

17º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental

MAPEAMENTO ESTRUTURAL DE MACIÇOS ROCHOSOS COM BASE EM IMAGENS DE VANT

Marcos Eduardo Hartwig ¹; Garion Guidotti de Souza dos Santos ²

Resumo – Tendo em vista algumas limitações relacionadas a amostragem de planos estruturais por meio de métodos tradicionais de levantamento de campo para fins geotécnicos (e.g. scanlines), testou-se, no presente estudo, a técnica de segmentação de nuvem de pontos 3D derivada de imagens aéreas de veículos aéreos não-tripulados (VANTs). Esta técnica permite a extração semi-automática de planos estruturais. Para tanto, comparou-se os dados estruturais obtidos em campo com os resultados obtidos por meio dos algoritmos Kd-tree e Fast-Marching implementados no *software* livre CloudCompare (plugin Facets). A área de estudo compreende um corte de estrada escavado em paragneisses de idade Neoproterozóica, localizado no km 5 da ES-482 (porção sul do Estado do Espírito Santo). Trata-se de um maciço rochoso pouco fraturado, cuja principal estrutura geológica corresponde ao bandamento gnáissico. Os resultados permitem afirmar que os levantamentos estruturais tradicionais ainda não podem ser totalmente substituídos pelo mapeamento remoto por VANT para o caso de maciços rochosos pouco fraturados.

Abstract – In view of some restrictions posed by field survey of structural planes for geotechnical purposes (e.g. scanlines), we have tested the technique of segmentation of 3D point cloud derived from images obtained by Uncrewed Aerial Vehicles - UAVs. This method allows the semi-automatic extraction of structural planes of rock slopes. For this purpose, we have compared the results obtained using the Kd-Tree and Fast-Marching algorithms for point cloud segmentation implemented in the CloudCompare *software* (Facets plugin) with fieldwork structural data. The study area comprises a rock slope excavated in Neoproterozoic paragneisses located at km 5 of the road ES-482 (southern portion of the State of Espírito Santo). The main geological structure mapped corresponds to the gneissic banding. The results have shown that traditional fieldwork structural surveys cannot be entirely replaced by drone imagery for the characterization of poorly fractured rock masses.

Palavras-Chave – descontinuidades geológicas; drones; *structure-from-motion*; taludes.

¹ Geól., Professor Doutor, Universidade Federal do Espírito Santo, (11) 99515-1814, marcos.hartwig@ufes.br

² Geól., Universidade Federal do Espírito Santo, (27) 99940-6971, garioguidotti@hotmail.com

1. INTRODUÇÃO

Usualmente, os levantamentos estruturais de maciços rochosos para fins geológico-geotécnicos baseiam-se na utilização de bússola para a determinação das atitudes de planos estruturais. Posteriormente, estas são processadas por meio de estereogramas para a identificação de famílias (Davis & Reynolds, 1996). Uma das principais técnicas de amostragem em campo de estruturas geológicas é a técnica das *scanlines* (Herget, 1977). Contudo, estes levantamentos são lentos e estão concentrados na base da superfície exposta de taludes rochosos, não permitindo uma amostragem completa do maciço, especialmente em locais onde há risco de quedas de blocos ou em locais de difícil acesso.

Recentemente, a técnica de segmentação de nuvem de pontos 3D geradas a partir do processamento de imagens aéreas obtidas por veículos aéreos não tripulados – VANTs (ou popularmente drones), têm representado uma alternativa valiosa aos métodos de levantamento estrutural tradicionais (Giordan *et al.* 2020; Zimmerer, 2018; Tung *et al.* 2018; Lyons-Baral, 2017). Esta técnica permite uma amostragem mais ampla e rápida e a obtenção de uma grande densidade de medidas estruturais.

Tendo isso em vista, o objetivo desse trabalho foi avaliar as potencialidades das imagens de VANT para o mapeamento estrutural de um talude rochoso exposto no km 5 da ES-482, localizado no município de Cachoeiro de Itapemirim, região sul do estado do Espírito Santo (Figura 1). Para tanto, comparou-se os resultados de campo com os resultados obtidos por meio dos algoritmos Kd-tree e Fast-Marching implementados no *software* livre CloudCompare (plugin Facets), ambos utilizados para a extração automática de planos estruturais (Dewez *et al.* 2016). O talude de corte em apreço foi selecionado devido ao fato de apresentar uma única família de descontinuidades dominante e persistente, o que facilita a avaliação dos resultados da técnica adotada no presente estudo. Adicionalmente, o mesmo possui fácil acessibilidade.

