



## Metodologia de aquisição de dados estruturais em modelos digitais de afloramentos levantados por aeronave remotamente pilotada

Autores: Guilherme Gurgel Hallais, Diego Fernando Ducart

### Resumo

A identificação e análise estrutural são uns dos elementos principais do mapeamento geológico. O avanço tecnológico proporcionou novas ferramentas e técnicas de sensoriamento remoto que permitem a obtenção de dados estruturais. Dentre essas técnicas, a fotogrametria digital *Structure from Motion - Multi-View Stereo* (SfM-MVS), permite a modelagem 3D de afloramentos a partir do processamento de conjunto de imagens. Aeronaves remotamente pilotadas (RPA) com câmeras são ferramentas que permitem obter remotamente imagens em alta resolução de forma rápida e segura. A aplicação da fotogrametria com imagens obtidas por RPA oferece a oportunidade de gerar modelos digitais 3D de afloramentos em alta resolução. Os objetivos deste trabalho foram estabelecer uma metodologia na aquisição, processamento e pós-processamento para elaboração de modelos 3D e na extração dos dados estruturais. O levantamento foi realizado com um RPA DJI/Phantom 4 Pro em um afloramento de pedra localizada na cidade de Campinas. Nesta área foram coletadas imagens para a construção do modelo 3D, e foram realizadas medidas de dados estruturais em campo, para comparação com os obtidos no modelo. O método desenvolvido mostrou-se satisfatório, obtendo modelos 3D do afloramento com resolução de aproximadamente 1cm. No pós-processamento, o método fez possível identificar 9 famílias de estruturas planares com um total de 352 medidas. Comparando as medidas em campo com as medidas do modelo, observa-se semelhanças entre as concentrações de polos de planos nos quadrantes SW- NE e no eixo E-W.

Palavras-chave: VANT, modelo digital 3D de afloramentos, metodologia

### Introdução

Existem diversas técnicas de coleta de dados estruturais do afloramento rochoso em campo, dentre as quais o uso da bússola é a mais comum. Dados estruturais também podem ser obtidos através do processamento e análise adquiridos com dados de sensores remotos, que permitem a obtenção à distância e cobrir grande áreas.

Dentre a área do sensoriamento remoto, a aquisição de dados estruturais pode ser realizada em três escalas diferentes (Novo, 2001): (i) a partir do uso sensores orbitais, (ii) de sensores aerotransportados, e (iii) da coleta ao nível do afloramento. O avanço tecnológico das últimas décadas contribuiu nessa área com o desenvolvimento de novas técnicas, equipamentos e algoritmos computacionais. Um desses avanços foi o desenvolvimento da técnica de fotogrametria digital por *Structure from Motion - Multi-View Stereo* (SfM-MVS), que permite obter modelos digitais 3D a partir de uma série de imagens obtidas em diversas posições de um mesmo objeto alvo. Com seus primórdios na década de 1980 (Gruen et al., 1987), atualmente o trabalho de fotogrametria é

possível de ser realizado em diversos *softwares* como Agisoft Metashape, Pix4D, Visual SFM, etc.

As aeronaves remotamente pilotadas (RPA), popularmente conhecidas como drones, vem sendo usados em diferentes estudos geológicos, entre eles na análise estrutural (Vollgger et al., 2016; Bemis et al., 2014; Sayab et al., 2018). Vollgger (2016) mapeou dobras e fraturas em Cape Liptrap e Cape Paterson na Austrália. Sayab (2018) levantou planos de fraturas em uma pedra no sudoeste de Finlândia. No entanto, esses trabalhos não apresentam por completo a metodologia usada tanto no levantamento com o RPA, quanto do pós-processamento do modelo 3D do afloramento.

### Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste: (i) elaboração do modelo digital 3D do afloramento, pelo método de fotogrametria digital (SfM-MVS) com imagens de alta resolução obtidas com o RPA; (ii) desenvolvimento de uma metodologia para aquisição de dados de estruturas planares com o uso do software

CloudCompare; e (iii) análise do método desenvolvido através da comparação entre os dados levantados em campo e no modelo 3D.

### Contexto geológico e localização

A pedraira Basalto, local onde foi realizado o trabalho, localiza ao sul da cidade Campinas, na Zona de Cisalhamento Campinas (ZCC). O afloramento consiste de um talude de 14 m de altura e 40 m de comprimento. Ocorre na pedraira hornblenda-biotita gnaisses milonitizado.

