilt camera 0°*.

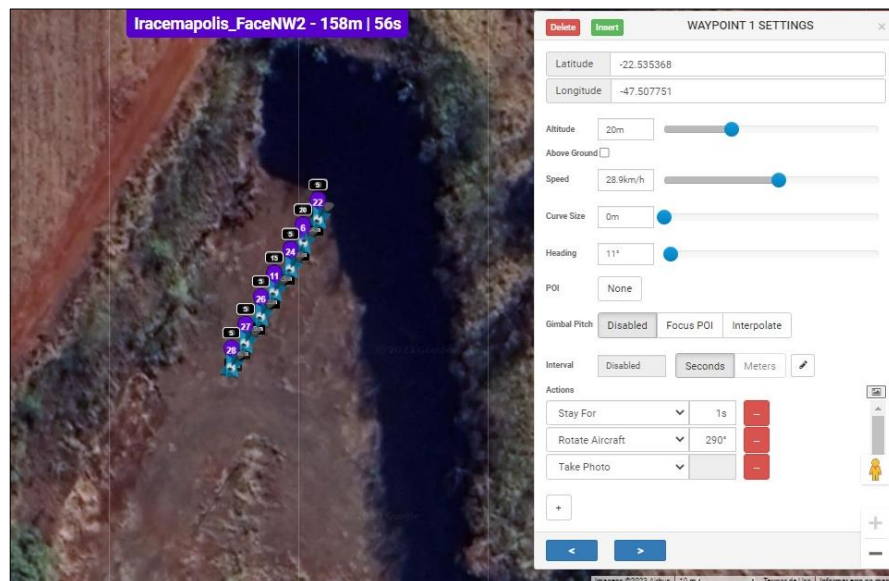
Figura 21. Malhas de voo obtidas para o talude da rodovia de Cachoeira de Itapemirim : a) malha irregular manual (18/09/2020); b) malha regular automática (23/04/2023). Ao fundo, encontra-se as nuvens de pontos geradas.



Fonte: Elaborado pelo autor

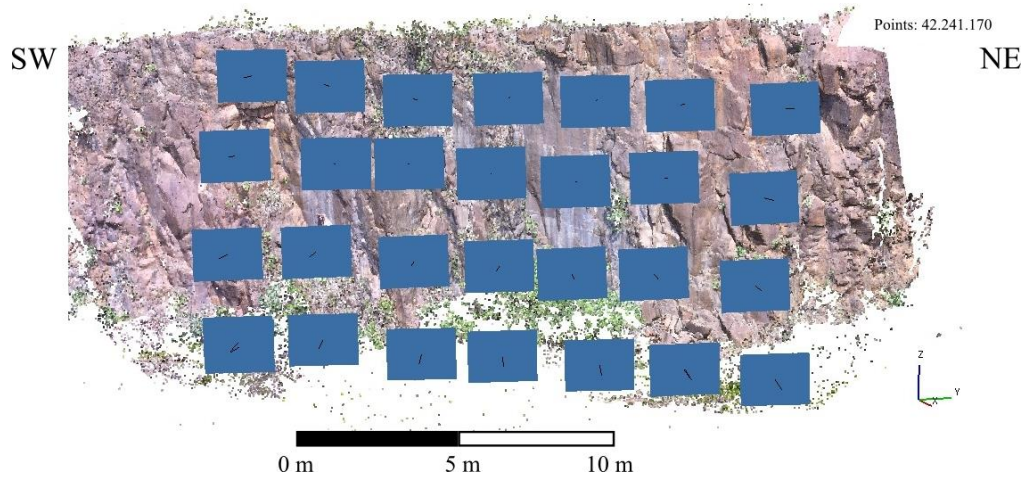
Para o talude da pedreira, localizada no município de Iracemápolis (SP), realizou-se o sobrevoo automático (Figura 22) em dois modos distintos: um com a câmera fixa na horizontal e o outro com a câmera nas posições horizontal e levemente inclinada para baixo (-10°). Em ambos os casos, as câmeras estavam orientadas para $N290^\circ$ (ortogonal à face) e afastadas do talude de aproximadamente 15 m. Foram realizadas quatro linhas de voo paralelas a direção da face do talude, espaçadas verticalmente de aproximadamente 5 metros. Os *waypoints* estão espaçados de aproximadamente 5 metros na horizontal e vertical, e cada linha de voo possui sete *waypoints*, totalizando 28 (Figura 24). No modo de voo com a câmera fixa foram obtidas 31 imagens. Foram programadas três ações em cada *waypoint*: a) *stay for 1s*; b) *rotate aircraft 290°*; e c) *take photo*. No outro modo de voo foram adquiridas 53 imagens. Foram programadas seis ações em cada *waypoint*: a) *stay for 1s*; b) *rotate aircraft 290°*; c) *take photo*; d) *tilt câmera -10°* ; e) *take photo*; e f) *tilt câmera 0°* . Os sobrevoos tiveram tempo de duração da ordem de 10 minutos e foram realizados em condições de céu aberto.

Figura 22. Plano de voo da frente de lavra NW da pedreira de Iracemápolis (SP). Aplicativo Litchi (*Mission Hub Desktop*).



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23. Malha de voo e nuvem de pontos da frente de lavra NW da pedreira de Iracemápolis, SP.



Fonte: Elaborado pelo autor

6.2.3 Processamento das imagens aéreas

As imagens aéreas foram processadas em um computador Desktop Intel Core i7 CPU 3.6GHz, memória RAM de 16 GB, memória SSD de 500 GB, sistema operacional de 64 bits e placa de vídeo NVIDIA GeForce GTX745.

As imagens foram processadas no *software* Agisoft Metashape (versão 1.9.19) para a geração da nuvem de pontos colorida 3D (arquivo .laz). Todas as imagens foram utilizadas no processamento.

Foram geradas quatro nuvens, sendo duas do talude da rodovia de Cachoeiro de Itapemirim (sobrevoos manual e automático) e duas da pedreira de Iracemápolis (sobrevoos automáticos). O número total de pontos das nuvens esparsa (*tie points*) e densa (sem filtragem) está sintetizado na Tabela 1. A tabela mostra um aumento de mais de 292x ao se comparar as nuvens de pontos esparsa e densa.

Tabela 1. Nuvens de pontos para os taludes de Cachoeiro de Itapemirim (ES) e de Iracemápolis (SP).

Local	Tipo de voo	Nuvem	
		Esparsa	Densa
Cachoeiro de Itapemirim	Manual	41.143	7.760.122
	Automático	90.944	17.612.898
Iracemápolis	Automático câmera fixa	36.879	10.796.016
	Automático câmera inclinada	145.826	9.412.633

Fonte: Dados gerados na pesquisa.

Para o processamento das imagens de RPA foi adotado para a maioria dos parâmetros, os valores padrão (*default*). Os demais parâmetros foram ajustados de forma empírica, bem como nas recomendações de fóruns de discussões específicos. Informações sobre os parâmetros utilizados e a qualidade dos produtos gerados podem ser encontradas nos apêndices.

A qualidade dos produtos gerados foi avaliada de duas formas: i) inspeção qualitativa visual e ii) relatório de qualidade do processamento. No primeiro caso, foi verificado se o modelo gerado apresentava distorções ou zonas de oclusão (“buracos”). No segundo caso, foi avaliada a sobreposição de imagens, quantidade de pontos chave por imagem (>10.000) etc. Via de regra, quanto maior o número de imagens sobrepostas e mais homogênea a sobreposição, melhor a qualidade do modelo.

Alguns pontos da nuvem de pontos tiveram que ser editados/excluídos por não representarem a superfície de interesse (*e.g.* nuvem, vegetação, solo, automóveis e etc.).

Finalmente, o padrão de fraturamento do talude também foi avaliado a partir da fotointerpretação das imagens de RPA para a identificação de descontinuidades, conforme Hartwig e Moreira (2021) e Colica *et al.* (2021). Em seguida, gerou-se um mapa de densidade de fraturas no *software* ArcGIS (ESRI, 2015), utilizando a ferramenta *kernel density* com valor de raio de busca padrão (*default*), e um diagrama de roseta das orientações preferenciais de traços de fratura ponderadas pelo comprimento, a partir do *plugin Line Direction Histogram* no *software* QGIS 3.32. O diagrama de roseta ponderado representa a orientação preferencial dos traços de fratura ponderada pelo comprimento dos traços contidos no setor circular que

representa uma determinada orientação¹. Os círculos concêntricos representam os valores de frequência.

6.3 Identificação das famílias de descontinuidades a partir da nuvem de pontos

Os parâmetros de processamento do *software* CloudCompare (FACETS) foram ajustados de forma empírica, bem como nas recomendações de fóruns de discussões específicos. Notou-se que o tempo de processamento no CloudCompare (FACETS) é diretamente proporcional a quantidade de pontos da nuvem. No caso de nuvens muito densas geradas nos modos *ultra high* do *software* Agisoft Metashape o tempo de processamento foi de dias e o programa parou de executar a tarefa. Assim, decidiu-se trabalhar com nuvens menos densas (*high*). A Tabela 2 mostra a quantidade de pontos gerados no modo *ultra high*.

Tabela 2. Nuvens de pontos geradas no modo *Ultra High* para os taludes estudados.

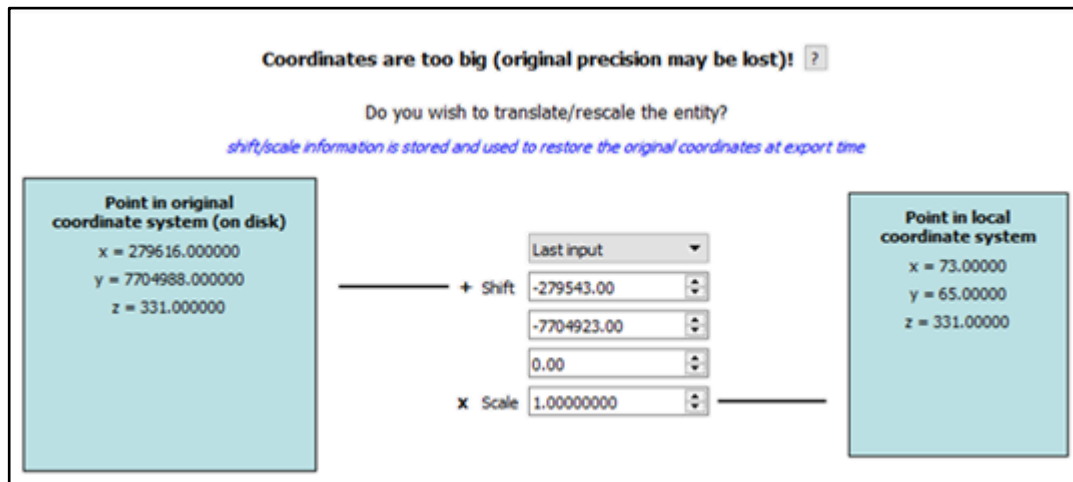
Local	Tipo de voo	Nuvem	
		Esparsa	Densa
Cachoeiro de Itapemirim	Manual	149.850	30.914.430
	Automático	348.998	66.495.998
Iracemápolis	Automático câmera fixa	92.191	42.241.170
	Automático câmera inclinada	115.813	37.033.203

Fonte: Dados gerados na pesquisa.

Para a identificação das famílias de descontinuidades, o arquivo *.laz* gerado no *software* Agisoft Metashape foi carregado no *software* CloudCompare. Ao realizar o carregamento uma caixa de aviso sugere ao usuário o redimensionamento do sistema de coordenadas original para um sistema de coordenadas local (Figura 24). O redimensionamento resulta, entre outras coisas, em um aumento de desempenho computacional durante o processamento dos dados.

¹ <https://arken.nmbu.no/~havatv/gis/qgisplugins/LineDirectionHistogram/>

Figura 24. Ajuste do sistema de coordenadas da nuvem de pontos no *software* CloudCompare.



Fonte: CloudCompare

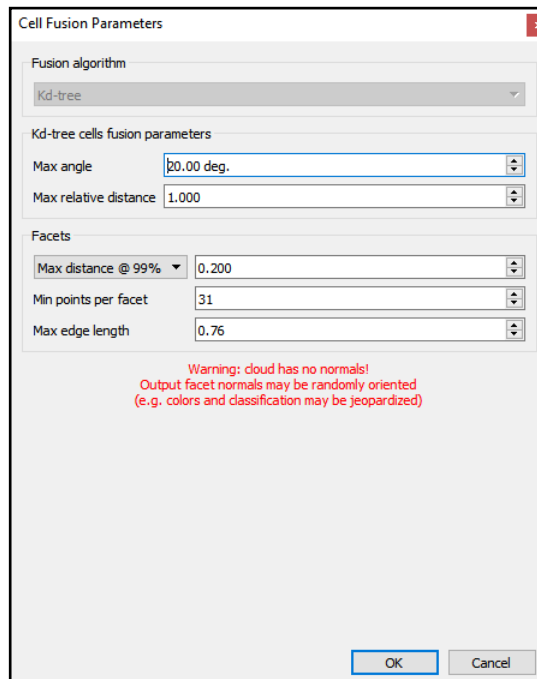
Após o carregamento do arquivo contendo a nuvem de pontos 3D é possível realizar a extração dos planos estruturais por meio do *plugin* FACETS (DEWEZ *et al.* 2016). O *plugin* consiste na segmentação da nuvem de pontos a partir de critérios de coplanariedade. Neste trabalho utilizou-se o algoritmo de segmentação da nuvem *Kd-tree* por possuir maior número de parâmetros de ajuste.

O algoritmo *Kd-tree* está constituído de cinco parâmetros (Figura 25). Os parâmetros estão subdivididos em dois grupos: *Kd-tree cells fusion parameters* e *Facets*.

O primeiro grupo (*Kd-tree cells fusion parameters*) está relacionado a um plano embrionário para a geração de uma face. É necessário ajustar dois parâmetros, o *Max Angle*, o qual irá ditar o ângulo máximo de desvio aceitável para os pontos vizinhos e o *Max relative distance*, o qual irá ditar a distância máxima aceitável para incorporar pontos vizinhos.

O segundo grupo (*Facets*) possui três parâmetros. O parâmetro *Max distance @99%* estima se os planos fusionados continuam planos (99% dos pontos devem estar próximos do valor especificado pelo usuário). O parâmetro *Min points per facets* irá descartar os planos com número de pontos menor que o informado. Finalmente, o parâmetro *Max edge length* está relacionado ao comprimento máximo de borda, ou seja, esse parâmetro realiza o “acabamento” das faces. Quanto maior o valor deste parâmetro, mais unida e regular uma face será da outra.

Figura 25. Parâmetros do algoritmo *Kd-tree*.



Fonte: CloudCompare

Os resultados gerados podem ser filtrados a partir da caixa de comando *Filtering* do *plugin* Facets. Essa filtragem consiste na seleção de uma área do estereograma (intervalo de atitudes) associado ao modelo. Dessa forma é delimitada pelo analista uma área diretamente sobre o estereograma, cuja dimensão está relacionada a atitude dos planos de interesse.

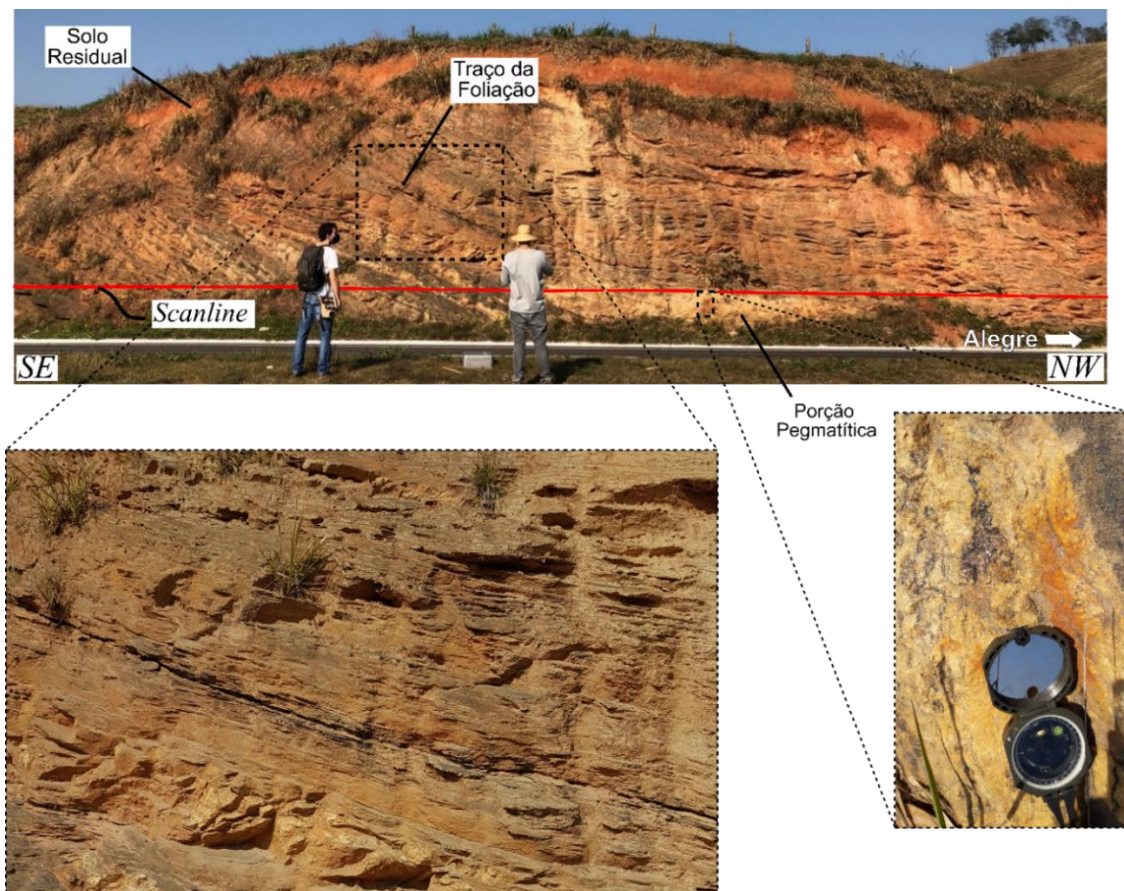
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Talude do km 6 da rodovia ES-482

7.1.1 Levantamento tradicional de campo

O talude possui aproximadamente 40 metros de extensão, 9 metros de altura e atitude geral $045^{\circ}/80^{\circ}$. Sua porção superior está recoberta por uma camada de solo residual maduro avermelhada de aproximadamente 2 metros de espessura. O maciço rochoso é constituído exclusivamente por um biotita granada gnaiss com porções pegmatíticas, pouco a ligeiramente alterado. É uma rocha fortemente orientada, com bandamento composicional descontínuo e de espessura variável (predominantemente < 5 cm), conforme ilustrado na Figura 26. Possui bandas félsicas de granulação grossa constituídas de quartzo, feldspato e granada milimétrica. As bandas máficas possuem granulação fina a média e são compostas de minerais máficos, opacos e biotita.