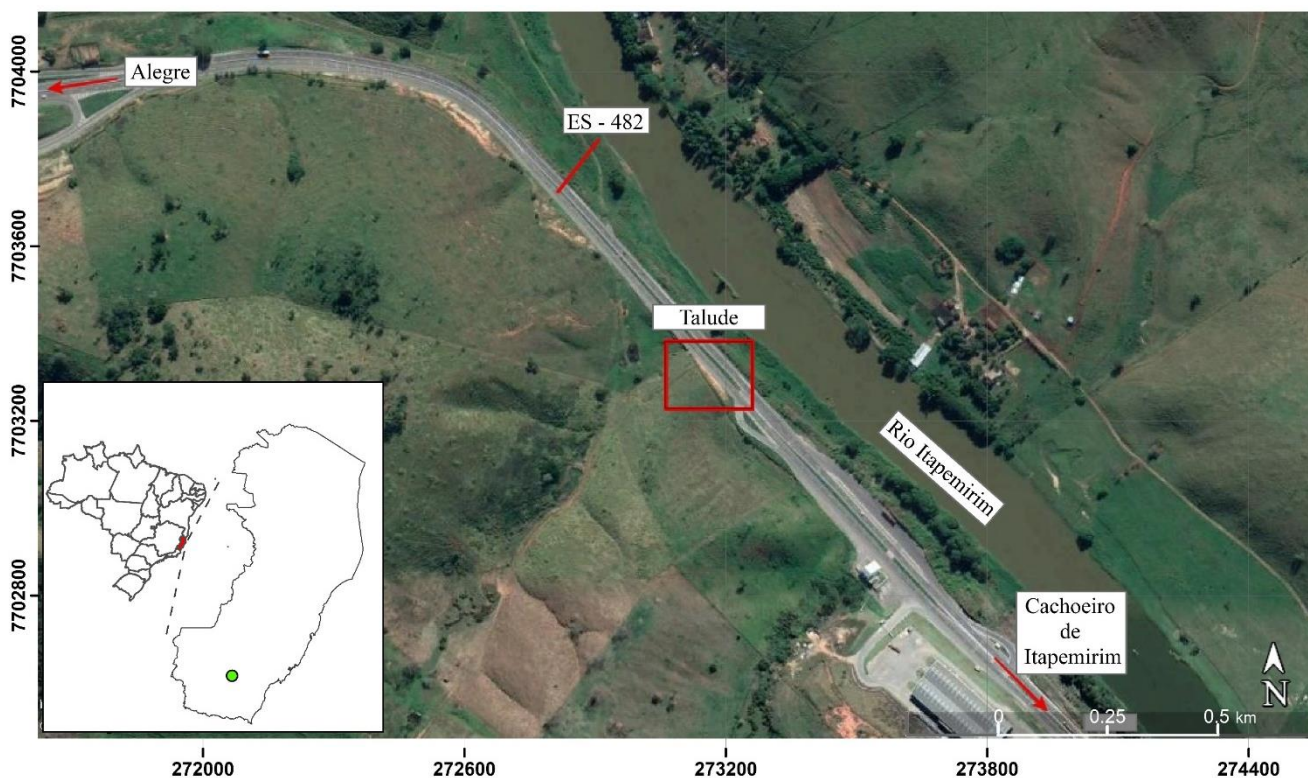


Figura 1. Localização da área de estudo no km 5 da ES-482.

2. GEOLOGIA DO TALUDE ESTUDADO

Geologicamente, a região está inserida no Complexo Paraíba do Sul de idade Neoproterozóica. Esta unidade compreende principalmente gnaisses, rochas calcissilicáticas, mármores, quartzitos e

anfíbolitos. Vieira (1997) dividiu o Complexo Paraíba do Sul na região sul do Estado do Espírito Santo em nove unidades de mapeamento: Pps1 a Pps9. A área de estudo encontra-se sobre a unidade Pps8, que compreende anfíbólio biotita gnaisses com intercalações de anfíbolitos, quartzitos, rochas calcissilicáticas e gnaisses aluminosos com estrutura migmatítica dobrada.