Segundo o mapa geológico de Campinas (Teixeira, 2009), o município é constituído por

diabásios e basaltos da Formação Serra Geral e rochas sedimentares do Subgrupo Itararé a oeste; granitos proterozoicos das suítes graníticas Morungaba e Jaguariúna e rochas metamórficas do Complexo Itapira a leste; milonitos, gnaisses e xistos associados a Zona de Cisalhamento Campinas (ZCC) e Zona de Cisalhamento Valinhos (ZCV) de direção NE-SW, e depósitos quaternários.

### Métodos e materiais

O trabalho foi dividido nas seguintes etapas: (i) campo, (ii) processamento, (iii) pós-processamento, e (iv) análise dos dados (Fig. 1).

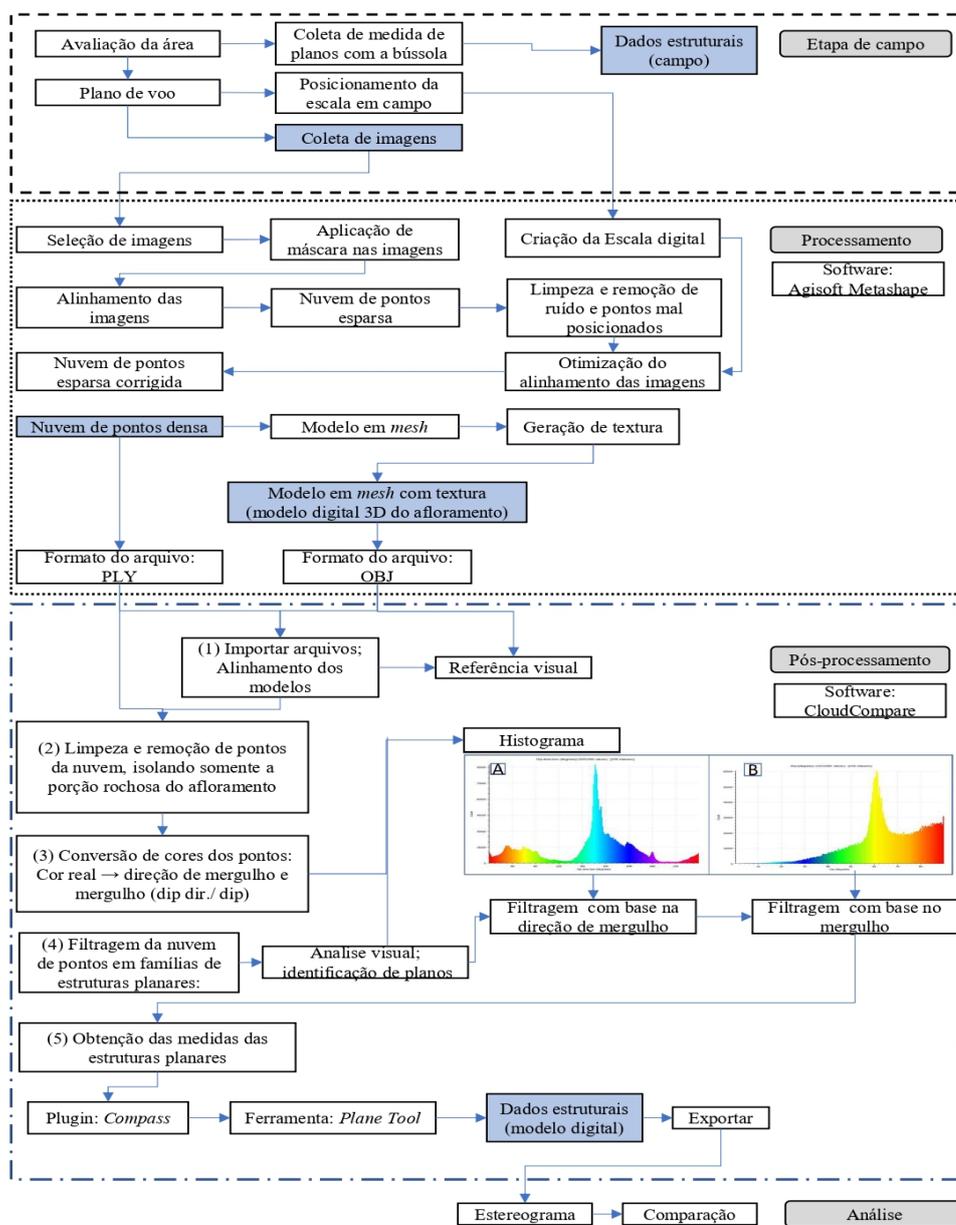


Figura 1. Fluxograma simplificado dos métodos para o levantamento das imagens (etapa de campo), geração do modelo digital do afloramento (processamento), extração dos dados estruturais (pós-processamento) e análise dos dados extraídos (análise).