Figura 26. Vista geral do talude de corte do km 6 da ES-482.

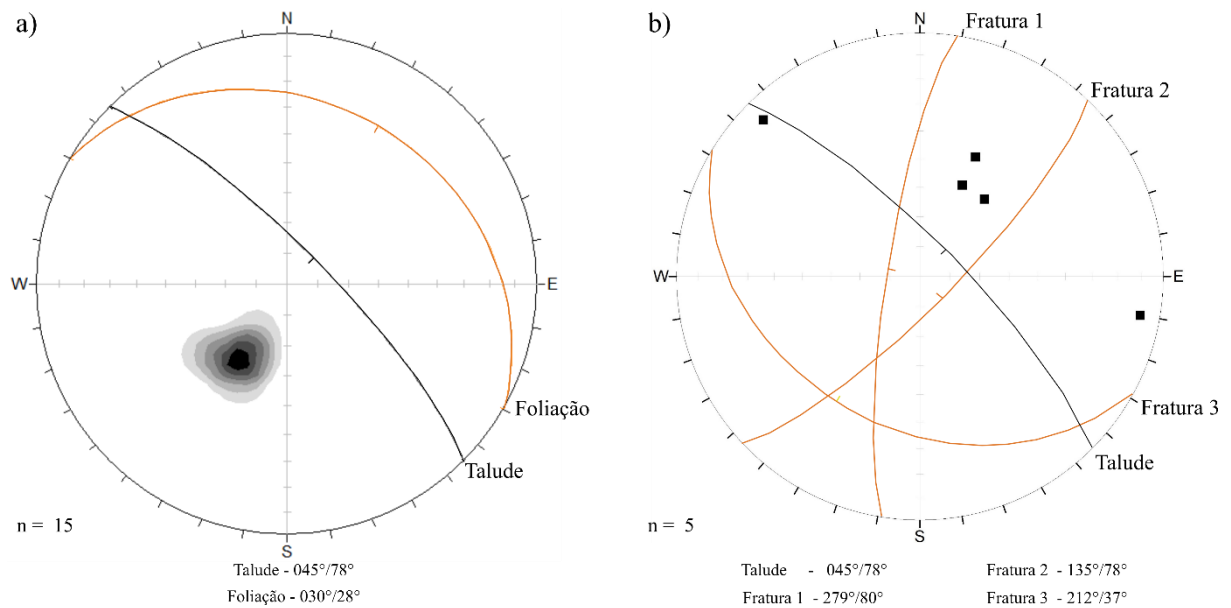


Fonte: Elaborado pelo autor

Foram medidos 20 planos estruturais, sendo 15 planos de foliação (bandamento gnáissico) e 5 de fraturas. A foliação apresenta atitude modal $030^{\circ}/28^{\circ}$ e as fraturas estão distribuídas com diferentes orientações. Os planos de fraturas estão dispersos na face do talude e apresentam persistência baixa ($< 1,0$ m). Dessa forma, possuem pouca significância.

Os estereogramas das Figuras 27 a, b representam a concentração dos pólos de foliação e de fraturas, respectivamente.

Figura 27. Estereogramas de densidade de planos de foliação (a) e de fraturas (b). Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, igual área.



Fonte: Elaborado pelo autor

7.1.2 Nuvem de pontos 3D

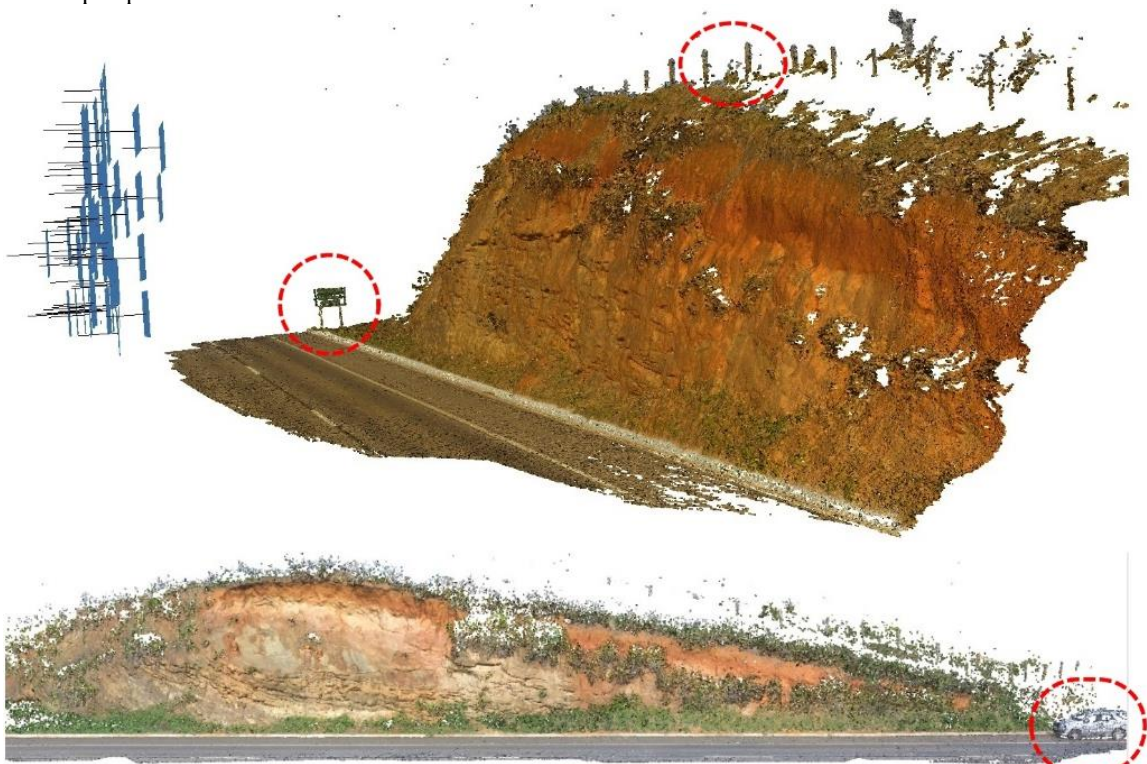
No modelo virtual do talude é possível notar feições espúrias e áreas oclusas (Figura 28). A oclusão consiste em “buracos” no modelo que ocorrem devido ao não imageamento do alvo por estar em uma zona de sombra e/ou pela falta de pontos correspondentes no pareamento das imagens (CAWOOD *et al.* 2017). Esses locais do modelo dificultam a reconstrução das faces, aumentando o tempo de processamento. Diante do exposto, optou-se por editar a nuvem de pontos, excluindo estes pontos espúrios, mantendo-se apenas as áreas rochosas do talude e as áreas nas quais foram observadas uma boa reconstrução das faces (Figura 29). A Tabela 3 mostra o GSD obtido para cada voo, assim como a quantidade total de pontos antes e após a edição (filtragem). É evidente que o sobrevoo automático produziu melhores resultados que o sobrevoo manual.

Tabela 3. GSD e quantidade total de pontos obtidos para os sobrevoos do talude em Cachoeiro de Itapemirim (ES).

Tipo de voo	GSD (mm/pixel)	Filtragem	Nuvem	
			Esparsa	Densa
Manual	6.45	Sem	41.143	7.760.122
		Com	41.143	2.774.254
Automático	4.38	Sem	90.944	17.612.898
		Com	90.944	5.786.595

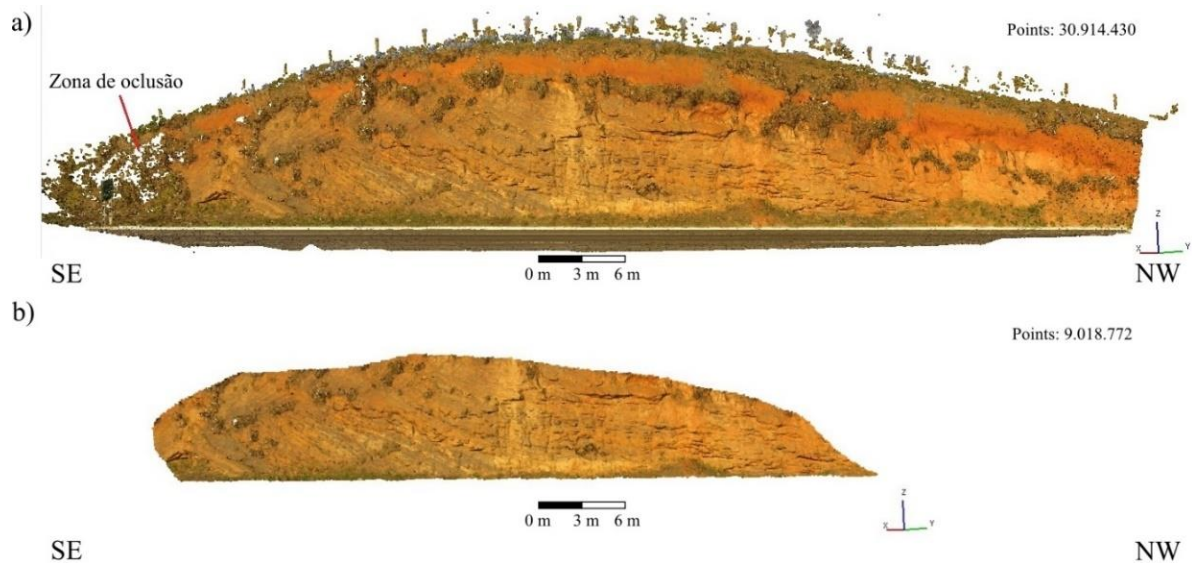
Fonte: Dados gerados na pesquisa.

Figura 28. Objetos espúrios/indesejados (placa, cerca e automóvel) na nuvem de pontos do talude da ES-482 em diferentes perspectivas.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29. Nuvem de pontos colorida 3D da rodovia ES - 482: (a) nuvem de pontos completa; e (b) nuvem de pontos editada.



Fonte: Elaborado pelo autor

No intuito de identificar as faces correspondentes aos planos estruturais procedeu-se com a calibração dos parâmetros de segmentação. A Tabela 4 mostra os valores dos parâmetros testados para a nuvem de pontos gerada no sobrevoo manual da rodovia ES-482. Como o talude estudado é pouco extenso, os testes foram realizados para toda a nuvem de pontos.

Na Figura 30a houve uma generalização das estruturas do maciço. Na Figura 30b há faces geradas no modelo que ainda são maiores que as estruturas encontradas em campo, enquanto na Figura 30c, os resultados foram mais aderentes as características estruturais do talude (faces com áreas bem pequenas).

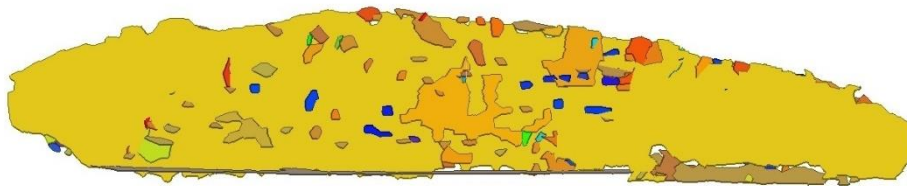
Dessa forma, a criação das células de fusão considerou os pontos que estavam a distâncias inferiores a 2 metros, com uma busca de pontos com variação angular de 15° . Para a criação dos planos foi adotado, no mínimo, 100 pontos por face, sendo que 99% dos pontos estão a uma distância máxima entre si de apenas 20 centímetros.

Tabela 4. Parâmetros do algoritmo *Kd-tree* testados para a segmentação da nuvem de pontos 3D (modo manual) da rodovia ES-482.

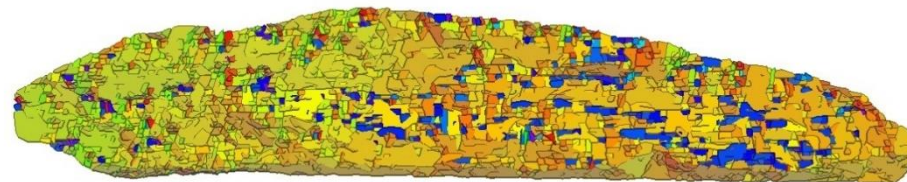
Parâmetros	Testes		
	A	B	C
<i>Max Angle</i>	20	10	15
<i>Max Relative Distance</i>	5	1	2
<i>Max Relative @99%</i>	2	2	0.2
<i>Min points per facet</i>	100	100	100
<i>Max edge length</i>	0.5	0.5	0.5

Figura 30. Calibração do algoritmo *Kd-tree* para o talude da ES-482 (nuvem no modo manual): (a) modelo estrutural gerado segundo o teste A; (b) modelo estrutural gerado segundo o teste B; e (c) modelo estrutural gerado segundo o teste C.

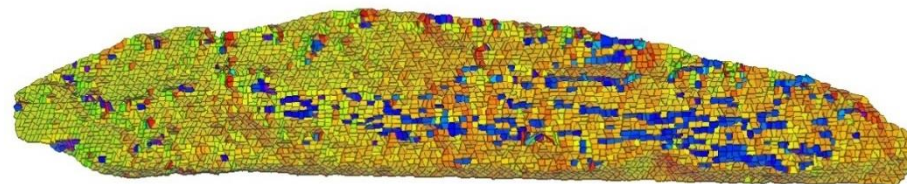
a)



b)



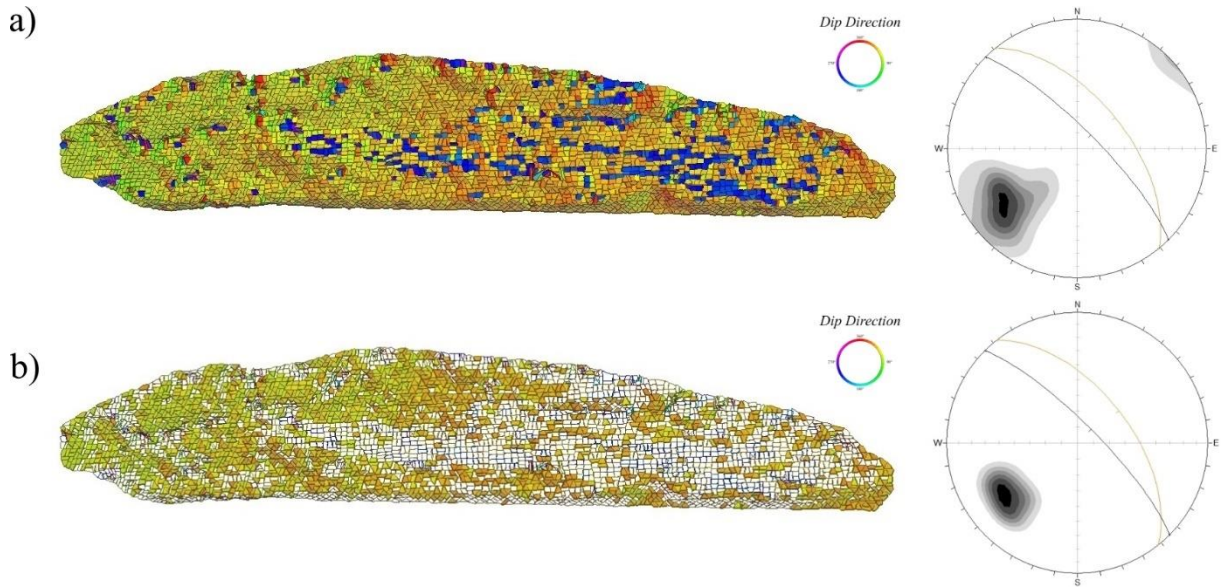
c)



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 31 ilustra o modelo estrutural sem e com filtragem de planos. Os polígonos na cor azul representam o plano de quebra (reentrância) da foliação (Figura 32). Os planos em tons amarelados e esverdeados representam os planos de foliação (Figura 31b).

Figura 31. Modelo de faces gerado pelo algoritmo *Kd-tree* para o talude da rodovia ES-482 (nuvem no modo manual): (a) segmentação sem filtragem. Foram identificadas 4.248 medidas estruturais; e (b) segmentação com filtragem. Foram identificadas 1.803 medidas estruturais. As linhas nos estereogramas à direita representam o círculo máximo modal dos pólos dos planos de foliação.



Fonte: Elaborado pelo autor

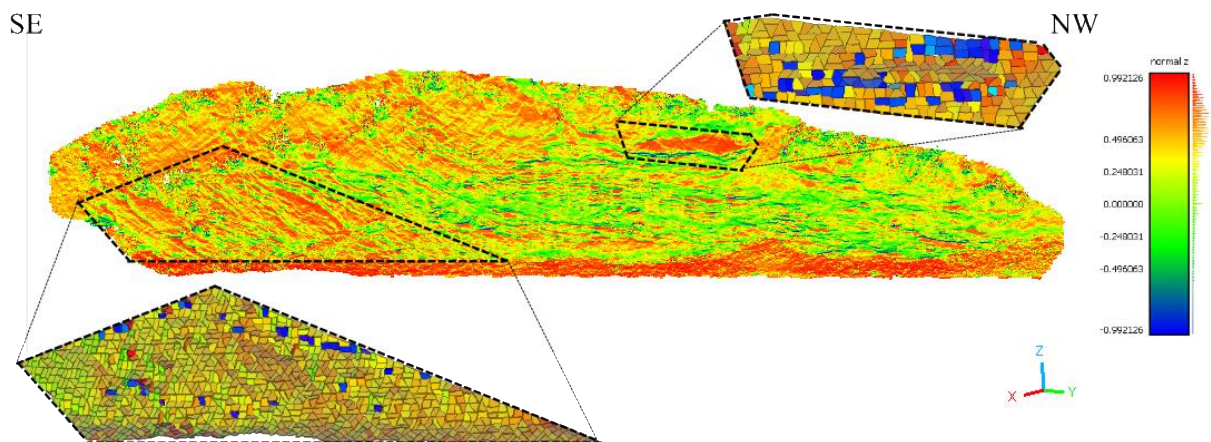
Figura 32. Fotografia dos planos de foliação (S) e dos planos de quebra (Q).