O talude de corte estudado possui aproximadamente 38 m de extensão, altura de 10 m e atitude 45°/80. Está constituído exclusivamente por um biotita granada gnaisse de granulação fina a grossa, com porções pegmatíticas, moderadamente alterado. É uma rocha fortemente orientada com bandamento descontínuo e de espessura variável (Figura 2). As bandas máficas são constituídas de minerais máficos e biotitas de granulação fina e as bandas félsicas de quartzo, feldspato e granada milimétrica. A porção superior do talude está recoberta por uma camada de solo residual avermelhada de aproximadamente 2 m (Figura 2).

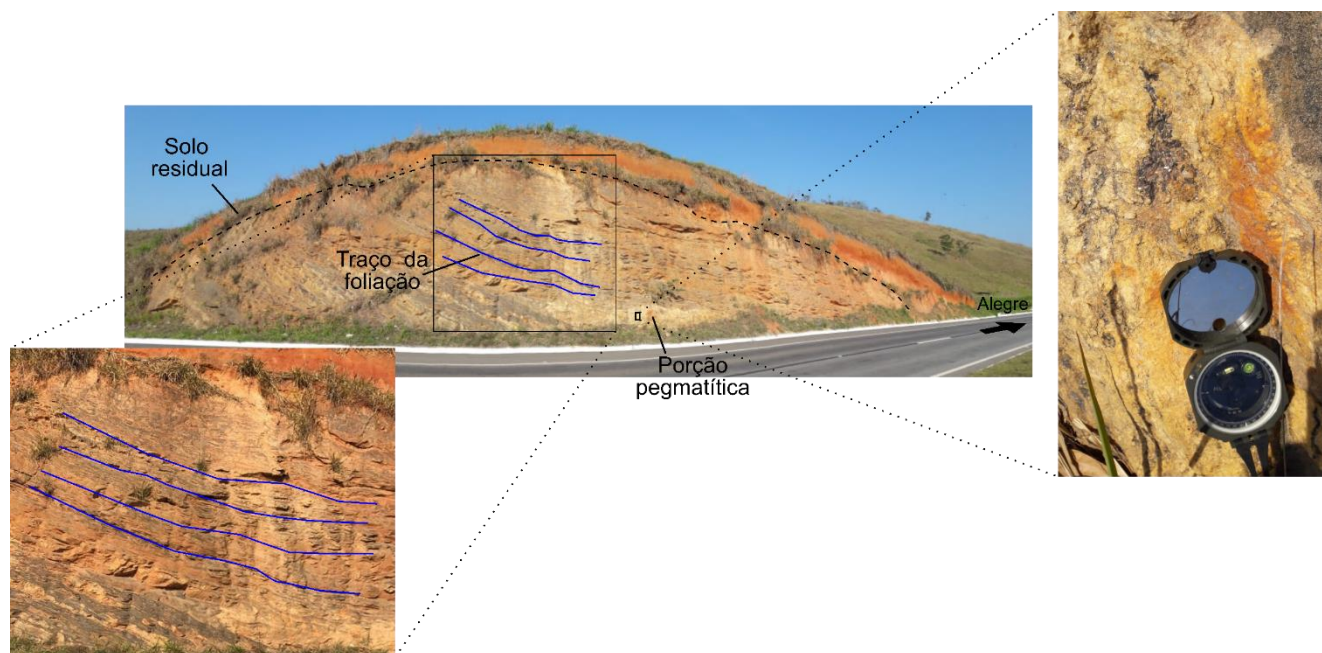


Figura 2. Aspectos geológicos do talude estudado. À esquerda, detalhe da foliação destacada em azul e à direita, detalhe das porções pegmatíticas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os seguintes materiais foram utilizados no presente trabalho:

- Drone Phantom 4 Standard (DJI);
- *Software* computacional WebODM;
- *Software* computacional DIPS (Rockscience);
- *Software* computacional CloudCompare.

A metodologia adotada no presente trabalho seguiu três etapas: (a) levantamento estrutural de campo; (b) sobrevoo de VANT, geração e segmentação da nuvem de pontos 3D; e (c) comparação dos resultados.