### (i) Etapa de Campo

A etapa de campo possui dois objetivos principais: levantamento das imagens com o RPA, e adquirir medida de planos do afloramento.

O levantamento das imagens inicia com um estudo prévio da área a ser sobrevoada, avaliando o espaço e os potenciais riscos ao voo da aeronave. Isso auxilia ao planejamento do voo, a rota de voo a ser usada e estipular o tempo de voo necessário para o trabalho.

No trabalho foi usado uma escala em formato em “L” posicionado ao chão próximo ao afloramento, com um dos braços alinhado para o norte. A escala serviu para otimizar o modelo 3D, conferir dimensões com um objeto de tamanho conhecido e conferir a orientação do modelo.

O RPA DJI/Phantom 4 Pro foi usado na aquisição das imagens. Foi realizado um voo no manual com um padrão de linha de voos horizontais paralelos a talude em diversas alturas espaçadas em 2 metros cada. Com a câmara na horizontal, apontando diretamente ao afloramento ocasionalmente oblíqua para cobrir determinadas partes. A sobreposição das imagens foi maior do que os 80% sugerido pelo manual do por conta da baixa velocidade de voo. Foi obtido um total de 707 imagens.

Foi realizada a medição de planos no afloramento, ao longo de 12 metros, com o uso de tablet e aplicativo FieldMove. Esses dados serviram para comparar com os dados obtidos no modelo 3D

### (ii) Processamento

O processamento foi realizado com o software Agisoft Metashape. O programa realiza a reconstrução de modelos digitais 3D através da técnica de SfM-MVS, aplicados por uma série de algoritmos.

Por conta da sobreposição demasiadamente alta das imagens coletadas, foram realizados diversos testes. A partir dos resultados dos testes, foram selecionados 190 imagens para serem processadas. Uma máscara foi aplicada nas imagens, selecionando a porção de interesse onde foram realizadas as medidas de campo. Uma vez com as imagens tratadas, foi gerada a nuvem de pontos esparsa através do alinhamento das imagens. Nessa etapa o programa analisa cada imagem e busca pontos semelhantes e consistente entre as fotos, conferindo coordenadas a esses pontos em um espaço 3D.

A partir da nuvem de pontos esparsa, foi realizada uma limpeza dos pontos considerados ruidosos e mal posicionados na nuvem. O modelo foi reajustado com as medidas e orientações conhecidas

da escala utilizada no campo. Realizados os ajustes, a nuvem foi otimizada em uma nova nuvem com pontos mais acurados. Sequentemente, foi gerada a nuvem de pontos densa, que serviu para a geração do modelo em *mesh*, correspondendo a uma malha de polígonos com os pontos como vértices. Finalizando, foi gerada a textura do modelo em *mesh* com as imagens, conferindo ao modelo uma aparência mais realista.

### (iii) Pós-processamento

No pós-processamento, a extração dos dados estruturais do modelo 3D foi realizado no software CloudCompare. Cloudcompare é um software gratuito e open-source, usado no processamento de nuvens de pontos 3D. Possui uma série de ferramentas de edição, comparação, e medição de dados da nuvem de pontos. Também possui *plugins* que permitem a extração de dados estruturais, os quais são: *Compass* e *FACETS*. O *Compass* possui a ferramenta *Plane Tool*, usada para medir orientações de superfícies planas da nuvem de pontos, e a ferramenta *Trace Tool*, usado para extrair medidas de planos com base na linha de contado entre as rochas. O *FACETS* é uma ferramenta de extração de medidas de planos automática. Ambas ferramentas funcionam com o princípio do método dos mínimos quadrados na posição de um plano digital de referência que será ajustado entre os pontos coplanares de uma determinada seção da nuvem. Com base no valor das normais dos pontos é determinada a direção de mergulho e o mergulho do plano.

O programa somente realiza as operações como a extrações de dados estruturais e outras operações na nuvem de pontos, não realizando as mesmas no *mesh*. Apesar disso foi usado ambos a nuvem de pontos e o *mesh*. Portanto, as operações foram conduzidas na nuvem. Porém, a nuvem carece de resolução textural. Por conta da baixa densidade de pontos na tela com o incremento do zoom é difícil de visualizar detalhes. Para corrigir esse problema o *mesh* é usado como referência visual e sua resolução textural. O objetivo desse método é separar porções da nuvem que contêm um conjunto de pontos coplanares em seções de mesma atitude após serem filtradas com base no seu azimute e mergulho. O método usa da interpretação visual para a identificação dos planos.