Fonte: Dados coletados em campo

A Figura 33 mostra as normais do eixo z (vetores) de cada ponto da malha. Esta variável representa a planaridade da superfície. Como pode-se observar, os traços da foliação estão muito bem destacados na imagem e mudam de orientação, sendo mais horizontal à direita e mais inclinado à esquerda. Os polígonos tracejados retratam os planos estruturais identificados pelo algoritmo *Kd-tree*. As faces na cor marrom à esquerda representam a foliação com atitude modal $030^{\circ}/28^{\circ}$.

Figura 33. Mapa das normais z codificado em cores (nuvem no modo manual) para o talude da rodovia ES-482, no qual é possível visualizar a planaridade dos traços da foliação.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 5 mostra os valores ótimos adotados para a segmentação da nuvem de pontos 3D (modo automático) para o talude da rodovia ES-482.

Tabela 5. Parâmetros do algoritmo *Kd-tree* adotados para a classificação da nuvem de pontos 3D (modo automático) da ES-482.

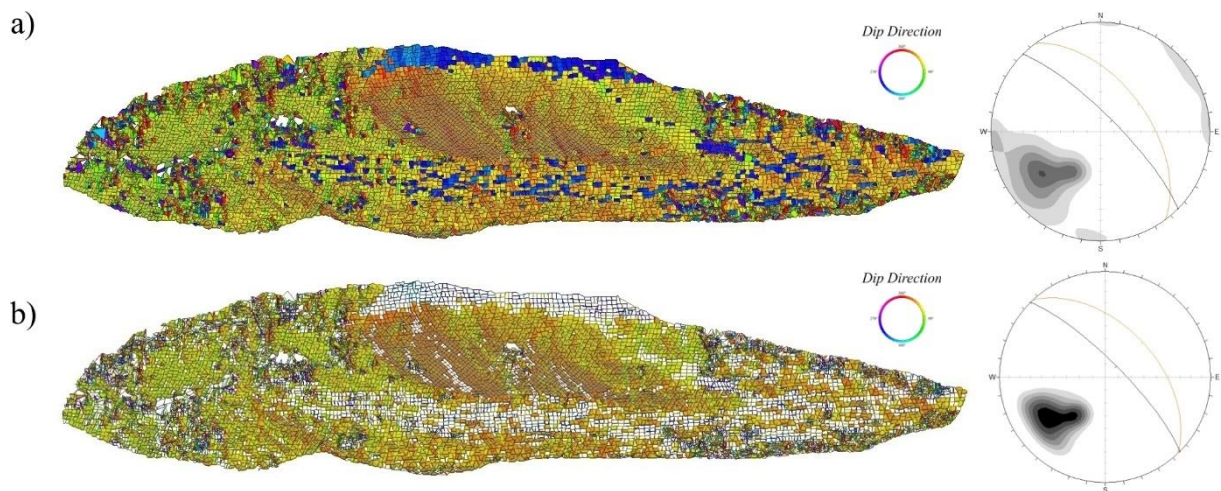
Parâmetros	Valores
<i>Max Angle</i>	20
<i>Max Relative Distance</i>	0.001
<i>Max Relative @99%</i>	0.1
<i>Min points per facet</i>	50
<i>Max edge length</i>	0.2

Fonte: Elaborado pelo autor

Dessa forma, a criação das células de fusão considerou os pontos que estavam a distâncias de 1 milímetro, com uma busca de pontos com variação angular de 20°. Para a criação dos planos foi adotado, no mínimo, 50 pontos por face, sendo que 99% dos pontos estão a uma distância máxima entre si de 10 centímetros.

A Figura 34 ilustra o modelo estrutural sem e com filtragem de planos. Os polígonos na cor azul representam o plano de quebra (reentrância) da foliação (Figura 32). Os planos em tons amarelados, esverdeados e castanhos representam os planos de foliação (Figura 34b).

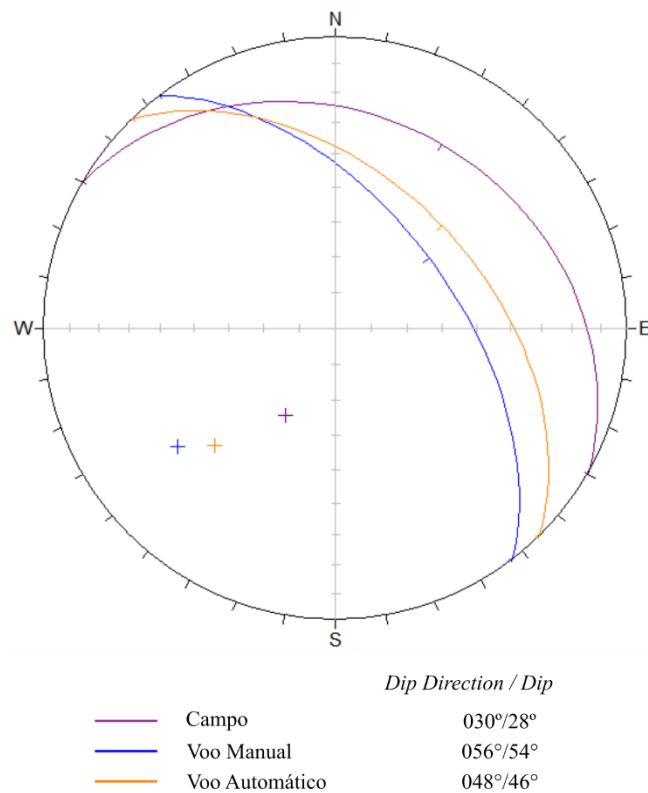
Figura 34. Modelo de faces gerado pelo algoritmo *Kd-tree* para o talude da rodovia ES-482 (nuvem no modo automático): (a) classificação sem filtragem. Foram identificadas 11.820 medidas estruturais; e (b) classificação com filtragem. Foram identificadas 5.142 medidas estruturais. As linhas nos estereogramas à direita representam o círculo máximo modal dos pólos dos planos de foliação.



Fonte: Elaborado pelo autor

O estereograma da Figura 35 compara os dados estruturais obtidos em campo (*scanlines*) com as medidas identificadas a partir da segmentação da nuvem de pontos 3D com o algoritmo *Kd-Tree*. Os dados de campo possuem atitude modal 030°/28° e os dados derivados de imagens de RPA possuem atitudes modais 048°/46° (voo no modo automático) e 056°/54° (voo no modo manual). Essa diferença pode estar relacionada as limitações do levantamento de campo (concentrado na base da face do talude) e ao número limitado de medidas (15 planos). O resultado obtido é semelhante ao descrito por FILICE *et al.* (2022).

Figura 35. Estereograma dos dados estruturais coletados pelo método tradicional (*scanline*) e derivados da segmentação da nuvem de pontos 3D. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior.



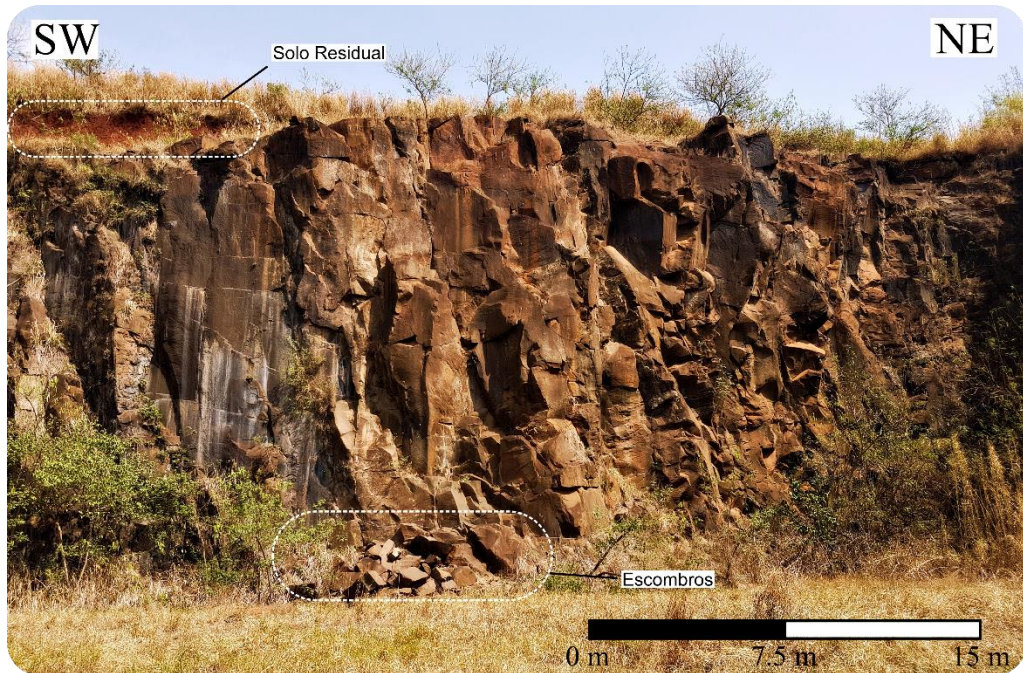
Fonte: Elaborado pelo autor

7.2 Pedreira de Iracemópolis

7.2.1 Levantamento tradicional de campo

O talude estudado possui 25 metros de altura e 60 metros de comprimento e apresenta escombros em sua base decorrentes da queda de blocos (Figura 36). O talude possui atitude geral $120^{\circ}/89^{\circ}$ e uma berma que delimita o contato solo-rocha.

Figura 36. Vista em perspectiva frontal da frente de lavra NW da Pedreira de Iracemápolis, SP.



Fonte: Elaborado pelo autor

O talude estudado é constituído de basaltos (Figuras 37a). A rocha é melanocrática, de cor cinza escura, granulação muito fina, composta predominantemente por plagioclásio e minerais máficos. Grande parte das fraturas está preenchida por material carbonático esbranquiçado (veios), de granulação fina a média e espessura inferior a 2 cm (Figura 37b).

Figura 37. Feições geológicas verificadas na pedreira de Iracemápolis, SP: a) basalto de cor cinza; e b) veio de carbonato de granulação fina.

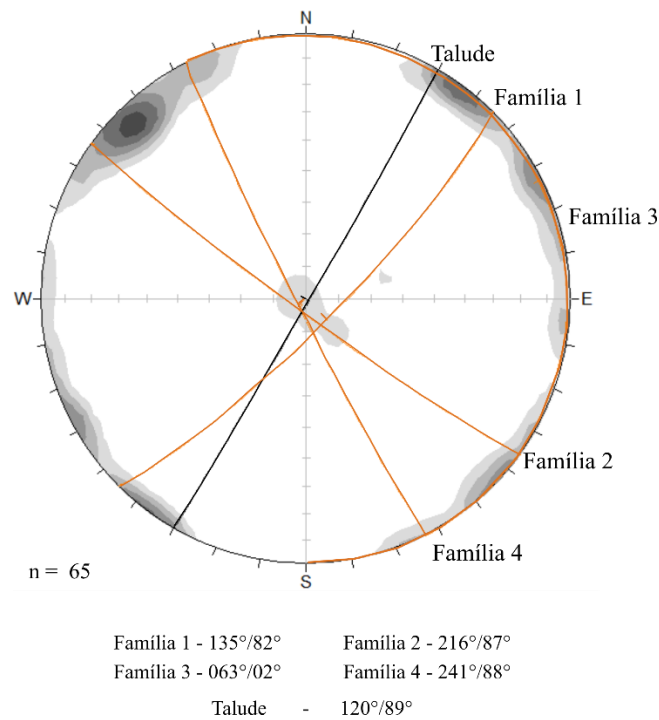


Fonte: Dados coletados em campo.

Foram medidos 79 planos estruturais, sendo 65 fraturas e 14 veios de calcita. Esses planos possuem em geral persistência de vários metros e superfícies lisas. Os blocos possuem formatos poliédricos.

Como os veios não implicam em ressaltos ou rebaixos na superfície da rocha e que ocorrem em pequeno número e que possuem pequena espessura, os mesmos foram desconsiderados da discussão que segue. O estereograma da Figura 38 representa a concentração de pólos de fraturas. É possível notar a presença de quatro famílias de descontinuidades (fraturas), sendo a Família 3 sub-horizontal.

Figura 38. Estereograma de densidade de fraturas. O talude tem atitude $120^{\circ}/89^{\circ}$. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, igual área.



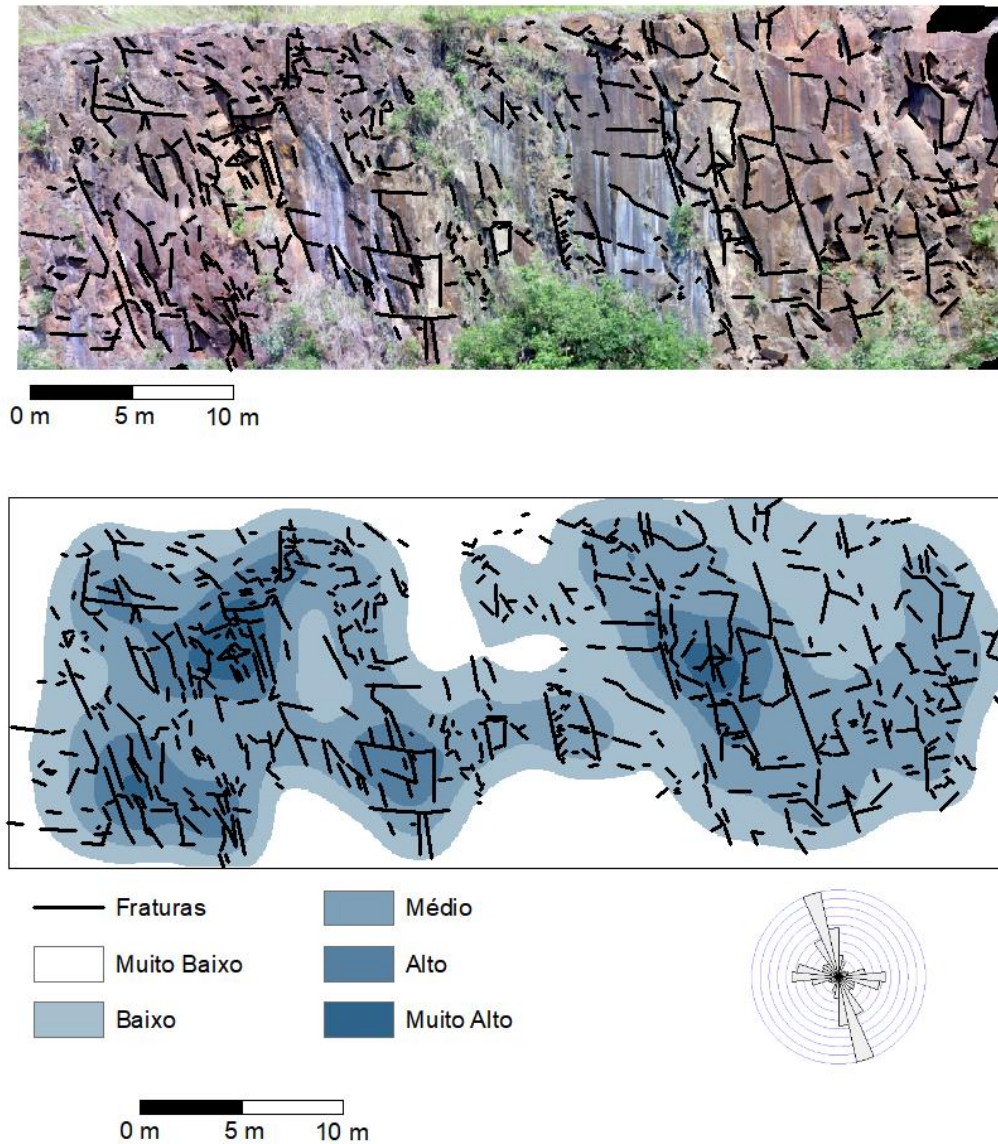
Fonte: Elaborado pelo autor

7.2.2 Interpretação fotolitológica

A Figura 39 mostra o mapa de densidade de fraturas gerado a partir da fotointerpretação das imagens de RPA. As regiões oeste e leste da imagem possuem maior densidade de fraturas que a porção central. Isso permite identificar áreas mais propensas a deslocamentos. É possível notar no diagrama de rosetas que as fraturas subverticais e sub-horizontais são as mais frequentes, sendo as subverticais de maior comprimento. As regiões onde há uma menor

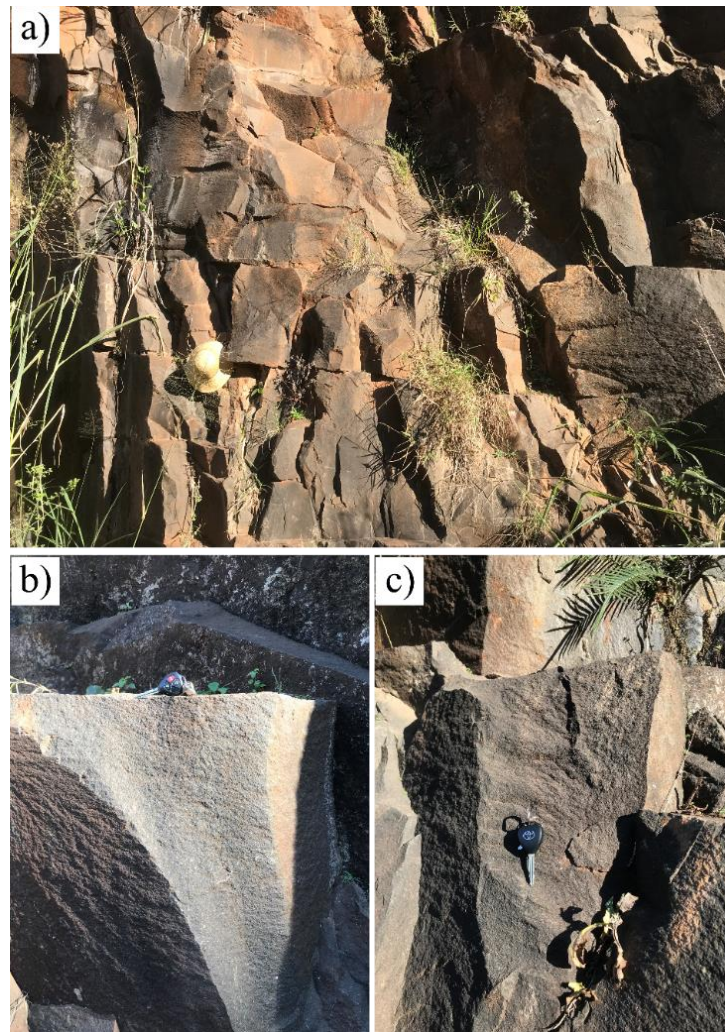
densidade de fraturas são aquelas com grandes planos geológicos bem definidos. Dessa forma, locais onde há uma densidade de fraturas muito alta, podem estar relacionadas as zonas de maior dano produzidos pelo desmonte (Figura 40).