A técnica de campo denominada como *scanline* (ou linha de varredura) é um método de levantamento estrutural consagrado, utilizado por diversos pesquisadores (Hartwig e Moreira, no prelo), que consiste em medir a atitude de todos os planos estruturais que interceptam uma linha esticada arbitrariamente ao longo da face de um talude. Recomenda-se que a amostragem dos planos estruturais seja realizada ao longo de *scanlines* com diferentes orientações para se evitar amostras tendenciosas. Posteriormente, estes dados são processados para a geração de estereogramas

Schmidt-Lambert. No presente trabalho, os dados estruturais de campo foram levantados a partir de uma linha de varredura disposta na porção inferior do talude e todas as estruturas geológicas passíveis de leitura foram medidas com o auxílio de bússola. Estes dados de campo foram posteriormente processados no *software* DIPS (Rockscience). Utilizou-se no presente estudo a nomenclatura de representação de medidas estruturais rumo de mergulho/mergulho.

Para a aquisição das imagens aéreas utilizou-se um drone quadricóptero modelo Phantom 4 Standard da fabricante chinesa DJI. Para a calibração do drone e execução do voo utilizou-se o *software* DJI GO 4 (DJI). O sobrevoo de VANT foi realizado no modo manual com o máximo de recobrimento. Foram adquiridas um total de 52 fotos, com câmera de 12,4 megapixels na posição horizontal e afastadas a aproximadamente 6 m do talude. O sobrevoo foi realizado no dia 18 de setembro de 2020 às 08h00 e durou aproximadamente 20 min. O horário do sobrevoo foi baseado nas condições de iluminação do talude. As imagens de drone foram processadas no *software* WebODM para a geração da nuvem de pontos 3D que utiliza a técnica aerofotogramétrica *structure-from-motion* (Westoby *et al.* 2012). Cada ponto da nuvem de pontos é definido por coordenadas X-Y-Z únicas (Figura 3). Estas coordenadas são usadas como insumo para a extração dos planos estruturais. No presente estudo, não foram utilizados pontos de controle de campo (GCPs) no processamento das imagens de drone.

O arquivo da nuvem de pontos 3D foi carregado no *software* CloudCompare para a determinação da atitude e classificação (por orientação) dos planos estruturais. Para tanto, utilizou-se o plugin FACETS (Dewez *et al.* 2016). O FACETS consiste na segmentação da nuvem de pontos a partir de critérios de coplanariedade para a identificação de planos (facets). Dois algoritmos para a segmentação da nuvem de pontos estão disponíveis no plugin FACETS: Kd-Tree e Fast-Marching. Diferentes combinações de parâmetros foram testadas para ambos os algoritmos, no intuito de se avaliar a qualidade e consistência dos resultados. Anteriormente ao processamento da nuvem de pontos para a extração dos planos estruturais, procedeu-se com o recorte da nuvem de pontos, excluindo-se as áreas que constituem o regolito, a ES-482 e a porção acima do talude que está recoberta com vegetação (pasto).

Finalmente, os resultados obtidos por meio da segmentação da nuvem de pontos 3D foram comparados com os resultados obtidos por meio do levantamento de campo.



Figura 3 – Nuvem de pontos 3D coloridos e recortada para o talude estudado (km 5 da ES-482). Unidade em metros.

4. RESULTADOS

4.1. Levantamento de campo

Foram medidos 20 planos estruturais, sendo 15 referentes a planos de foliação (bandamento gnáissico) e 5 a planos de fratura (Figura 4). Conforme esta figura, observa-se que a foliação apresenta atitude média de 030/29 e as fraturas distribuem-se em três famílias, com atitudes médias de 211/37 (Família 1), 135/80

(Família 2) e 280/81 (Família 3), respectivamente. Os planos de fraturas estão dispersos na face do talude de forma heterogênea e apresentam persistência < 1,0 m.