Inicia importando a nuvem de pontos e o modelo em *mesh*. Com ambos modelos alinhados, ocupando a mesma posição, é isolado a porção rochosa da nuvem de pontos, eliminando todo resto (chão, vegetação) para que somente a rocha seja considerada na extração dos planos (Fig. 2).

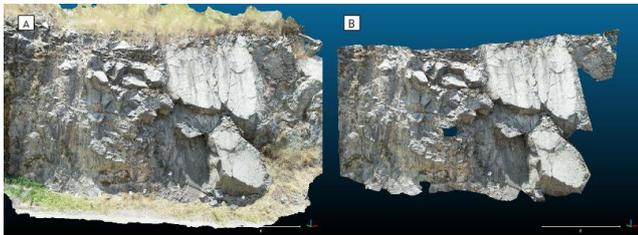


Figura 2. Nuvem de pontos antes (A) e depois (B) do isolamento da porção rochosa.

Originalmente a nuvem de pontos possui pontos com cor real para facilitar a identificação dos planos. A cor dos pontos foi convertida para valores da direção de mergulho e mergulho. Dessa forma a nuvem de pontos ganha uma nova coloração onde cada cor corresponde a uma direção, de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , ou mergulho, de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . Após a conversão das cores, as nuvens ganham histogramas representando a concentração de pontos a cada orientação, onde os picos representam associações a planos, sendo os maiores picos estão para superfícies planas grandes e os picos menores a planos menores. Com o ajuste dos limites inferior e superior do histograma é possível destacar somente uma seção da nuvem, dessa forma filtrando planos com determinada atitude.

Foi realizada a filtragem da nuvem na determinação de planos com a mesma atitude. Primeiramente filtrou com base na direção de mergulho, e a partir dessa seleção filtrou planos com base no mergulho da camada (Fig. 3).

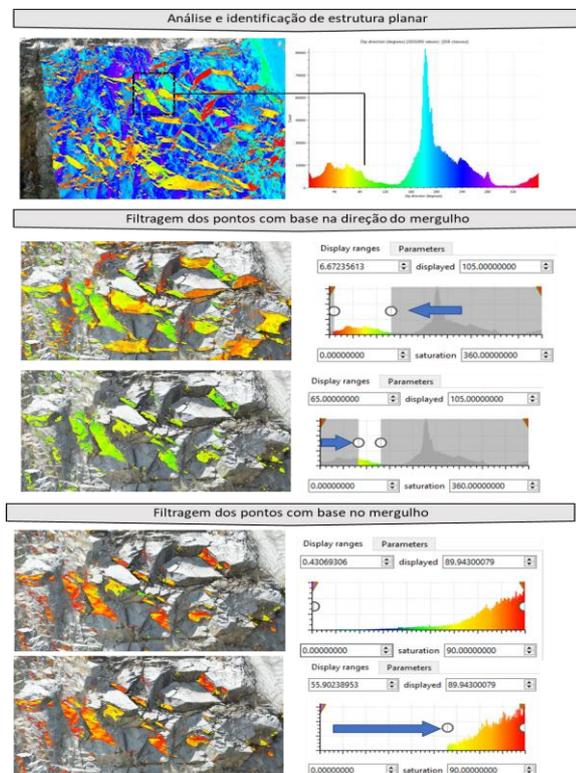


Figura 3. Método de filtragem da nuvem de pontos na determinação de planos.

A partir das porções da nuvem filtrada em planos de mesma atitude, foi empregada a ferramenta *Plane Tool*, do plugins *Compass*. A obtenção das medidas estruturais do plano é simples, com a ferramenta ativada, o cursor do mouse vira um círculo, no qual com o clique em uma superfície a atitude do plano é obtida instantaneamente (Fig. 4). O círculo serve para determinar a atitude somente dos pontos coplanares contidos dentro dele, onde é possível ajustar o seu diâmetro para analisar superfícies de diferente tamanhos. Essa coleta de dados dos planos é repetida em cada porção da nuvem de pontos filtrada anteriormente. Nessa etapa também foi conferida a orientação e as dimensões da escala para averiguar o modelo.



Figura 4. Atitudes das superfícies filtradas obtidas com o *Plane Tool*

#### (iv) Análise dos dados

Terminada a coleta dos dados estruturais, as medidas foram exportadas em arquivos CSV, para ser lidas por programas de confecção de estereogramas. Foi usado o software *Stereonet* para confeccionar os estereogramas, calcular o contorno de densidade dos pontos e realizar as comparações entre os dados de campo e do modelo digital.