Figura 39. Mapa de densidade de fraturas da frente de lavra NW da pedreira de Iracemápolis, SP. Sistema de coordenadas arbitrário. O diagrama de roseta representa as orientações preferenciais de traços de fratura ponderadas pelo comprimento.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 40. Exemplos de planos de fratura (irregulares, curvos) associados ao desmonte à fogo.



Fonte: Elaborado pelo autor

7.2.3 Nuvem de pontos 3D

A Tabela 6 mostra o GSD e a quantidade total de pontos para as nuvens de pontos antes e após a edição (filtragem para a remoção de feições espúrias/indesejadas). Como é possível observar, a nuvem de pontos gerada para o sobrevoo com a câmera inclinada possui maior quantidade de pontos e GSD ligeiramente maior (menor resolução espacial) que os da nuvem de pontos com câmera fixa.

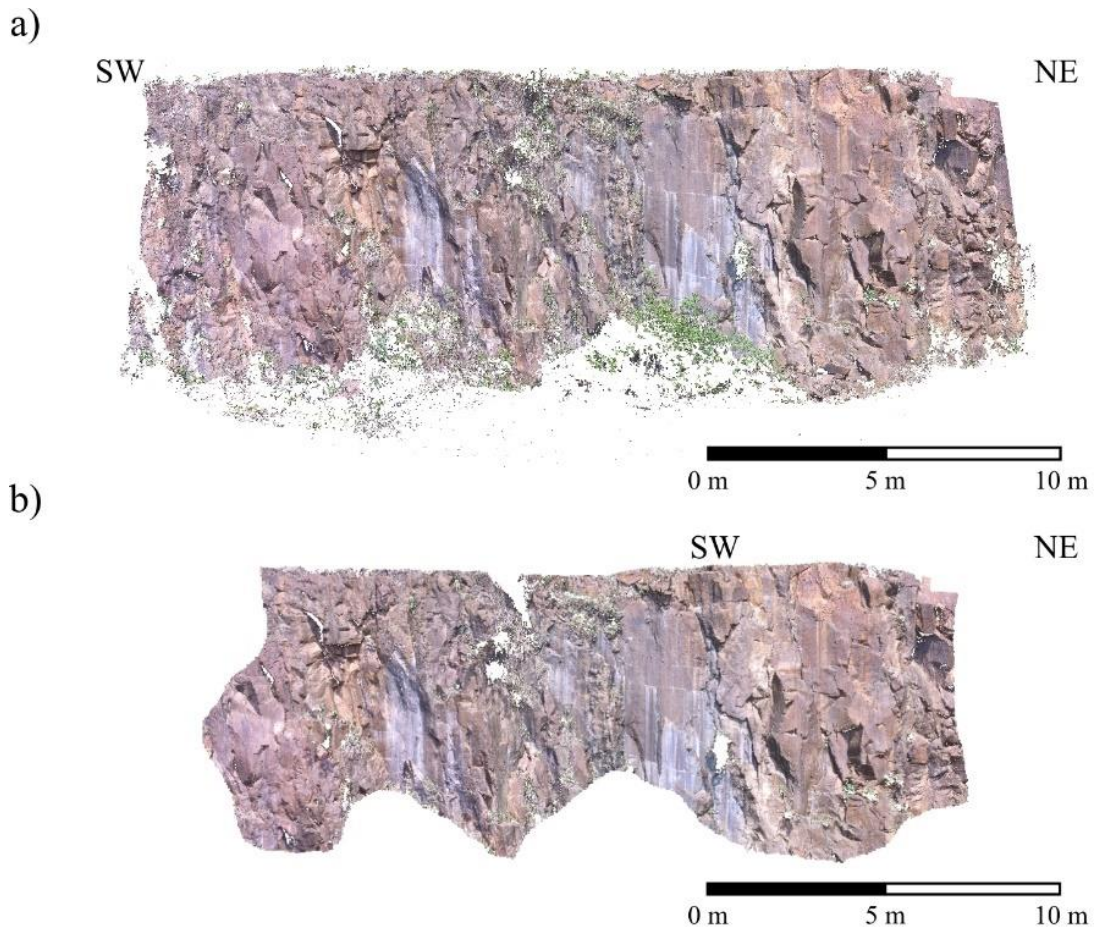
A Figura 41 representa a nuvem de pontos 3D antes e após a edição (nuvem câmera fixa). Existem duas maneiras para tentar minimizar as zonas de oclusão do modelo digital de afloramento: i) refinar a malha do plano de voo (maior quantidade de fotos redundantes); e ii) combinar planos de voos nos quais o eixo óptico da câmera está posicionado em mais de uma direção.

Tabela 6. GSD e quantidade total de pontos obtidos para as nuvens de pontos para os sobrevoos com câmera fixa e inclinada para a frente de lavra NW da pedreira de Iracemópolis (SP).

Tipo de voo	GSD (mm/pixel)	Filtragem	Nuvem	
			Esparsa	Densa
Automático (câmera fixa)	4.38	Sem	36.879	10.796.016
		Com		8.860.932
Automático (inclinação da câmera)	6.05	Sem	115.813	37.033.203
		Com		29.602.841

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41. Nuvem de pontos colorida 3D da frente de lavra NW da pedreira de Iracemópolis, SP (nuvem câmera fixa): (a) nuvem de pontos completa; e (b) nuvem de pontos editada. As zonas oclusas correspondem as áreas brancas (vazios) do modelo.



Fonte: Elaborado pelo autor

No intuito de calibrar o algoritmo de segmentação da nuvem de pontos 3D foi realizada uma amostragem de uma porção específica do talude possivelmente relacionada ao desmonte (Figura 42). A Tabela 7 representa o conjunto de parâmetros que produziu os melhores resultados. Durante o processo de calibração foi observado que diferentes combinações nos

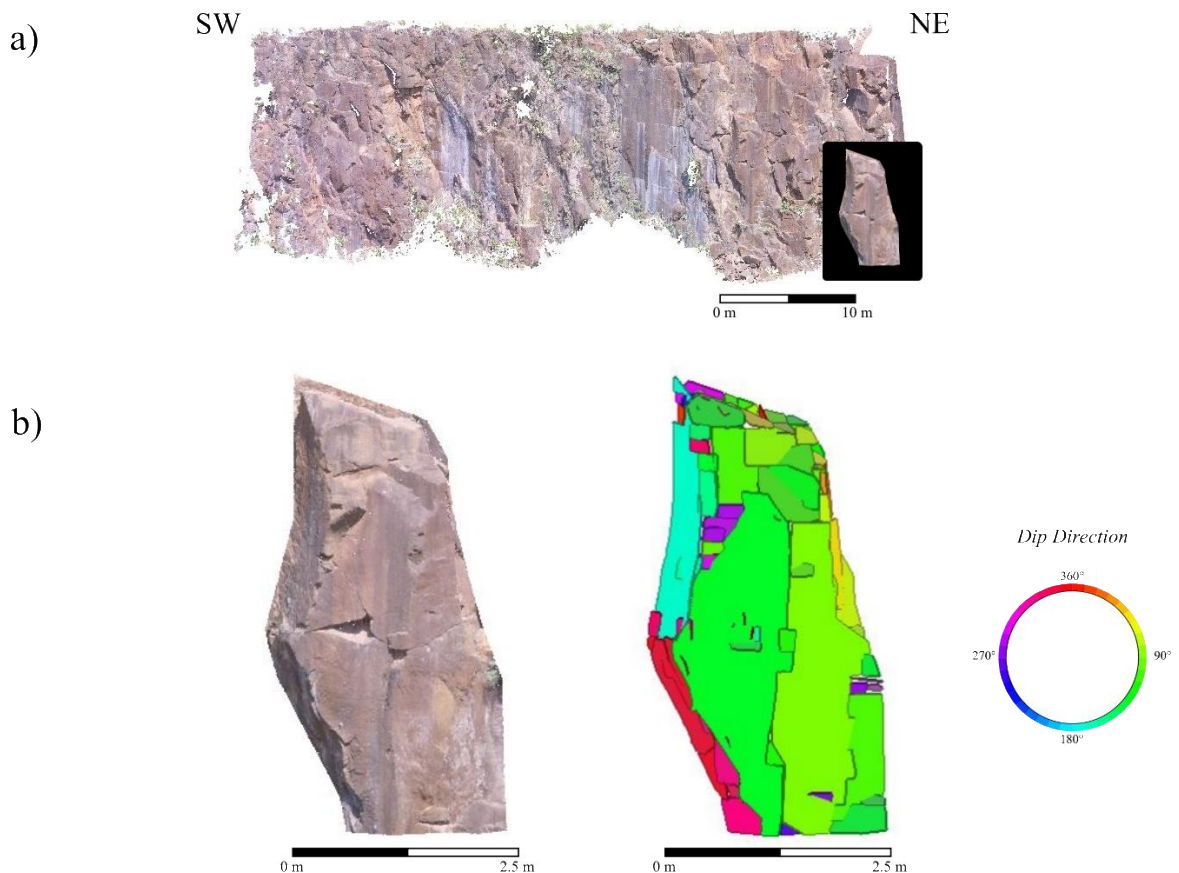
valores dos parâmetros *max distance @99%* e *max edge length* resultaram em modelos visualmente similares. O algoritmo identificou alguns planos curvilíneos irregulares (cor vermelha) que não possuem significado geológico e que estariam relacionados ao desmonte à fogo.

Tabela 7. Parâmetros do algoritmo *Kd-tree* adotados para uma porção do talude da frente de la vra NW da pedreira de Iracemápolis, SP (nuvem câmera fixa).

Parâmetros	Valores
<i>Max Angle</i>	15
<i>Max relative distance</i>	2
<i>Max distance@99%</i>	0.2
<i>Min points per facet</i>	100
<i>Max edge length</i>	0.5

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 42. Recorte de uma porção da nuvem de pontos 3D (câmera fixa): a) localização do recorte; e b) detalhe da feição.



Fonte: Elaborado pelo autor

As faces do modelo foram geradas com uma variação angular máxima de 15° e um raio máximo de busca de 2 metros. Os planos gerados possuem uma quantidade mínima de 100 pontos por face, com 99% dos pontos a uma distância entre si de 20 centímetros. Cores diferentes representam planos com atitudes diferentes, enquanto o degradê representa os planos com atitude semelhante.

Foi realizada uma nova amostragem do talude, porém, com enfoque em uma estrutura geológica de grande persistência (alguns metros). Realizou-se a calibração dos parâmetros do modelo conforme a Tabela 8 e Figura 43.

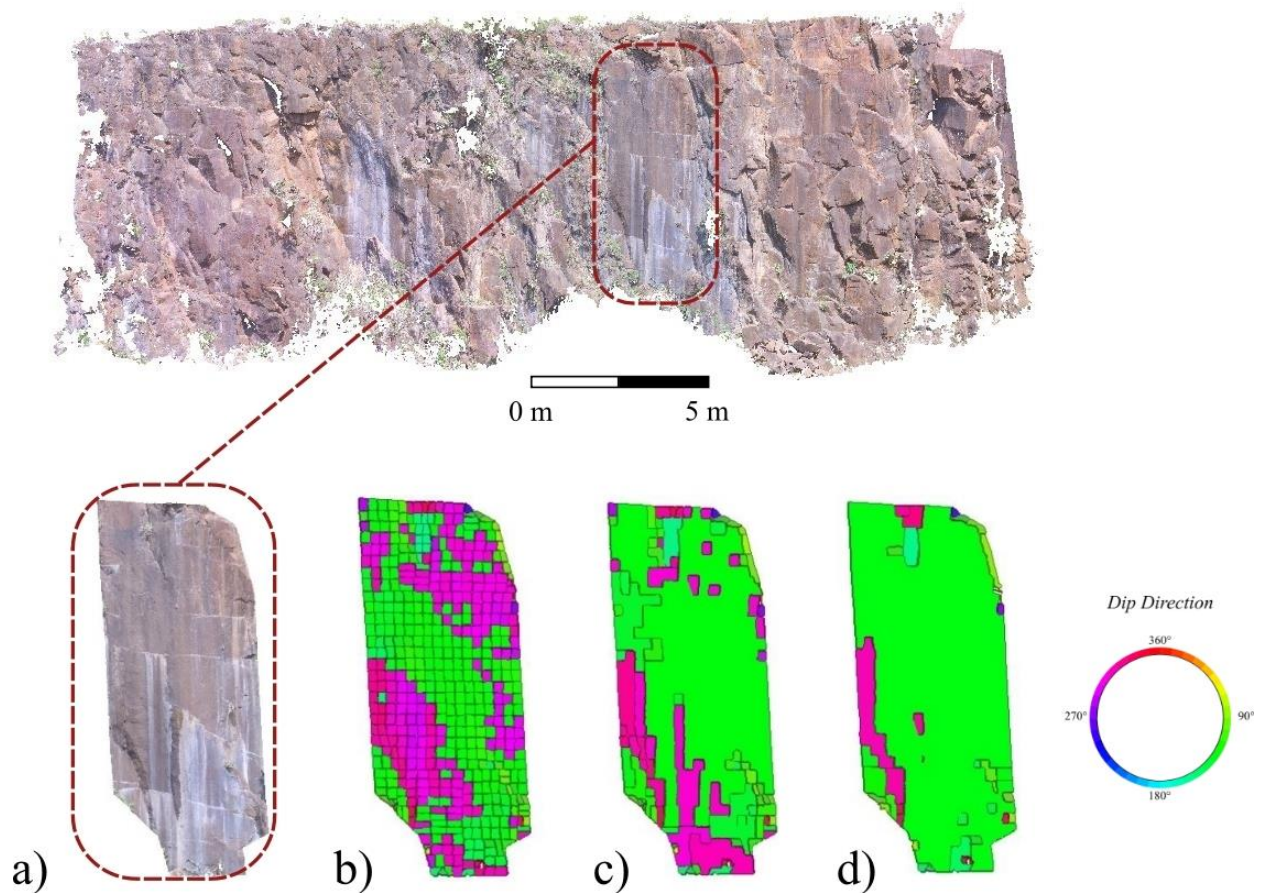
Na Figura 43b, o maciço foi excessivamente segmentado, enquanto as Figuras 43c e 43d mostram resultados mais reais. As discontinuidades sub-horizontais que interceptam o plano estrutural amostrado não foram identificadas pelo algoritmo, pois estavam paralelas a tomada de fotos, o que dificulta no reconhecimento e na reconstrução destes planos. Além disso, a face amostrada é bastante lisa, não existindo ressaltos que realcem estes planos.

Tabela 8. Parâmetros do algoritmo *Kd-tree* adotados para uma estrutura geológica de grande persistência no talude da frente de lavra NW da pedreira de Iracemópolis, SP (nuvem câmara fixa).

Parâmetros	Valores		
	B	C	D
<i>Max Angle</i>	20	10	20
<i>Max Relative Distance</i>	0.3	1	0.8
<i>Max Relative @99%</i>	0.2	0,2	1
<i>Min points per facet</i>	10	10	10
<i>Max edge length</i>	0.12	0.12	0.12

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 43. Calibração dos parâmetros para a segmentação da nuvem de pontos 3D (câmera fixa) para uma estrutura geológica persistente: a) imagem do plano geológico amostrado; b) teste utilizando um raio de nucleação de 0.3 metros; c) teste utilizando um raio de nucleação de 1 metro; e d) teste utilizando um raio de nucleação de 0.8 metros. As cores indicam as famílias de planos estruturais. A cor magenta indica planos estruturais com atitude modal de $302^{\circ}/85^{\circ}$ e a cor verde planos estruturais com atitude modal $120^{\circ}/85^{\circ}$.



Fonte: Elaborado pelo autor

Como mencionado, a estrutura em questão é um único plano geológico de grande persistência. Ao ampliar a análise para toda a face exposta do talude, aumenta-se a complexidade estrutural, o que prejudica a identificação das famílias de descontinuidades em função dos parâmetros adotados. Neste sentido, optou-se por generalizar os planos de menor área de forma a não comprometer a identificação das famílias de descontinuidades.

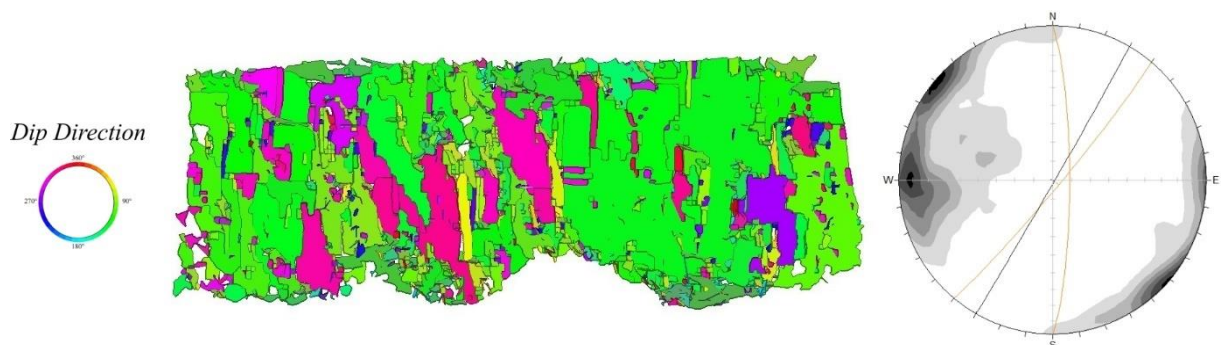
A Tabela 9 mostra os valores ótimos dos parâmetros utilizados para a classificação da nuvem de pontos 3D (câmera fixa) do talude da frente de lavra NW da pedreira de Iracemópolis (SP).