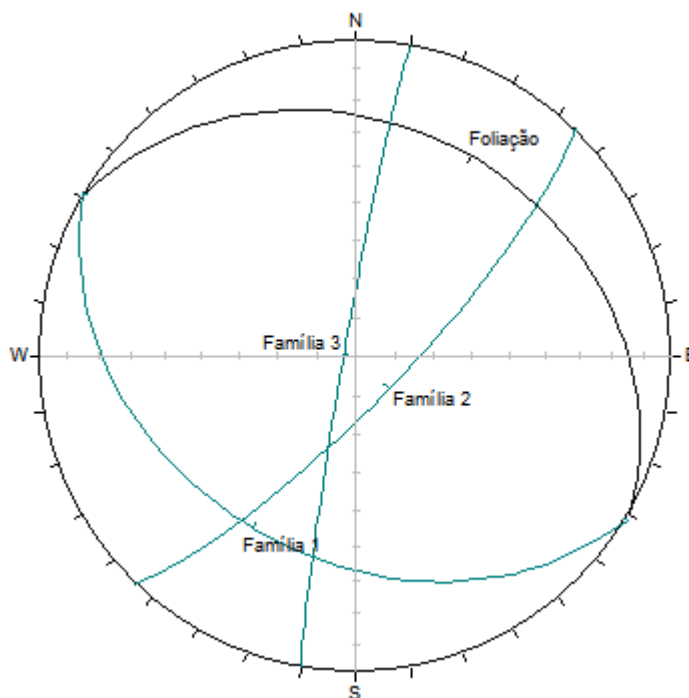


Figura 4 – Estereograma da foliação e das famílias de fraturas. Diagrama Schimidt-Lambert, hemisfério inferior.

4.2. Levantamento por drone

4.2.1. Algoritmo Kd-Tree

A Figura 5 retrata o resultado da segmentação da nuvem de pontos obtido por meio do algoritmo Kd-Tree. Os parâmetros utilizados estão sintetizados conforme a Tabela 1. Foram identificados pelo algoritmo um total de 4.096 planos. Apesar do elevado número de planos de classificação identificados, os mesmos não representam necessariamente estruturas geológicas, mas qualquer plano (geológico ou não) existente na face do talude. Como os planos de foliação possuem espaçamento muito apertado, para que pudessem ser mapeados e visualizados nas imagens, a nuvem de pontos precisou ser excessivamente segmentada, resultando em um elevado número de planos.

O traço da foliação está indicado na figura pelos planos na cor azul. Os demais planos identificados pelo algoritmo não possuem significado geológico, tendo em vista que o maciço é atravessado quase que exclusivamente por uma única família de discontinuidades (planos de foliação).

Tabela 1 – Parâmetros utilizados no algoritmo Kd-Tree.

Parâmetros	Valores
Max Angle	20
Max Relative distante	1
Max distante @99%	0,001
Min points per facet	250
Max edge length	0,27

O estereograma da Figura 6 mostra os planos médios da foliação obtidos por meio do algoritmo Kd-Tree ($S_n = 042/62$) e por meio do método das *scanlines* ($S_n = 030/29$). Conforme pode-se observar, o sentido dos planos é bastante similar. Contudo o mergulho do plano médio da foliação determinado por meio do algoritmo Kd-Tree é significativamente maior que o mergulho do plano médio da foliação determinado a partir do levantamento de campo.

