

AVALIAÇÃO NUMÉRICA ENTRE OS MÉTODOS STRUCTURE FROM MOTION E LIDAR PARA GERAÇÃO DE MODELO DIGITAL DE TERRENO: ESTUDO DE CASO DE VOÇOROCA EM ANHEMBI – SP

NUMERICAL EVALUATION BETWEEN STRUCTURE FROM MOTION AND LIDAR METHODS FOR GENERATING DIGITAL TERRAIN MODEL: CASE STUDY OF GULLY IN ANHEMBI – SP

EVALUACIÓN NUMÉRICA ENTRE LOS MÉTODOS STRUCTURE FROM MOTION Y LIDAR PARA GENERAR UN MODELO DE TERRENO DIGITAL: ESTUDIO DE CASO DE EROSIÓN EN ANHEMBI – SP

// RESUMO

AUTOR

¹ Tiago Antonelli 

² Vinicius Hector Abud Louro 

FILIAÇÃO INSTITUCIONAL

¹COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS
²COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANISATION

E-MAIL

tiago.antonelli@srb.gov.br
vinicius.abudlouro@csiro.au

DATA DE SUBMISSÃO: 02/10/24

DATA DE APROVAÇÃO: 11/12/25

DOI: 10.12957/GEOUERJ.2025.87440



E-ISSN 1981-9021

ESTE É UM ARTIGO DE ACESSO ABERTO
DISTRIBUÍDO SOB OS TERMOS DA LICENÇA
CREATIVECOMMONS BY-NC-SA 4.0, QUE
PERMITE USO, DISTRIBUIÇÃO E REPRODUÇÃO
PARA FINS NÃO COMERCIAIS, COM A CITAÇÃO
DOS AUTORES E DA FONTE ORIGINAL E SOB A
MESMA LICENÇA.

Veículos Aéreos Não Tripulados vêm sendo utilizados em larga escala nos últimos anos para levantamentos voltados a Prevenção de Desastres, seja apenas para visualizações simples do terreno, seja como base para geração de insumos cartográficos de precisão, como Modelos Digitais de Terreno e Ortofotos. Sensores LiDAR embarcados em drones, ainda que mais custosos financeiramente, acompanham essa tendência, embora com mais restrições, para geração de insumos cartográficos de elevada precisão. Este estudo utilizou uma Voçoroca no município de Anhembi – SP para comparação e análises qualitativa e, sobretudo, quantitativa de Modelos Digitais de Terreno obtidos pelas técnicas de Structure From Motion (SfM) e LiDAR para cálculo do volume da supracitada voçoroca. Apesar das diferenças encontradas nos resultados, com clara superioridade dos dados LiDAR, já esperada dada a natureza da técnica e tecnologia, foi possível constatar que levantamentos utilizando a metodologia SfM podem ser utilizados com sucesso, devido a maior simplicidade das operações e bom custo-benefício.

Palavras-chave: LiDAR. Structure from motion. Voçoroca. Anhembi. Modelo digital de terreno.

// ABSTRACT

Unmanned Aerial Vehicles have been used on a large scale in recent years for surveys aimed at Disaster Prevention, whether just for simple terrain visualizations or as a basis for generating precision cartographic inputs, such as Digital Terrain Models and Orthophotos. LiDAR sensors on drones, although more costly financially, follow this trend, while with more restrictions, for generating highly accurate cartographic inputs. This study used a gully in the municipality of Anhembi – SP for comparison and qualitative and, above all, quantitative analysis of Digital Terrain Models obtained by Structure From Motion (SfM) and LiDAR techniques to calculate the volume of the gully. Despite the differences found in the results, with clear superiority of LiDAR data, as expected given the nature of the technique and technology, it was possible to confirm that surveys using the SfM methodology can be used successfully, due to the greater simplicity of operations and good cost-benefit.

Keywords: LiDAR. structure from motion. gully. anhembi. digital terrain model.