Tabela 9. Parâmetros do algoritmo *Kd-tree* utilizados para a segmentação da nuvem (câmera fixa) do talude da frente de lavra *NW* da pedreira de Iracemápolis (SP).

Parâmetros	Valores
<i>Max Angle</i>	40
<i>Max Relative Distance</i>	0.7
<i>Max Distance @99%</i>	0,5
<i>Min Points per facet</i>	1000
<i>Max Edge Length</i>	0.5

As faces do modelo foram geradas com uma variação angular máxima de 40° e um raio máximo de busca de 70 centímetros. Os planos gerados possuem uma quantidade mínima de 1000 pontos por face, com 99% dos pontos a uma distância entre si de 50 centímetros. A Figura 44 mostra o modelo estrutural resultante. As cores representam planos com atitudes diferentes. O degradê de cores representa planos com atitudes semelhantes. É possível notar a delimitação de duas superfícies principais, uma na cor magenta e outra na cor verde. Em campo, as superfícies magenta e verde são planos bem evidentes, possuem persistência de vários metros e encontram-se paralelos/subparalelos à direção da face do talude.

Figura 44. Modelo estrutural gerado pelo algoritmo *Kd-tree* para a frente de lavra *NW* da pedreira de Iracemápolis, SP (nuvem câmera fixa). À esquerda, modelo contendo 1.085 dados estruturais e à direita, estereograma de densidade de pólos, diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, igual área. Os círculos máximos no estereograma representam a atitude modal das famílias.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 10 mostra os valores ótimos dos parâmetros utilizados para a segmentação da nuvem de pontos 3D (câmera inclinada) do talude da frente de lavra *NW* da pedreira de Iracemápolis (SP).

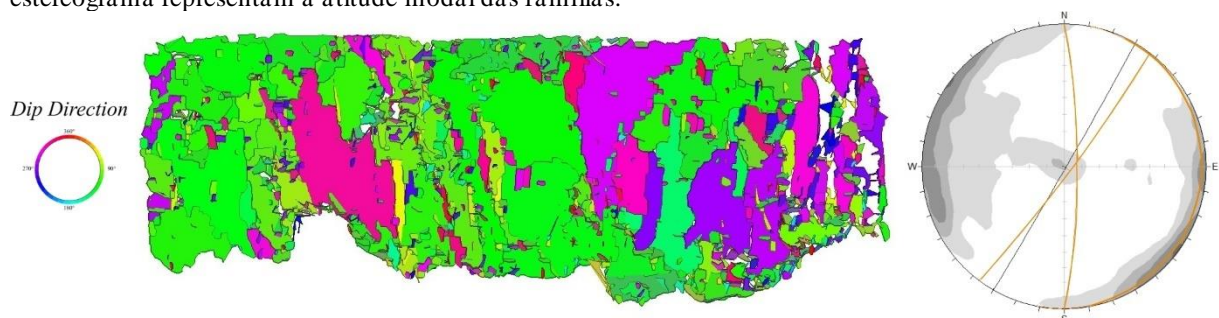
Tabela 10. Parâmetros do algoritmo *Kd-tree* utilizados para a segmentação da nuvem (câmera inclinada) do talude da frente de lavra NW da pedreira de Iracemópolis (SP).

Parâmetros	Valores
<i>Max Angle</i>	40
<i>Max Relative Distance</i>	0.8
<i>Max Distance @99%</i>	0.5
<i>Min Points per facet</i>	1000
<i>Max Edge Length</i>	0.5

Fonte: Elaborado pelo autor

As faces do modelo foram geradas com uma variação angular máxima de 40° e um raio máximo de busca de 80 centímetros. Os planos gerados possuem uma quantidade mínima de 1000 pontos por face, com 99% dos pontos a uma distância entre si de 50 centímetros. A Figura 45 mostra o modelo estrutural resultante. As cores representam planos com atitudes diferentes e o degradê de cores representa planos com atitudes semelhantes (*e.g.* magenta e roxa). É possível notar a delimitação de três superfícies principais, uma na cor magenta, uma na cor verde e outra na cor amarela. Em campo, as superfícies magenta e verde são planos bem evidentes, possuem persistência de vários metros e são paralelos/subparalelos à direção da face do talude. Notar que nesse modelo aparecem planos estruturais sub-horizontais (Figura 39).

Figura 45. Modelo estrutural gerado pelo algoritmo *Kd-tree* para a frente de lavra NW da pedreira de Iracemópolis, SP (nuvem câmera inclinada). À esquerda, modelo contendo 1.097 dados estruturais e à direita, estereograma de densidade de pólos, diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, igual área. Os círculos máximos no estereograma representam a atitude modal das famílias.



Fonte: Elaborado pelo autor

Todos os planos identificados a partir do processamento da nuvem obtida com a câmera fixa foram identificados na nuvem produzida com a câmera inclinada (Tabela 11). Contudo,

esta última também permitiu reconhecer uma família de descontinuidade de baixo mergulho. Além disso, o estereograma da Figura 45 mostra uma maior dispersão nos dados estruturais que o estereograma da Figura 44.

A Tabela 11 compara os dados estruturais obtidos em campo (*scanline*) com os dados estruturais identificados com base na segmentação das nuvens de pontos a partir do algoritmo *Kd-tree*.

Ao comparar os dados estruturais de campo com os dados derivados da segmentação da nuvem com câmera inclinada, foi constatada uma razoável aderência nos resultados. A família com atitude $241^{\circ}/88^{\circ}$ identificada em campo aparece subordinadamente no estereograma da Figura 46. A família com atitude $216^{\circ}/87^{\circ}$ é ortogonal a superfície exposta do talude e, portanto, não seria visível pela câmera do RPA, pois o apontamento da mesma permaneceu fixa no plano horizontal.

Tabela 11. Comparativo das famílias principais de descontinuidades identificadas pelo método tradicional e aqueles derivados da segmentação da nuvem de pontos 3D para o talude da frente de lavra NW da pedreira de Iracemápolis (SP).

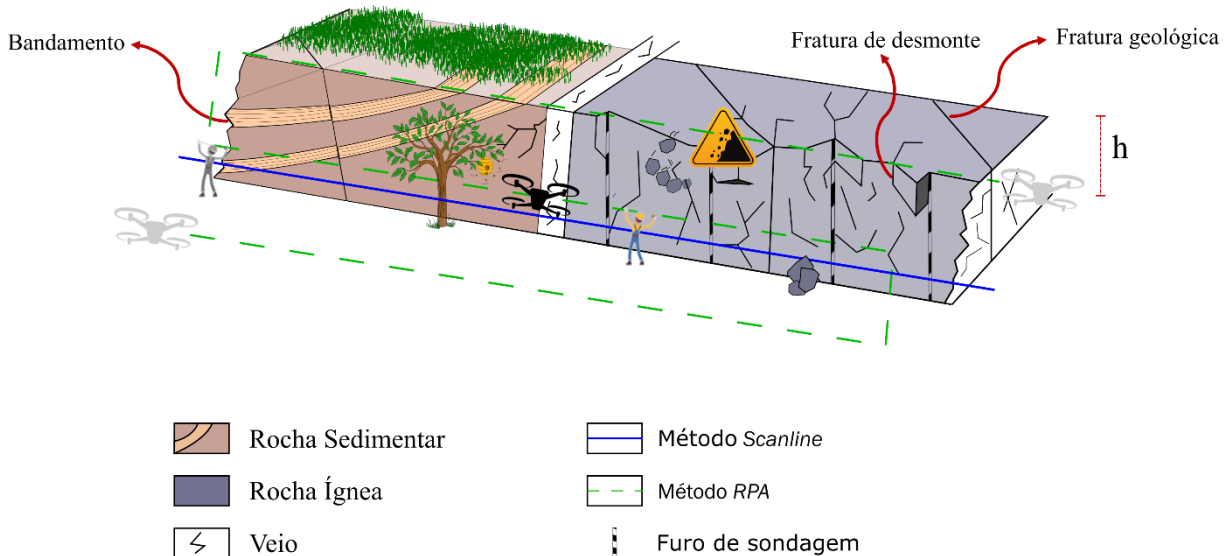
Dados de campo	Câmera fixa	Câmera inclinada
$063^{\circ}/02^{\circ}$	$090^{\circ}/80^{\circ}$	$090^{\circ}/82^{\circ}$
$135^{\circ}/82^{\circ}$	$129^{\circ}/86^{\circ}$	$128^{\circ}/85^{\circ}$
$216^{\circ}/87^{\circ}$		$270^{\circ}/02^{\circ}$
$241^{\circ}/88^{\circ}$		

Fonte: Elaborado pelo autor

8 BENEFÍCIOS E LIMITAÇÕES

A Figura 46 ilustra os modos de obtenção de dados estruturais em maciços rochosos testados nesta pesquisa.

Figura 46. Ilustração dos métodos de levantamento estrutural manual (*scanline*) e por RPA.



Fonte: Elaborado pelo autor

Taludes estruturalmente complexos, altos, vegetados, com escombros na base e/ou com insetos sinantrópicos (*e.g.* abelhas, marimbondos e vespas) são condições frequentemente encontradas em campo, que dificultam a coleta de dados estruturais.

Apesar de vantajoso do ponto de vista operacional, o método semiautomático de aquisição de dados estruturais exige conhecimento especializado para a geração de resultados confiáveis. Este conhecimento envolve desde os aspectos relacionados ao planejamento do voo, como condições meteorológicas (vento), iluminação, características estruturais dominantes do maciço etc., até o processamento e análise dos dados. Além disso, os resultados precisam ser confrontados com dados de campo, pois os dados derivados de imagens de RPA não reconhecem a origem das discontinuidades (geológica ou devido ao desmonte), e isso afeta a qualidade dos resultados. A integração de dados de ambas as fontes, portanto, permite um maior conhecimento sobre a variabilidade das discontinuidades.

Uma dificuldade importante encontrada neste estudo para a obtenção de dados estruturais derivados do processamento de imagens de RPAs diz respeito ao planejamento de voo. O aplicativo testado não possibilita avaliar o grau de sobreposição das imagens e isso

compromete a qualidade da nuvem de pontos 3D (*i.e.*, áreas oclusas, quantidade de pontos etc.). Outra importante limitação identificada, foi o tempo demandado para a segmentação de nuvens de pontos 3D muito densas (dezenas de milhões de pontos). A Tabela 12 contrasta algumas características dos métodos de obtenção de dados estruturais testados nesta pesquisa.

Tabela 12. Comparativo entre o método tradicional (*scanline*) e o método semiautomático para a obtenção de dados estruturais.

Características	Método Tradicional	Método Semiautomático
Tempo de coleta	Horas	Minutos
Condições climáticas (vento, chuva, iluminação)	Variável	Altamente dependente
Coleta de dados	Apenas em áreas acessíveis	Áreas acessíveis e de difícil acesso
Quantidade de dados estruturais	Menor	Maior
Processamento dos dados	Poucos minutos	Variável (minutos a horas dependendo da complexidade)

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo foi testada a efetividade das imagens de RPA para fins de levantamento estrutural de dois taludes de escavação com características geológicas e estruturais completamente distintas. Foram comparados os dados estruturais coletados pelo método tradicional (*scanline*) com os dados digitais derivados do processamento (segmentação) de imagens de RPA.

O uso de RPA permitiu cobrir uma superfície mais ampla do maciço rochoso, tornando-se uma boa alternativa para a detecção de geometrias não uniformes. No entanto, não há uma desvantagem quanto ao uso da *scanline*, pois apesar de possuir um número de polos menor, também implica em um menor número de pólos aleatórios, resultando em um contorno estatístico melhor definido no estereograma.

Os resultados mostraram que as abordagens são complementares e que quando integradas fornecem resultados mais representativos, visto que as imagens de RPA possibilitam obter uma maior quantidade de dados estruturais em locais de difícil acesso. No entanto, são necessários alguns cuidados, pois maciços rochosos que apresentem estruturas artificiais relacionadas ao desmonte do maciço, levam a identificação de famílias sem significado geológico. Dessa forma, é fundamental o conhecimento de campo para o reconhecimento dos padrões estruturais dominantes. Além disso, as informações de campo permitem associar os tipos de descontinuidades com as estruturas identificadas a partir do processamento da nuvem de pontos.

As metodologias de levantamento estrutural testadas devem ser utilizadas conjuntamente, pois permitem uma avaliação mais coerente da estruturação do maciço rochoso. A análise estrutural a partir da segmentação da nuvem de pontos exige um bom planejamento de voo a fim de se evitar áreas oclusas e de capturar a estruturação do maciço rochoso.

Foram testados sobrevoos realizados de forma manual e automática, sendo constatado que este último resultou em uma nuvem bem mais densa devido a regularidade da malha. Os resultados também demonstraram que a variação no ângulo de apontamento da câmera do RPA resulta em nuvens de pontos mais acuradas, possibilitando uma melhor identificação das famílias de descontinuidades.

A segmentação da nuvem de pontos para a identificação das famílias de descontinuidades é um processo empírico, que exige do analista uma análise criteriosa para a definição do melhor conjunto de parâmetros. Também foi verificado que a segmentação de

nuvens de pontos muito densas (dezenas de milhões de pontos) apresenta alto custo computacional (demanda maior tempo de processamento). A segmentação da nuvem de pontos apesar de possibilitar a identificação das famílias de descontinuidade, não permite avaliar o grau de fraturamento do maciço e, conseqüentemente, não possibilita identificar áreas mais propensas a rupturas.

Esse trabalho servirá de base para futuros trabalhos científicos em análise estrutural a partir de produtos derivados de RPA, assunto esse que vem ganhando cada vez mais espaço nas geociências. Contudo, recomenda-se que novos estudos sejam realizados, considerando uma maior variação no ângulo de apontamento da câmera, com o objetivo de detectar possíveis estruturas oclusas.

10 REFERÊNCIAS

AGISOFT PHOTOSCAN PROFESSIONAL. Manual do usuário. Disponível em: <https://www.agisoft.com/downloads/user-manuals/>. Acesso em: 18 maio 2023.

ALMEIDA, F. F. M. *et al.* Províncias estruturais brasileiras. In: **Simpósio de Geologia do Nordeste**, v. 8, n. 1977, p. 363-391, 1977.

ALMEIDA, F. F. M., CARNEIRO, C. D. R., BATORELLI, A. Magmatismo pós-paleozoico no Brasil. In: Hasui, Y., Carneiro, C.D.R., Almeida, F.F.M., Bartorelli, A. (Eds.), *Geologia do Brasil*. Beca, Brazil, pp. 374–394, 2012.

AMORIM, N. C. Avaliação Do Desempenho Da Técnica Structure From Motion Para Mapeamento De Corredores. Dissertação (Mestrado em Geologia) - **Universidade Federal do Paraná**, 2020.

BALTAZAR, O. F. Programa de levantamento geológico básico do Brasil. Parte II - Geologia da Folha Cachoeiro de Itapemirim Capítulo 3 Geologia Estrutural. Cachoeiro de Itapemirim. Folha SF.24-V-A-V. Estado do Espírito Santo. Escala 1:100.000. Brasília, 1993.

BARLOW, J.; GILHAM, J.; IBARRA COFRÃ, I. Kinematic analysis of sea cliff stability using UAV photogrammetry. In: **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 8-10, p. 2464-2479, 2017.

BATTULWAR, R. *et al.* A state-of-the-art review of automated extraction of rock mass discontinuity characteristics using three-dimensional surface models. In: **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 13, n. 4, p. 920-936, 2021.

BENTLEY, J. L. Multidimensional Binary Search Trees Used for Associative Searching. In: **Communications of the ACM**, v. 18, n. 9, p. 509-517, 1975.

BENTLEY, J. L. Multidimensional Binary Search Trees in Database Applications. In: **IEEE Transactions on Software Engineering**, n. 4, p. 333-340, 1979.

BENTLEY, J. L. K-d trees for semidynamic point sets. In: **Proceedings of the sixth annual symposium on Computational geometry**, p. 187–197, 1990.

BISTACCHI, A. *et al.* Photogrammetric digital outcrop reconstruction, visualization with textured surfaces, and three-dimensional structural analysis and modeling: Innovative methodologies applied to fault-related dolomitization (Vajont Limestone, Southern Alps, Italy). In: **Geosphere**, v. 11, n. 6, p. 2031–2048, 2015.

BOLLES, R. C.; BAKER, H. H.; MARIMONT, D. H. Epipolar-plane image analysis: An approach to determining structure from motion. In: **International Journal of Computer Vision**, v. 1, n. 1, p. 7–55, 1987.

BUYER, A.; PISCHINGER, G.; SCHUBERT, W. Image-based discontinuity identification: Bildgestützte Trennflächenidentifikation. In: **Geomechanics and Tunnelling**, v. 11, n. 6, p. 693-700, 2018.

BUYER, A.; AICHINGER, S.; SCHUBERT, W. Applying photogrammetry and semi-automated joint mapping for rock mass characterization. In: **Engineering geology**, v. 264, p. 105332, 2019.

BRITO, J. L. N.S.; COELHO, L. Fotogrametria Digital. Rio de Janeiro: **EdUERJ**, 2007.

CARNEIRO C.D.R. coord. Projeção estereográfica para análise de estruturas. Programas ESTER e TRADE. Fundamentos Teóricos, Exercícios e Aplicações em Microcomputador, Laboratório e Campo. São Paulo: Co-Edição CPRM / IG-Unicamp / IPT-Digeo. p.184, 1996.

CAWOOD, A. J. *et al.* LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models. In: **Journal of Structural Geology**, v. 98, p. 67-82, 2017.

COLICA, E. *et al.* Using unmanned aerial vehicle photogrammetry for digital geological surveys: case study of Selmun promontory, northern of Malta. In: **Environmental Earth Sciences**, v. 80, p. 1-14, 2021. DOI: 10.1007/s12665-021-09846-6.