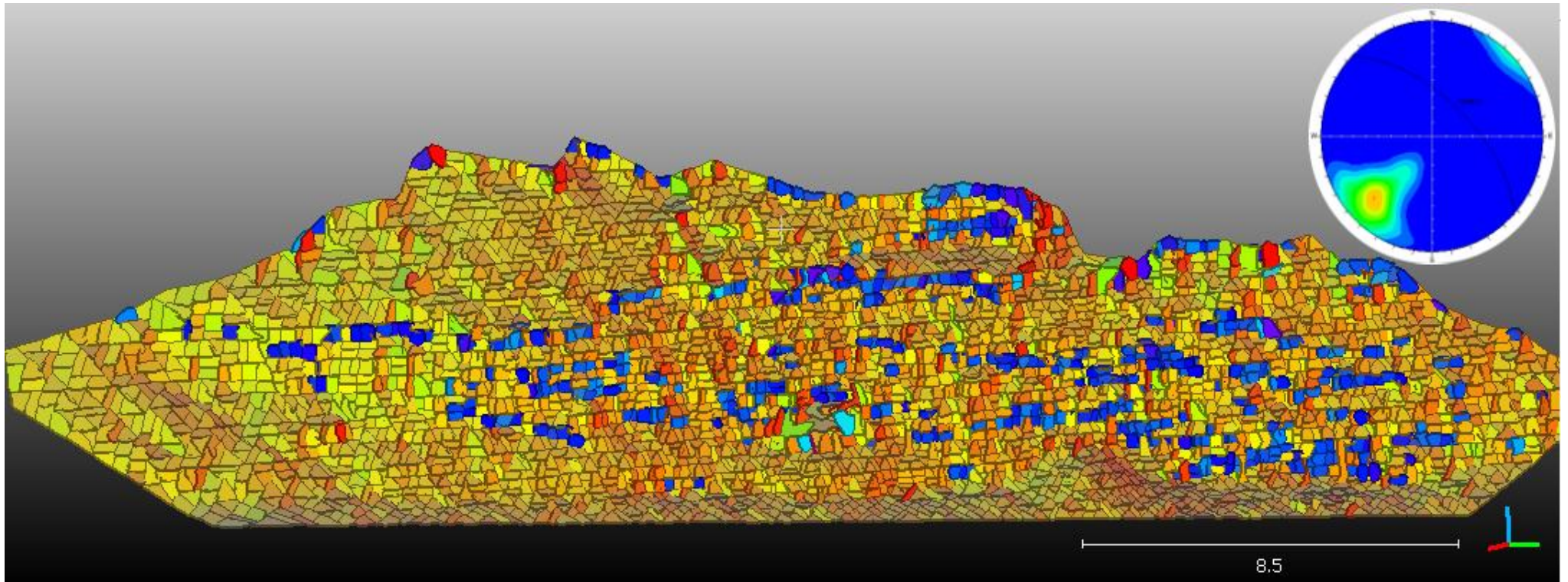


Figura 5. Resultados da segmentação da nuvem de pontos pelo algoritmo Kd-Tree. As cores indicam as famílias dos planos identificadas pelo algoritmo. O estereograma no canto superior direito, indica o plano médio da foliação (número de planos = 4.096).

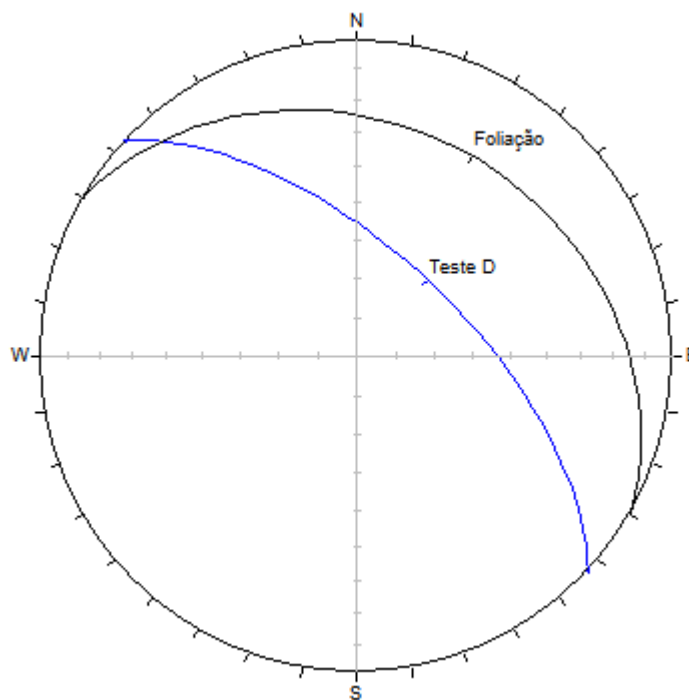


Figura 6. Estereograma dos planos médios da foliação determinados por meio do algoritmo Kd-Tree (círculo máximo na cor azul) e por meio do levantamento de campo (círculo máximo na cor preta).

4.2.2. Algoritmo Fast-Marching

A Figura 7 retrata o resultado da segmentação da nuvem de pontos obtido por meio do algoritmo Fast-Marching. Os parâmetros utilizados estão sintetizados conforme a Tabela 2. Foram identificados por este algoritmo um total de 9.843 planos.

O traço da foliação está indicado na figura pelos planos na cor azul. Os demais planos identificados pelo algoritmo não possuem significado geológico.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados no algoritmo Fast-Marching.

Parâmetros	Valores
Octree level	7
Max distante @99%	0,001
Min points per facet	3
Max edge length	0,27

O estereograma da Figura 8 mostra os planos médios da foliação obtidos por meio do algoritmo Fast-Marching ($S_n = 043/62$) e por meio do método das *scanlines* ($S_n = 030/29$). Conforme pode-se observar, o sentido dos planos é bastante similar. Contudo o mergulho do plano médio da foliação determinado por meio do algoritmo Kd-Tree é significativamente maior que o mergulho do plano médio da foliação determinado a partir do levantamento de campo.