### Resultados e Discussão

#### (I) Etapa de Campo

A etapa de campo ocorreu sem dificuldades. O levantamento das imagens com o RPA foi executado em pouco tempo desde a preparação do equipamento e a execução do voo. Foram levantadas 707 imagens. O maior tempo gasto no trabalho de campo foi com o levantamento das medidas em campo com o tablet, totalizando 34 medidas.

A maior dificuldade em relação ao voo e a captura das imagens foi garantir que as imagens possuíssem uma sobreposição elevada o suficiente para o processamento. O que levou ao voo ser executado tomando mais imagens que o necessário. O imageamento poderia ser aperfeiçoado com a obtenção de um número menor de imagens e com o uso correto da sobreposição através de um voo mais próximo ao afloramento ou conhecendo a posição exata para tomar cada imagem, mantendo o mesmo equipamento.

## (II) Processamento

O processamento resultou em um modelo de nuvem de pontos densa com aproximadamente 7 milhões de pontos e um modelo em *mesh* com 1,5 milhões de faces. Ambos modelos possuem uma resolução aceitável permitindo ver detalhes de até 1cm. O processamento foi limitado pelo desempenho do computador para obter modelos em mais alta resolução.

## (III) Pós-processamento

Apesar do CloudCompare não ser um software exclusivo para o uso geológico, ele se mostrou bem útil para a tarefa de extração de medidas de planos. O método atendeu as expectativas, facilitando a identificação dos planos, organização dos dados e extração das medidas. Com base na comparação da escala de campo e do modelo, houve uma diferença milimétrica no tamanho, e uma diferença da orientação menor de 2° na orientação.

Foi possível identificar um total de 22 famílias de faces, onde somente 9 apresentaram características de estruturas planares. Dessas 9 famílias, totalizam 352 medidas.

## (IV) Análise dos dados

Comparando os estereogramas das medidas de campo com as medidas do modelo observam-se semelhanças entre as concentrações dos planos dos quadrantes NE, SW e no eixo E-W (Fig. 5).

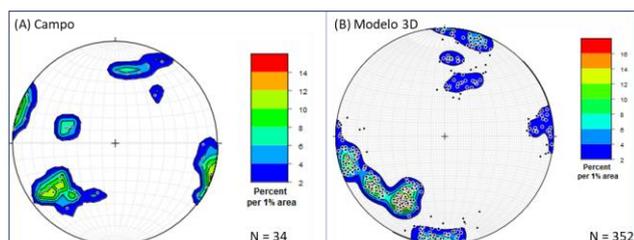


Figura 5. Polos dos planos das medidas em Campo e no modelo

## Conclusão

- RPA é uma boa ferramenta para o levantamento de imagens, na escala de afloramento, para trabalhos de fotogrametria. Porém para voo manual é necessário um detalhado plano de voo.
- Os modelos obtidos no processamento atenderam as expectativas, possuindo escala e orientação com diferença milimétrica e menor de 2°, respectivamente, com as medidas reais.
- O método desenvolvido no pós-processamento facilitou a identificação, organização e extração dos dados estruturais da nuvem de pontos.
- A comparação dos dados de campo com os dados do modelo mostrou semelhanças, com concentrações dos polos de planos nos quadrantes NE, SW e no eixo E-W.

## Referências

NOVO, E. M. L. M.; PONZONI, F J. Introdução ao sensoriamento remoto. Instituto Nacional, 2001.

GRUEN, A. W; BALTSAVIAS, E. P. High-precision image matching for digital terrain model generation. *Photogrammetria*, 1987. 42(3), 97-112p.

VOLLGGER, S. A., & CRUDEN, A. R. Mapping folds and fractures in basement and cover rocks using UAV photogrammetry, Cape Liptrap and Cape Paterson, Victoria, Australia. 2016. *Journal of Structural Geology*, 85, 168-187.

Bemis, S. P., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M. R., Akciz, S., Thiele, S. T., & Bangash, H. A. Ground-based and UAV-based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. 2014. *Journal of Structural Geology*, 69, 163-178.

Sayab, M. Aerden, D. Paananen, M. Saarela, P. Virtual Structural Analysis of Jokisivu Open Pit Using ‘Structure-from-Motion’ Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Photogrammetry: Implications for Structurally-Controlled Gold Deposits in Southwest Finland. 2018. *Remote Sens.* 2018, 10, 1296

TEIXEIRA, A. L., DEL MONTE, M e SILVA, R, E. Mapa Geológico do Município de Campinas e Mapa de Pontos Geológicos e Geomorfológicos do Município de Campinas.,2009. São Paulo.