COLOMINA, I. *et al.* Towards a new paradigm for high-resolution low-cost photogrammetry and remote sensing. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Beijing (CN) v. 37, p. 3-11, 2008.

COMER, R.P., KINN, G., LIGHT, D., MONDELLO, C. 1998. ‘Talking digital’, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 64, pp. 1139–1142, viewed 5 November 2018, <<https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1998journal/dec/12-98-digital.pdf>>

DAVIS, G. H.; REYNOLDS, S. J. Structural geology of rocks and regions. 2nd ed. John Wiley & Sons, 1996.

DEWEZ, T. J. B. *et al.* FACETS: A CloudCompare plugin to extract geological planes from unstructured 3D point clouds. In: **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS**, v. 41, p. 799–804, 2016.

DUEHOLM, K. S. Geologic photogrammetry using standard small-frame cameras. In: **Rapport Grønlands Geologiske Undersøgelse**, v. 156, p. 7–17, 1992.

ESRI. ArcGIS for Desktop (Versão 10.3.1) [Software de computador]. Environmental Systems Research Institute, Inc. (Esri). Disponível em: <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop>. Acesso em: 2022.

FILICE, F. *et al.* Multi-approach for the assessment of rock slope stability using in field and UAV investigations. In: **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 81, n. 12, p. 502, 2022.

FERNÁNDEZ, O. Obtaining a Best Fitting Plane through 3D Georeferenced Data. *J. Struct. Geol.*, 27, 855–858, 2005.

FETTES, D. J. (org); DESMONS, J. (org); REIS NETO, J. M. (trad). Rochas metamórficas: classificação e glossário. In: **Oficina de Textos**: São Paulo, p. 313, 2014.

FOSSSEN, H. Geologia estrutural. São Paulo: Oficina de textos, p. 204-205, 2012.

FURUKAWA, Y.; PONCE, J. Accurate camera calibration from multi-view stereo and bundle adjustment. In: **International Journal of Computer Vision**, v. 84, n. 3, p. 257–268, 2009.

FREITAS, *et al.* Cross-strata paleocurrent analysis using virtual outcrops. In: **Sedimentology**, v. 68, n. 6, p. 2397-2421, 2021. DOI: 10.1111/sed.12855.

GAICH, A.; PISCHINGER, G. 3D images for digital geological mapping: Focussing on conventional tunnelling. In: **Geomechanics and Tunnelling**, v. 9, n. 1, p. 45-51, 2016.

GIORDAN, D. *et al.* The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology applications. In: **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 79, p. 3437–3481, 2020.

GUNDLACH, J. Designing unmanned aircraft systems. In: **American Institute of Aeronautics & Astronautics**, 2014.

GRADIM, C. *et al.* The hot back-arc zone of the Araçuaí orogen, Eastern Brazil: from sedimentation to granite generation. In: **Brazilian Journal of Geology**, v. 44, n. 1, p. 155–180, 2014.

GROHMANN, C. H. *et al.* Remotely piloted aircraft-based automated vertical surface survey. In: **MethodsX**, v. 10, 2023.

HACHIRO, J. O Subgrupo Irati (neopermiano) da Bacia do Paraná. 1996. 196 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, **Universidade Estadual Paulista**, Rio Claro.

HARTWIG, M. E.; MOREIRA, C. A. Integration of multisources data for quarry slope stability assessment in the Itaoca district (Southeastern Brazil). In: **Annals of the Brazilian Academy of Science**, v. 93, 2021. Doi:10.1590/0001-376520212019322

HARTWIG, M. E.; PINHEIRO, V. S. Estudo sobre ruptura ocorrida no talude em rocha do km 13,3 da ES – 177 (Serra da aliança, ES). In: **Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental**, 17°, Belo Horizonte (MG), 2022.

HARTWIG, M. E.; SANTOS, G. G. S. Mapeamento estrutural de maciços rochosos com base em imagens de VANT. In: **Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental**, 17°, Belo Horizonte (MG), 2022.

HASUI, Y. Sistema Orogênico Mantiqueira. In: **Geologia do Brasil**. São Paulo: Editora Beca, p. 331-372, 2012.

HERGET, G. Structural Geology. In: CANMET REP ed. Pit Slope Manual. Ottawa: CANMET (Canada Centre for Mineral and Energy Technology, formerly Mines Branch, Energy, Mines and Resources Canada), p. 123, 1977.

HEEL, J. Direct Estimation of Structure and Motion from Multiple Frames. In: **Massachusetts Inst. Of Tech Cambridge Artificial Intelligence Lab**, 1990.

HUDSON, J. A.; HARRISON, J. P. Engineering rock mechanics: an introduction to the principles. In: **Elsevier**, Londres, Pergamon, 1997.

HUGENHOLTZ, C. H. *et al.* Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. In: **Geomorphology**, v. 194, p. 16–24, 2013.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. In: **Brown ET editor**. Rock characterization, testing and monitoring: ISRM suggested Methods. Oxford: Pergamon, p. 3–52, 1981.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM). The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. In **Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods**; Ulusay, R., Hudson, J.A., Eds.; Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group; International Society for Rock Mechanics: Ankara, Turkey, p. 628, 2007.

JABOYEDOFF, M. *et al.* , New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D-imaging cloud points: COLTOP-3D software. In: Eberhardt, E., Stead, D and

Morrison T. (Eds.): **Rock mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands** (Vol. 1), Taylor & Francis, pp. 61-68, 2007.

KUTULAKOS, K. N.; SEITZ, S. M. Theory of shape by space carving. In: **International Journal of Computer Vision**, v. 38, n. 3, p. 199–218, 2000.

LI, J. *et al.* Bundled depth-map merging for multi-view stereo. In: **IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**, p. 2769–2776, 2010.

LOWE, D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. In: **International journal of computer vision**, v. 60, p. 91-110, 2004.

LYONS-BARAL, J.; KEMENY, A. J. Applications of point cloud technology in geomechanical characterization, analysis and predictive modeling. In: **Mining Engineering**, v. 68, n. 5, p. 1–12, 2016.

MACHADO, F. B. *et al.* As rochas intrusivas da Formação Serra Geral na Porção leste da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo: Aspectos petrográficos e geoquímicos - Resultados preliminares. In: **Geosciences**, v. 24, n. 1, p. 5–17, 2005.

MARCHI, A. A. Implementação de uma bússola digital. Tese de Doutorado. **Universidade de São Paulo**, 2009.

MARQUES, L. S.; ERNESTO, M. O magmatismo toleítico da Bacia do Paraná. In: **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**, p. 245-263, 2004.

MATHESON, G. D. The collection and use of field discontinuity data in rock slope design. In: **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 22, n. 1, p. 19-30, 1989.

MEDINAC, F & ESMAEILI, K. Integrating unmanned aerial vehicle photogrammetry in design compliance audits and structural modelling of pit walls. In: **PM Dight** (ed.), *Slope Stability 2020: Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 1439-1454, 2020. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2025_99

MENEGONI, N. *et al.* Detection and geometric characterization of rock mass discontinuities using a 3D high-resolution digital outcrop model generated from RPA imagery – Ormea rock slope, Italy. In: **Engineering Geology**, v. 252, p. 145–163, 2019. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.02.028

MEZZALIRA, S. Boletim IGG 43 Descrição geológica e geográfica das folhas de Piracicaba e São Carlos, SP. Estado de São Paulo, Secretaria da Agricultura, Instituto Geográfico e Geológico, 1965.

MILANI, E. J. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica Fanerozoica do Gondwana Sul-Ocidental. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências, **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 1997.

MILANI, E. J. *et al.* Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.

MINEO, S.; CALIÒ, D.; PAPPALARDO, G. UAV-Based Photogrammetry and Infrared Thermography Applied to Rock Mass Survey for Geomechanical Purposes. In: **Remote Sensing**, v. 14, n. 3, p. 473, 2022. DOI: 10.3390/rs14030473.

NAGENDRAN, S.; ISMAIL, M. A. M.; TUNG, W. Y. Accuracy assessment on low altitude UAV-borne photogrammetry outputs influenced by ground control point at different altitude. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2018.

NAGENDRAN, S. K.; ISMAIL, M. A. M.; TUNG, W. Y. Photogrammetry approach on geological plane extraction using CloudCompare FACET plugin and scanline survey. In: **Bulletin of the Geological Society of Malaysia**, v. 68, 2019a.

NAGENDRAN, S. K.; ISMAIL, M. A. M.; TUNG, W. Y. Integration of UAV photogrammetry and kinematic analysis for rock slope stability assessment. In: **Bulletin of the Geological Society of Malaysia**, v. 67, 2019b.

NASRULLAH, A. R. **Systematic Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Derived Product Quality**. Dissertação de mestrado. **University of Twente**, 2016.

NESBIT, P. R.; HUBBARD, S. M.; HUGENHOLTZ, C. H. Direct Georeferencing UAV-SfM in High-Relief Topography: Accuracy Assessment and Alternative Ground Control Strategies along Steep Inaccessible Rock Slopes. In: **Remote Sensing**, v. 14, n. 3, p. 490, 2022.

NEX, F.; REMONDINO, F. UAV for 3D mapping applications: a review. In: **Applied geomatics**, v. 6, p. 1-15, 2014.

PADILHA, A. V. Programa de levantamento geológico básico do Brasil. Parte II – Geologia da Folha Cachoeiro de Itapemirim. Capítulo 1 Geologia Regional. Cachoeiro de Itapemirim. Folha SF.24-V-A-V. Estado do Espírito Santo. Escala 1:100.000. Brasília: 1993.

PAPATHANASSIOU, G. *et al.* Rock Mass Characterization of Karstified Marbles and Evaluation of Rockfall Potential Based on Traditional and SfM-Based Methods; Case Study of Nestos, Greece. In: **Geosciences**, v. 10, n. 10, p. 389, 2020.

PEIXOTO, E. *et al.* A suture-related accretionary wedge formed in the Neoproterozoic Araçuaí orogen (SE Brazil) during Western Gondwanaland assembly. In: **Gondwana Research**, v. 27, n. 2, p. 878–896, 2015.

PEREIRA, E. *et al.* Evolução das Sinéclises Paleozoicas: Províncias Solimões, Amazonas, Parnaíba e Paraná. In: Hasui, Y., Carneiro, C.D.R., Almeida, F.F.M., Bartorelli, A. (Eds.), *Geologia do Brasil*. Beca, Brazil, pp. 374–394, 2012.

PRIEST, S. D. Discontinuity Analysis for Rock Engineering. In: **Springer Science & Business Media**, London, p. 473, 1993.

PRIEST, S. D. Determination of discontinuity size distributions from scanline data. In: **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 37, n. 5, p. 347-368, 2004.

PROCOPIUC, O. *et al.* Bkd-tree: A dynamic scalable kd-tree. In: **Advances in Spatial and Temporal Databases: 8th International Symposium**, Santorini Island, Greece, v. 2750, p. 46–65, 2003.

REMONDINO, F. *et al.* UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling: Current status and future perspectives. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 38, p. 25-31, 2012.

RICCOMINI, C. Padrão de fraturamentos do maciço alcalino de Cananéia, Estado de São Paulo: relações com a tectônica mesozóico-cenozóica do sudeste do Brasil. In: **Brazilian Journal of Geology**, v. 25, n. 2, p. 79-84, 1995.

RICCOMINI, C. Arcabouço estrutural e aspectos do tectonismo gerador e deformador da Bacia Bauru no Estado de São Paulo. In: **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 2, p. 153-162, 1997.

ROBINSON, J. T. The K-D-B-tree: A search structure for large multidimensional dynamic indexes. In: **Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data**, p. 10–18, 1981.

SALVINI, R. *et al.* The use of an unmanned aerial vehicle for fracture mapping within a marble quarry (Carrara, Italy): photogrammetry and discrete fracture network modelling. In: **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 8, n. 1, p. 34-52, 2017. DOI: 10.1080/19475705.2016.1199053.

SAMET, H. The Design and Analysis of Spatial Data Structures. In: **Wesley Publishing Company, INC.**, 1990.

SEITZ, S. M. *et al.* A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. In: **IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**, v. 1, p. 519–526, 2006.

SETHIAN, J. A. Fast Marching Methods: A boundary value formulation. 1996-2010. Disponível em: https://math.berkeley.edu/~sethian/2006/Explanations/fast_marching_explain.html. Acesso em: 29 nov. 2020.

SILVA, J. N. Programa de levantamento geológico básico do Brasil. Cachoeiro de Itapemirim. Folha SF.24-V-A-V. Estado do Espírito Santo. Escala 1:100.000. Brasília: 1993.

STEAD, D.; WOLTER, A. A critical review of rock slope failure mechanisms: the importance of structural geology. In: **Journal of Structural Geology**, v. 74, p. 1-23, 2015.

TENENBAUM, A. M. Estruturas de Dados usando C. São Paulo: **Makron Books Brasil**, 1995.

THORPE, R. S.; BROWN, G. C. The field description of igneous rocks. In: **Chichester, England: John Wiley & Sons**, 1993.

TONON, F.; KOTTENSTETTE, J. Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization. In: **Report on a workshop in Golden**, Colorado. 2006.

VIANA, C. D. *et al.* Slope stability assessment based on a digital outcrop model: A case-study at Jardim Garcia quarry. In: **14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering**, ISRM 2019. Foz do Iguaçu, 2019.

VIANA, C. D. Fotogrametria digital multi-escala para aquisição de dados estruturais. Tese (Doutorado em Geociências) - **Universidade de São Paulo**, 2021.

VIEIRA, V. S. *et al.* Mapa geológico do estado do Espírito Santo. Belo Horizonte: CPRM, 2018.

VILLAREAL J, C. A.; ROJAS D, J. D.; RÍOS R, C. A. 3D digital outcrop modelling of the Lower Cretaceous Los Santos formation sandstones, Mesa de Los Santos region (Colombia): Implications for structural analysis. In: **Journal of Structural Geology**, v. 141, 2020. DOI:10.1016/j.jsg.2020.104214.

WESTOBY, M. J. *et al.* "Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. In: **Geomorphology**, v. 179, p. 300–314, 2012.

WYLLIE, D. C.; MAH, C. W. Rock slope engineering: Civil and mining, 4th SPONPRESS: Taylor & Francis Group, 2004.

ZALAN, P. V. *et al.* Bacia do Paraná. In: **Origem e evolução das bacias sedimentares**, p. 135-168, 1990.

ZIMMERER, M. Drones for the Geosciences: a New Eye in the Sky. In: **New Mexico Bureau of Geology and Mineral Resources**, v. 18, p. 6, 2018.

11 APÊNDICE – RELATÓRIOS DE QUALIDADE

11.1 Apêndice A – Rodovia ES-482 (voo manual)

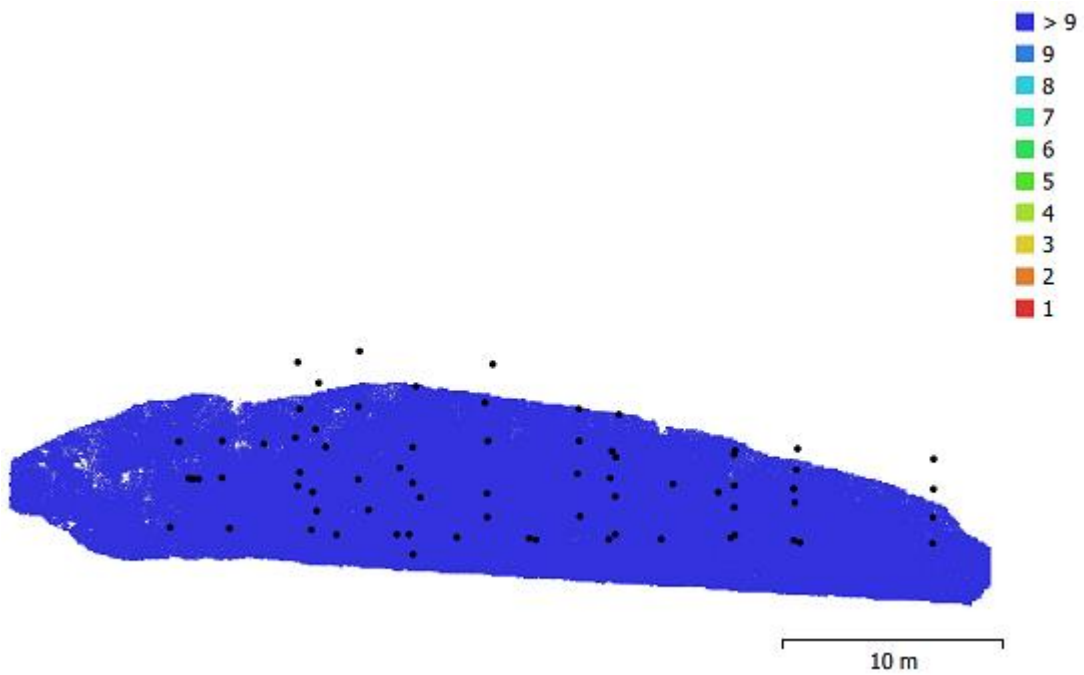
Relatório de Processamento

16 de julho de 2023



- **Dados de Pesquisa**

Figura A1. Localização da câmera e sobreposição das imagens.



Número de Imagens

Estação de câmera

71	71
Altitude de voo	<i>Tie Points</i>
16 m	41.143
<i>Ground Resolution</i>	Projeção
6.54 mm/pix	205.167
Área de cobertura	Erro de reprojeção
296 m ²	1.35 pix

A Tabela A1 mostra as configurações da câmera utilizada para o sobrevoo.

Tabela A1. Configurações de câmera.