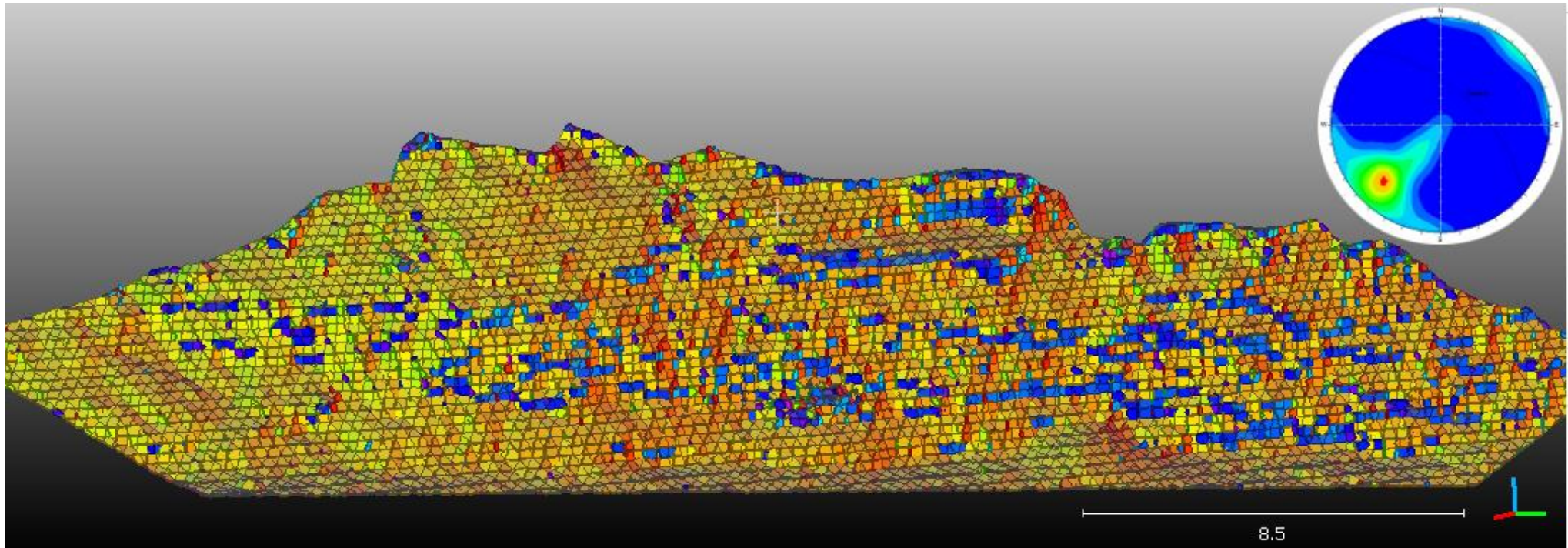


Figura 7. Resultado da segmentação da nuvem de pontos obtido pelo algoritmo Fast-Marching. As cores indicam as famílias dos planos identificadas pelo algoritmo. O estereograma no canto superior direito da imagem indica o plano médio da foliação (número de planos = 9.843).