Modelo de câmera	Resolução	Distância focal	Tamanho do pixel	Pré Calibração	Tipo de sensor
FC330 (3.61mm)	4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 μm	Não	Frame

- **Calibração da câmera**

Figura A2. Resíduos de imagens para FC330 (3.61 mm)

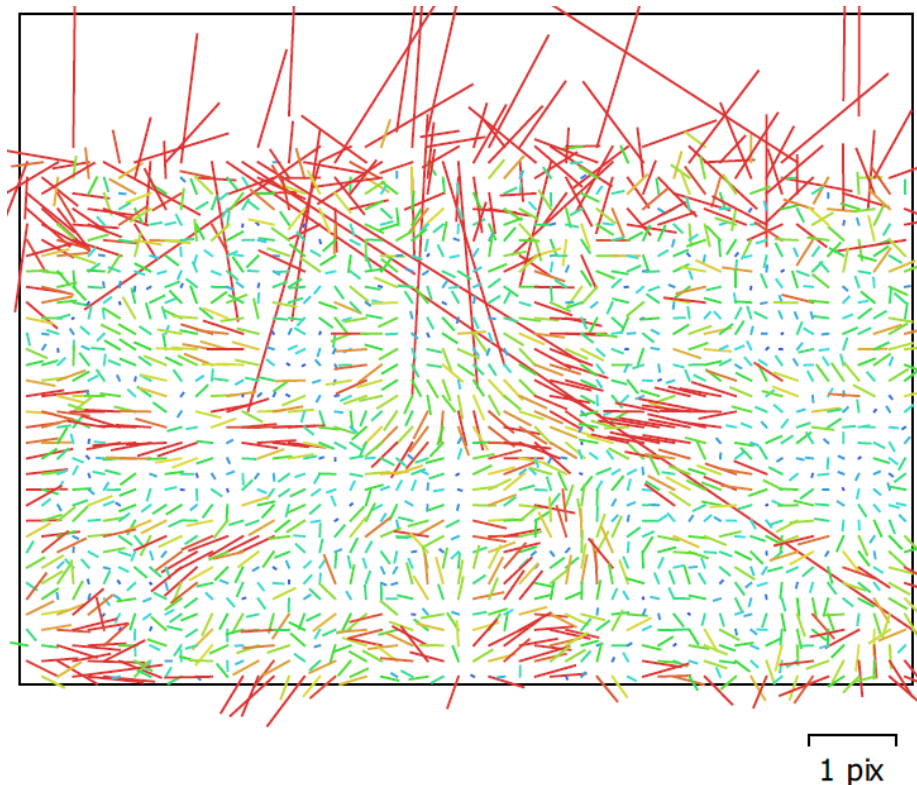


Tabela A2. Coeficientes de calibração e matriz de correlação.

	Valor	Erro	K1	K2	P1	P2
F	2311.25					
K1	-0.0147	$6.6e^{-5}$	1.00	-0.63	0.09	-0.06
K2	0.0121	$3.8e^{-5}$		1.00	-0.02	0.02
P1	-0.0010	$3.5e^{-5}$			1.00	0.16
P2	-0.0012	$2.1e^{-6}$				1.00

- **Localização das câmeras e erros estimados**

Figura A3. Localização das câmeras e erros estimados.

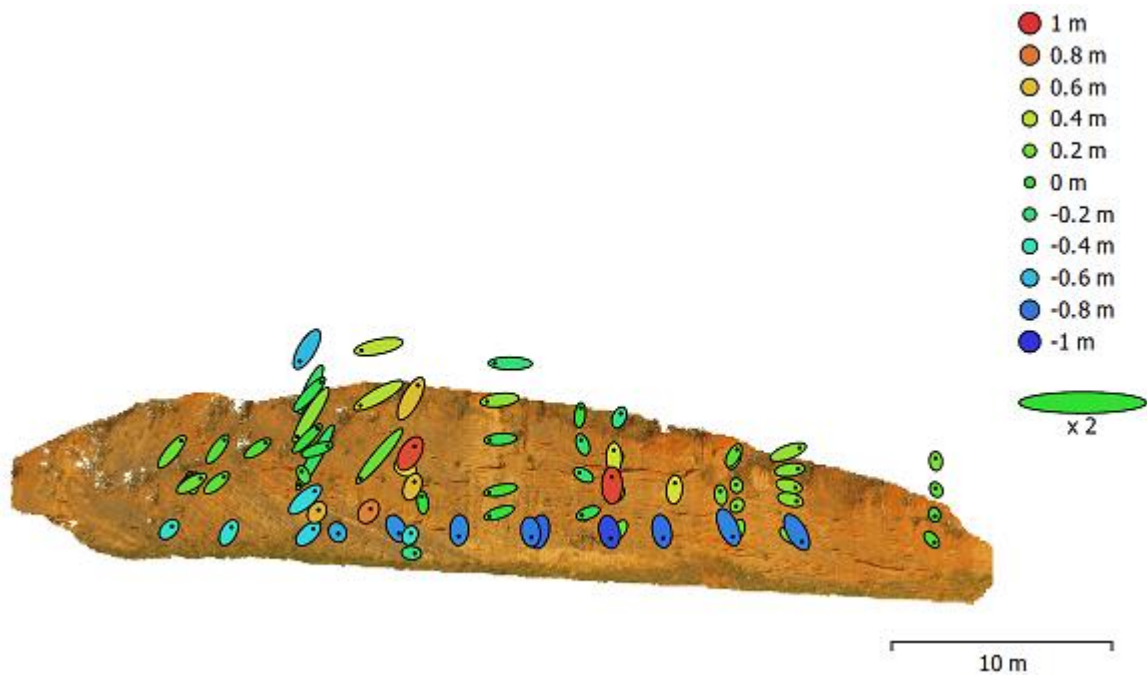


Tabela A3. Média dos erros de localização da câmera.

X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	XY (cm)	Erro Total (cm)
32.777	35.2578	42.4783	48.1403	64.202

- **Parâmetros de processamento**

- **General**

Cameras	71
Aligned cameras	71
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

- **Tie Points**

Points	41,143 of 50,640
RMS reprojection error	0.160441 (1.34673 pix)
Max reprojection error	0.486419 (46.5207 pix)
Mean key point size	7.34333 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	68.61 MB
Average tie point multiplicity	5.74283

- **Alignment parameters**

Accuracy	Medium
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Key point limit per Mpx	0
Tie point limit	10,000
Exclude stationary tie points	Yes
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	17 seconds
Matching memory usage	398.17 MB
Alignment time	29 seconds
Alignment memory usage	213.76 MB
Date created	2023:06:30 14:43:13
Software version	2.0.1.15986
File size	6.64 MB

- **Depth Maps**

Count	71
-------	----

- **Depth maps generation parameters**

Quality	High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	9 minutes 1 seconds
Memory usage	2.81 GB
Date created	2023:06:30 14:53:02
Software version	2.0.1.15986
File size	227.36 MB

Point Cloud	
Points	2,774,254
Point attributes	
Position	
Color	3 bands, uint8
Normal	
Confidence	
Point classes	
Created (never classified)	2,774,254
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	9 minutes 1 seconds
Memory usage	2.81 GB
Point cloud generation parameters	
Processing time	6 minutes 36 seconds
Memory usage	2.97 GB
Date created	2023:06:30 14:59:38
Software version	2.0.1.15986
File size	110.89 MB
System	
Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	2.0.1 build 15986
OS	Windows 64 bit
RAM	31.95 GB
CPU	AMD Ryzen 7 1700 Eight-Core Processor
GPU(s)	NVIDIA GeForce GTX 1060 6GB

11.2 Apêndice B – Rodovia ES-482 (voo automático)

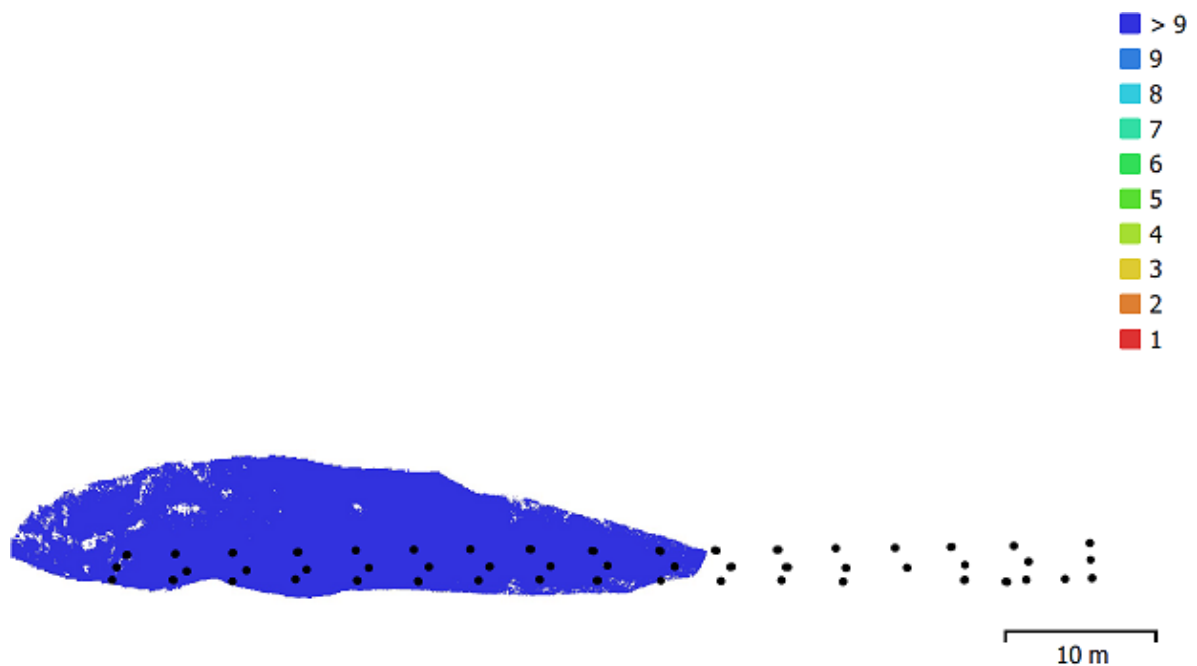
Relatório de Processamento

16 de julho de 2023



- **Confiabilidade**

Figura B1. Localização das câmeras e sobreposição das imagens.



Número de Imagens

100

Altitude de voo

12.2 m

Estação de câmera

100

Tie Points

90.944

Ground Resolution

4.55 mm/pix

Área de cobertura

297 m²

Projeção

321.566

Erro de reprojeção

1.33 pix

Tabela B1. Configurações de câmera.

Modelo de câmera	Resolução	Distância focal	Tamanho do pixel	Pré Calibração	Tipo de sensor
FC330 (3.61mm)	4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 μm	Não	Frame

- **Calibração da câmera**

Figura B2. Resíduos de imagens para FC330 (3.61 mm)

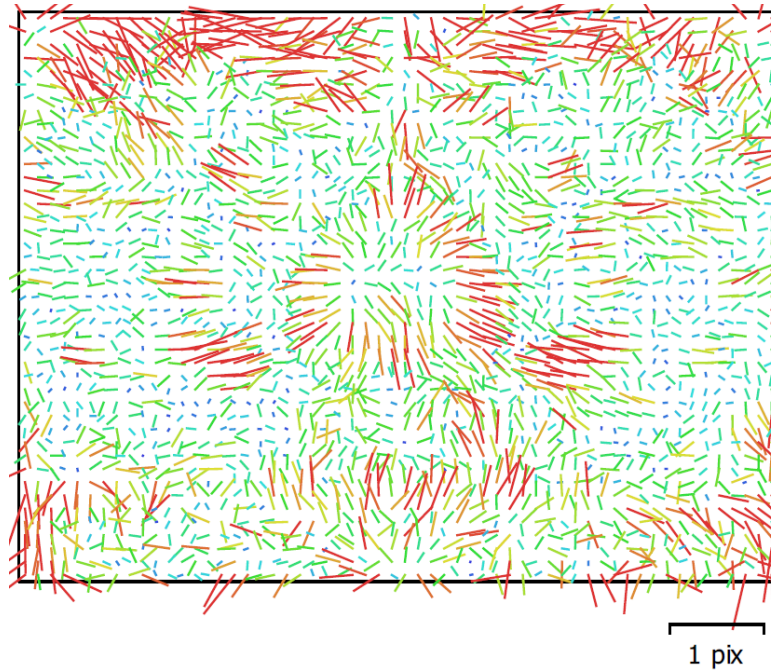


Tabela B2. Coeficientes de calibração e matriz de correlação.

	Valor	Erro	F	Cx	Cy	K1	K2	P1	P2
F	2338.88	0.13	1.00	-0.05	0.47	0.26	0.23	-0.05	0.38
Cx	41.2677	0.37		1.00	-0.03	0.10	-0.17	0.97	0.00
Cy	17.5686	0.17			1.00	0.14	-0.09	-0.03	0.86

K1	-0.0134	$3.8e^{-5}$				1.00	-0.72	0.01	0.17
K2	0.0123	$3.4e^{-5}$					1.00	-0.17	-0.13
P1	0.0034	$3.9e^{-5}$						1.00	0.00
P2	0.0004	$1.8e^{-6}$							1.00

- **Localização das câmeras e erros estimados**

Figura B3. Localização das câmeras e erros estimados.

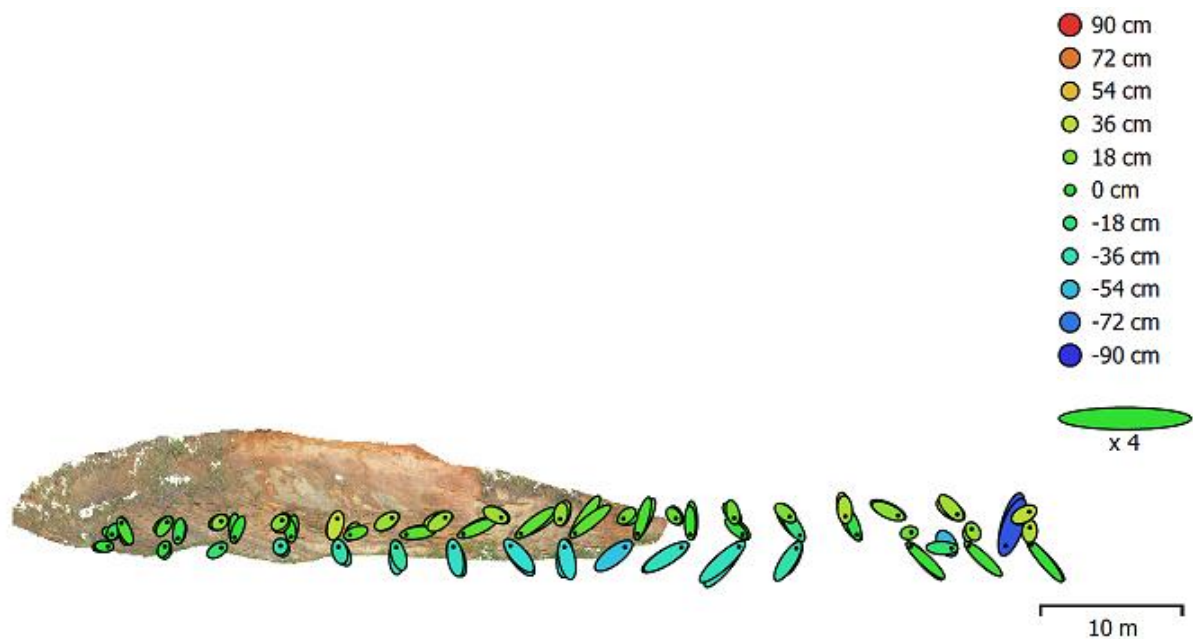


Tabela B3. Média dos erros de localização da câmera.

X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	XY (cm)	Erro Total (cm)
25.5657	29.6083	26.0824	39.1185	47.0164

- **Parâmetros de processamento**

General

Cameras	100
Aligned cameras	100
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Tie Points

Points	90,944 of 132,995
RMS reprojection error	0.136749 (1.32617 pix)
Max reprojection error	0.418719 (52.0652 pix)
Mean key point size	7.76731 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	101.52 MB
Average tie point multiplicity	3.65352

Alignment parameters

Accuracy	Medium
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Key point limit per Mpx	0
Tie point limit	10,000
Exclude stationary tie points	Yes
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	24 seconds
Matching memory usage	402.09 MB
Alignment time	1 minutes 2 seconds
Alignment memory usage	368.09 MB
Date created	2023:06:30 15:10:56
Software version	2.0.1.15986
File size	11.75 MB

Depth Maps

Count	100
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	10 minutes 1 seconds
Memory usage	2.35 GB
Date created	2023:06:30 15:22:49
Software version	2.0.1.15986
File size	329.60 MB

Point Cloud

Points	5,786,595
Point attributes	
Position	
Color	3 bands, uint8
Normal	
Confidence	
Point classes	
Created (never classified)	5,786,595

Depth maps generation parameters

Quality	High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	10 minutes 1 seconds
Memory usage	2.35 GB

Point cloud generation parameters

Processing time	5 minutes 44 seconds
Memory usage	4.45 GB
Date created	2023:06:30 15:28:34
Software version	2.0.1.15986
File size	251.45 MB

System

Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	2.0.1 build 15986
OS	Windows 64 bit
RAM	31.95 GB
CPU	AMD Ryzen 7 1700 Eight-Core Processor
GPU(s)	NVIDIA GeForce GTX 1060 6GB

11.3 Apêndice C – Pedreira Iracemópolis (câmera fixa)

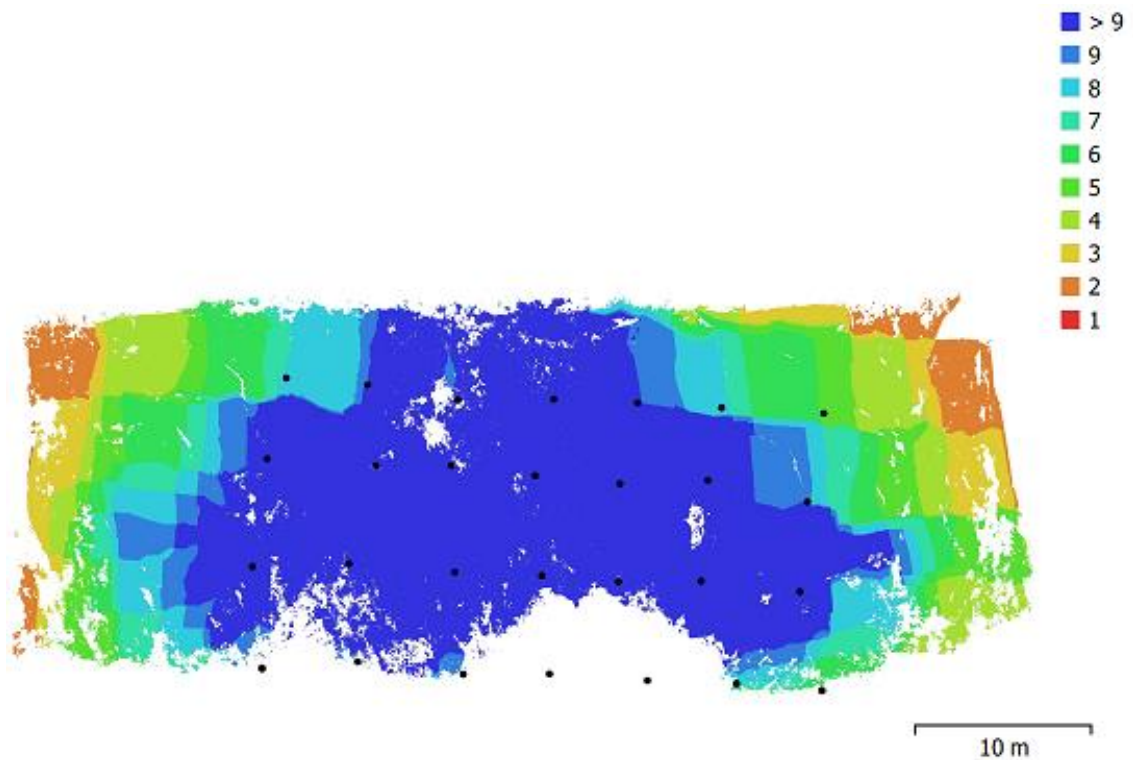
Relatório de Processamento

16 de julho de 2023



- **Confiabilidade**

Figura C1. Localização das câmeras e sobreposição das imagens.



Número de Imagens	Estação de câmera
31	31
Altitude de voo	<i>Tie Points</i>
15.3 m	36.879
<i>Ground Resolution</i>	Projeção
6.51 mm/pix	126.757
Área de cobertura	Erro de reprojeção
986 m ²	1.4 pix

Tabela C1. Configurações de câmera.

Modelo de câmera	Resolução	Distância focal	Tamanho do pixel	Pré Calibração	Tipo de sensor
FC330 (3.61mm)	4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 μm	Não	Frame

- **Calibração da câmera**

Figura C2. Resíduos de imagens para FC330 (3.61 mm)

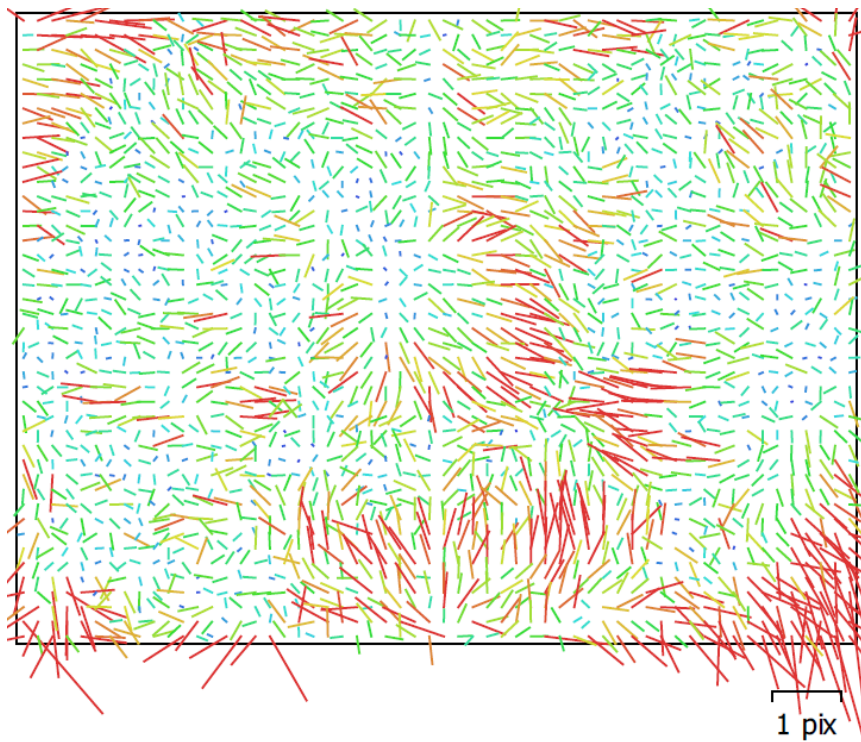


Tabela C2. Coeficientes de calibração e matriz de correlação.

	Valor	Erro	K1	K2
F	2311.25			
K1	-0.0167	$8e^{-5}$	1.00	-0.42
K2	0.0148	$4.1e^{-5}$		1.00

- **Localização das câmeras e erros estimados**

Figura C3. Localização das câmeras e erros estimados.

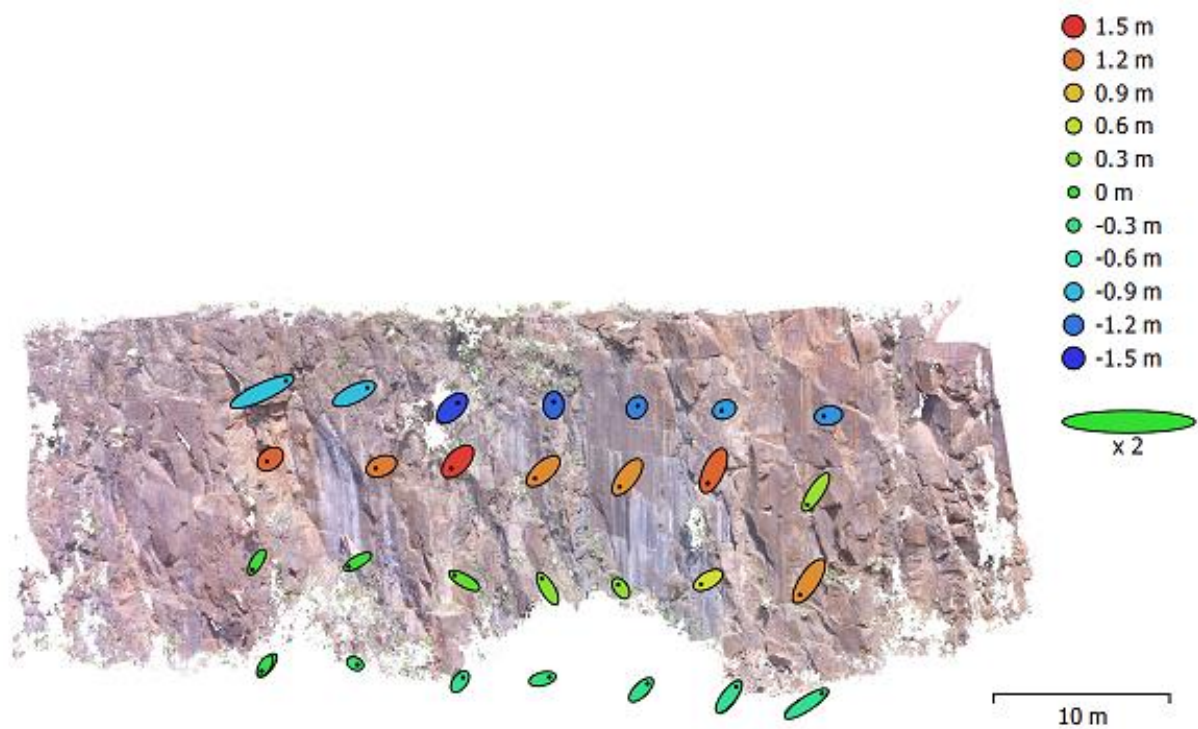


Tabela B3. Média dos erros de localização da câmera.

X (m)	Y (m)	Z (m)	XY(m)	Erro Total (m)
0.480522	0.416984	0.827655	0.636221	1.04393

- **Parâmetros de processamento**

General

Cameras	31
Aligned cameras	31
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Tie Points

Points	36,879 of 52,712
RMS reprojection error	0.149314 (1.40242 pix)
Max reprojection error	0.450123 (36.2552 pix)
Mean key point size	7.77918 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	46.94 MB
Average tie point multiplicity	3.22714

Alignment parameters

Accuracy	Medium
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Key point limit per Mpx	0
Tie point limit	10,000
Exclude stationary tie points	Yes
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	52 seconds
Matching memory usage	405.91 MB
Alignment time	7 seconds
Alignment memory usage	21.51 MB
Date created	2023:06:30 13:45:09
Software version	2.0.1.15986
File size	4.24 MB

Depth Maps

Count	31
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	3 minutes 2 seconds
Memory usage	1.93 GB
Date created	2023:06:30 13:48:39
Software version	2.0.1.15986
File size	107.42 MB

Point Cloud

Points	8,860,932
--------	-----------

Point attributes

Position	
Color	3 bands, uint8
Normal	
Confidence	

Point classes

Created (never classified)	8,860,932
----------------------------	-----------

Depth maps generation parameters

Quality	High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	3 minutes 2 seconds
Memory usage	1.93 GB

Point cloud generation parameters

Processing time	1 minutes 8 seconds
Memory usage	3.32 GB
Date created	2023:06:30 13:49:48
Software version	2.0.1.15986
File size	155.10 MB

System

Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	2.0.1 build 15986
OS	Windows 64 bit
RAM	31.95 GB
CPU	AMD Ryzen 7 1700 Eight-Core Processor
GPU(s)	NVIDIA GeForce GTX 1060 6GB

11.4 Apêndice D – Pedreira Iracemápolis (câmera inclinada)

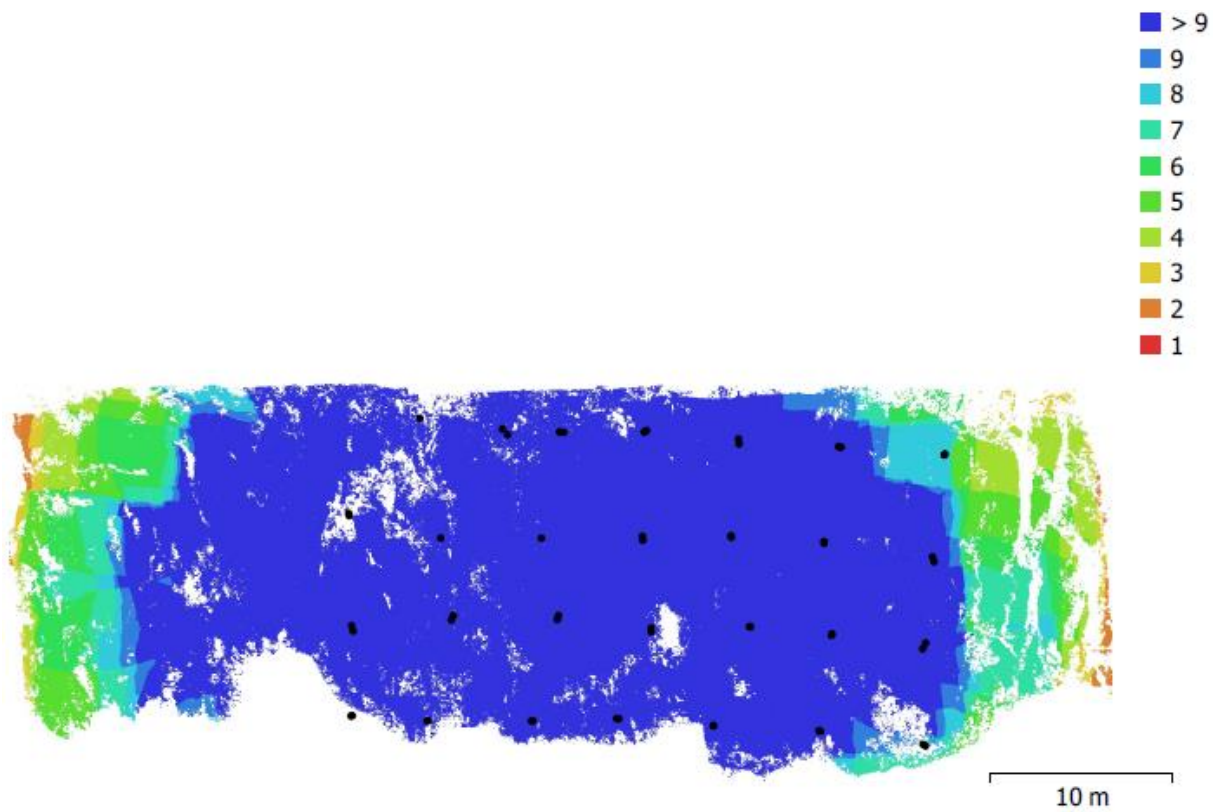
Relatório de Processamento

28 de julho de 2023



- **Dados de Pesquisa**

Figura C1. Localização das câmeras e sobreposição das imagens.



Número de Imagens	Estação de câmera
53	53
Altitude de voo	<i>Tie Points</i>
14.2 m	115.222
<i>Ground Resolution</i>	Projeção
6.19 mm/pix	337.544
Área de cobertura	Erro de reprojeção
962 m ²	0.774 pix

Tabela C1. Configurações de câmera.

Modelo de câmera	Resolução	Distância focal	Tamanho do pixel	Pré Calibração	Tipo de sensor
FC330 (3.61mm)	4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 μm	Não	Frame

- **Calibração da câmera**

Figura C2. Resíduos de imagens para FC330 (3.61 mm)

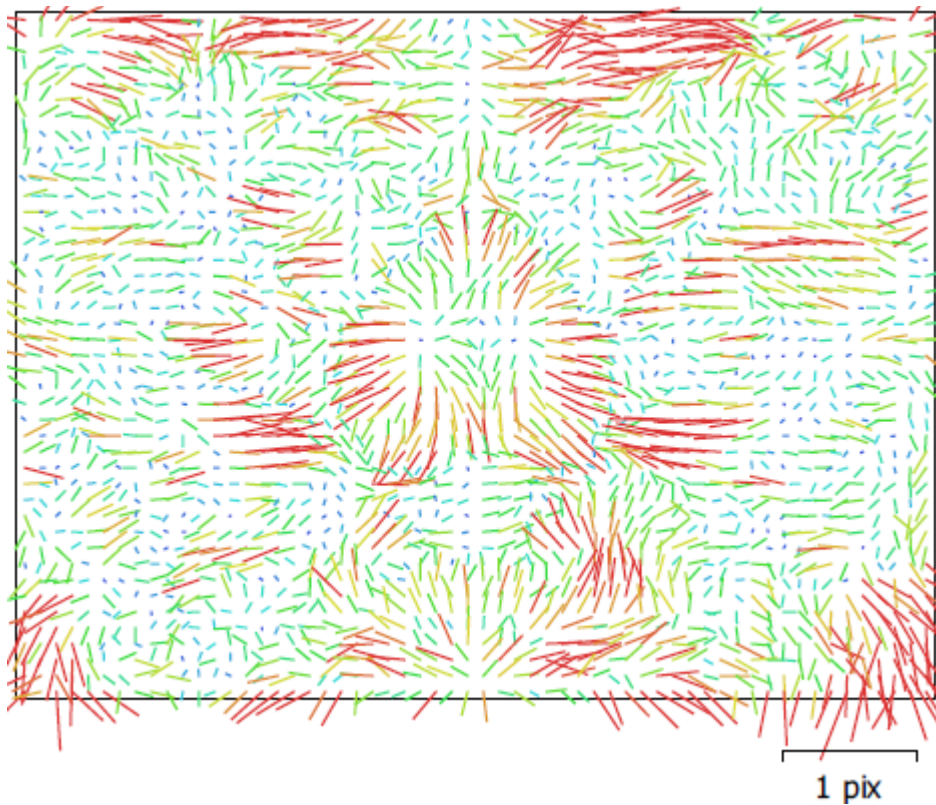


Tabela C2. Coeficientes de calibração e matriz de correlação.

	Valor	Erro	F	Cx	Cy	K1	K2	P1	P2
F	2341.32	0.1	1.00	-0.01	0.13	0.34	0.21	0.11	0.21
Cx	51.9994	0.21		1.00	0.03	0.13	-0.08	0.97	0.04
Cy	30.6821	0.15			1.00	0.09	-0.16	0.04	0.94
K1	-0.0139	$2.6e^{-5}$				1.00	-0.59	0.15	0.12
K2	0.0158	$1.8e^{-5}$					1.00	-0.06	-0.14
P1	0.0044	$2.2e^{-5}$						1.00	0.06
P2	0.0015	$1.5e^{-6}$							1.00

- **Localização das câmeras e erros estimados**

Figura C3. Localização das câmeras e erros estimados.



Tabela B3. Média dos erros de localização da câmera.

X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	XY(cm)	Erro Total (cm)
36.7094	66.307	44.2662	75.7904	87.7706

- **Parâmetros de processamento**

General

Cameras	53
Aligned cameras	53
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Tie Points

Points	115,222 of 145,826
RMS reprojection error	0.250035 (0.773717 pix)
Max reprojection error	0.756387 (40.1016 pix)
Mean key point size	2.77997 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	174.28 MB
Average tie point multiplicity	2.97251

Alignment parameters

Accuracy	Highest
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Key point limit per Mpx	0
Tie point limit	10,000
Exclude stationary tie points	Yes
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	37 seconds
Matching memory usage	1.72 GB
Alignment time	41 seconds
Alignment memory usage	74.07 MB
Date created	2023:07:28 19:19:48
Software version	2.0.1.15986
File size	11.33 MB

Depth Maps

Count	53
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	6 minutes 46 seconds
Memory usage	2.14 GB
Date created	2023:07:28 19:28:34
Software version	2.0.1.15986
File size	177.45 MB

Point Cloud

Points	9,412,633
--------	-----------

Point attributes

Position	
Color	3 bands, uint8
Normal	
Confidence	

Depth maps generation parameters

Quality	High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	6 minutes 46 seconds
Memory usage	2.14 GB

Point cloud generation parameters

Processing time	2 minutes 33 seconds
Memory usage	3.85 GB
Date created	2023:07:28 19:31:08
Software version	2.0.1.15986
File size	159.87 MB

System

Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	2.0.1 build 15986
OS	Windows 64 bit
RAM	31.95 GB
CPU	AMD Ryzen 7 1700 Eight-Core Processor
GPU(s)	NVIDIA GeForce GTX 1060 6GB