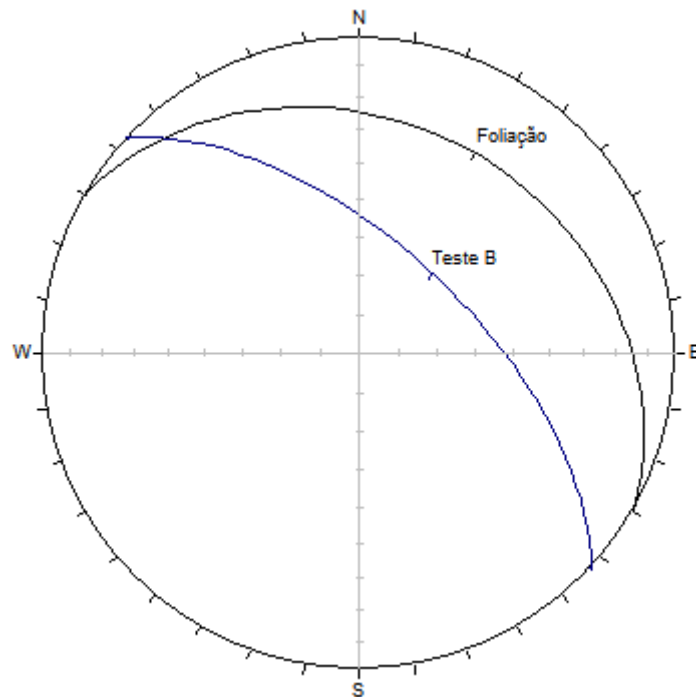


Figura 8. Estereograma dos planos médios da foliação determinados por meio do algoritmo Fast-Marching (círculo máximo na cor azul) e por meio do levantamento de campo (círculo máximo na cor preta).

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo desse trabalho foi o de avaliar imagens aéreas de drone para o mapeamento estrutural semi-automático de um corte de estrada escavado em paragnais pouco fraturados do Complexo Paraíba do Sul. Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir:

- Os planos de fraturas não foram determinados pelos algoritmos testados. Isso pode ser devido a pequena quantidade de planos, orientação espacial e baixa persistência dos mesmos;
- Os planos de foliação (bandamento gnáissico) do talude estudado não foram completamente mapeados por meio da segmentação da nuvem de pontos. Neste caso, é recomendável a interpretação geológica visual das próprias imagens de drone de alta resolução espacial;
- O resultado obtido por ambos os algoritmos (sentido e classificação dos planos) é bastante similar, assim como a diferença na geometria dos planos, gerados na segmentação da nuvem de pontos, é pouco significativa;
- O mergulho do plano da foliação gerado pela técnica de segmentação de nuvem de pontos é maior que o mergulho da foliação determinado a partir dos dados de campo (Figura 6 e 8);
- Os algoritmos testados na segmentação da nuvem de pontos 3D resultaram na identificação de famílias de planos sem qualquer significado geológico;
- O número de planos determinados por ambos os algoritmos a partir da segmentação da nuvem de pontos foi bastante elevado. Contudo, os mesmos não representam necessariamente descontinuidades geológicas presentes no maciço. Este efeito está ligado as características estruturais do talude estudado.

REFERÊNCIAS

- DAVIS, G. H. & REYNOLDS, S. J. 1996. STRUCTURAL GEOLOGY OF ROCKS AND REGIONS. 2. ED. NEW YORK, WILEY. 776p.
- DEWEZ, T. J. B., GIRARDEAU-MONTAUT, D., ALLANIC, C., and ROHMER, J.: FACETS: A Cloudcompare plugin to extract geological planes from unstructured 3d point clouds. 2016. In: XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic 799-804p.
- GIORDAN, D., ADAMS, M.S., AICARDI, I. *et al.* 2020. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology applications. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 3437–3481. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01766-2>.
- HARTWIG, M.E., MOREIRA, C.A. (no prelo). Integration of multisources data for quarry slope stability assessment in the Itaoca district (Southeastern Brazil). *An. Acad. Bras. Cienc.* v. 93(1). p. 1-17.
- HERGET G. 1977. Pit Slope Manual Chapter 2 – Structural Geology: CANMET (Canada Centre for Mineral and Energy Technology, formerly Mines Branch, Energy, Mines and Resources Canada), CANMET REPORT 77-41, 123 p. October 1977.
- LYONS-BARAL, J. 2017. Geological analysis using UAV imagery and point clouds. *GIS RESOURCES*. Issue 4. December 2017. p. 16-20.
- TUNG, W.Y. *et al.* 2018. 3D rock slope data acquisition by photogrammetry approach and extraction of geological planes using FACET plugin in CloudCompare. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* v. 169. p. 1-10.
- VIEIRA, V.S.; MENEZES, R.G. 2015. Programa Geologia do Brasil. Geologia e Recursos Minerais do estado do Espírito Santo. Escala 1:400.000. Belo Horizonte: CPRM. 289p.
- WESTOBY, M.J., BRASINGTON, J., GLASSER, N.F., HAMBREY, M.J., REYNOLDS, J.M. 2012. Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.
- ZIMMERER, M. 2018. Drones for the geosciences: a new eye in the sky. *New Mexico Bureau of Geology and Mineral Resources*. p. 1-5.