// RESUMEN

Los vehículos aéreos no tripulados se han utilizado a gran escala en los últimos años para estudios destinados a la Prevención de Desastres, ya sea para simples visualizaciones del terreno, o como base para generar insumos cartográficos de precisión, como Modelos Digitales del Terreno y Ortofotos. Los sensores LiDAR integrados en drones, aunque más costosos desde el punto de vista financiero, siguen esta tendencia, aunque con más restricciones, para generar datos cartográficos de alta precisión. Este estudio utilizó una erosión del municipio de Anhembi – SP para comparación y análisis cualitativo y, sobre todo, cuantitativo de Modelos Digitales del Terreno obtenidos por técnicas Structure From Motion (SfM) y LiDAR para calcular el volumen de la mencionada erosión. A pesar de las diferencias encontradas en los resultados, con clara superioridad de los datos LiDAR, como era de esperarse dada la naturaleza de la técnica y tecnología, se pudo comprobar que las encuestas utilizando la metodología SfM pueden utilizarse con éxito, debido a una mayor simplicidad de operaciones y buenas costo-beneficio.

Palabra Clave: LiDAR. structure from motion. erosión. anhembi. modelo digital del terreno.

INTRODUÇÃO

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) são utilizados há décadas com fins prioritariamente militares, porém sua disponibilidade para fins científicos e públicos é ainda relativamente recente (D'OLEIRE-OLTMANN *et al.*, 2012). Essa tecnologia vem sendo experimentada através de técnicas de fotogrametria digital e softwares baseados em *Structure from Motion* (SfM) para diversos objetivos, como monitoramento e prevenção de eventos geológicos e hidrológicos causadores de perdas a sociedade (D'OLEIRE-OLTMANN *et al.*, 2012; TURNER; LUCIEER; DE JONG, 2015; WARRICK *et al.*, 2017; GARRITANO; GUERRA; AUGUSTINEFULLEN, 2019). Estes equipamentos também estão sendo utilizados em conjunto com diversos sensores, dentre eles o *Light Detection And Ranging* (LiDAR).

O SfM decorre da reconstrução automática de uma cena tridimensional a partir de um conjunto de fotografias tiradas de diferentes posições, sem a necessidade, a priori, de determinação de parâmetros externos da câmera (VIANA, 2015). Para as geociências, os produtos gerados por SfM abarcam um grande espectro de aplicações, tais como: geomorfologia, tectônica, geologia estrutural, geodesia, além de aplicações para prevenção de desastres (TAHAR; AHMAD; AKIB, 2011; NIETHAMMER *et al.*, 2012).

O LIDAR utiliza pulsos de luz laser para medir distâncias precisas e gerar informações sobre o ambiente ao redor. Suas características incluem precisão na medição de distâncias e na geração de modelos tridimensionais do ambiente; velocidade de aquisição de dados, crucial para aplicações em tempo real; capacidade de penetração de acordo com a frequência do laser utilizado, podendo penetrar em materiais, como folhagens e água, permitindo o mapeamento do terreno e, por consequência, gerar um Modelo Digital de Terreno (MDT).

O LiDAR pode ser integrado com outros sensores, como câmeras e sistemas de radar, para fornecer uma percepção mais abrangente do ambiente e melhorar a detecção e a identificação de objetos. A utilização integrada das geotecnologias permite a geração de informações geoespaciais com riqueza de detalhes como modelos 3D, fotografias aéreas ortorretificadas, fotografias aéreas oblíquas, relevos sombreados, nuvem de pontos densas, esparsas, dentre outros.

A tomada de informações periódicas de uma determinada área com um processo de instabilidade geológica instalado, permite o acompanhamento da evolução temporal desse processo. Isto significa produzir insumos que visem a prevenção de desastres naturais, sejam eles caracterizados por movimentos gravitacionais de massa (deslizamentos, corridas de massa), processos hidrológicos (inundações) ou erosivos, como é o caso de ravinas, sulcos e voçorocas (Figura 1) - foco do estudo de caso deste trabalho.

Figura 1. Voçoroca de grande porte em Anhembi – SP



Fonte: foto obtida via VANT.

Voçorocas são feições de grande extensão, ocorrendo em terrenos íngremes ou aplainados (SELBY, 1991; GUERRA, 2007). Trata-se de um tipo de erosão originado por mecanismos atuantes em diferentes escalas temporais e espaciais, por caminhos preferenciais tomados pelos fluxos de escoamento superficial e/ou subsuperficial, podendo atingir o lençol freático. Tais feições ocorrem, majoritariamente, em terrenos sedimentares em todas as regiões do Brasil. Devido às grandes dimensões e complexidade do processo, as voçorocas degradam áreas rurais, afetando pastos e cultivos. Nestas áreas podem atingir também estruturas civis como rodovias, ferrovias, moradias, entre outras.

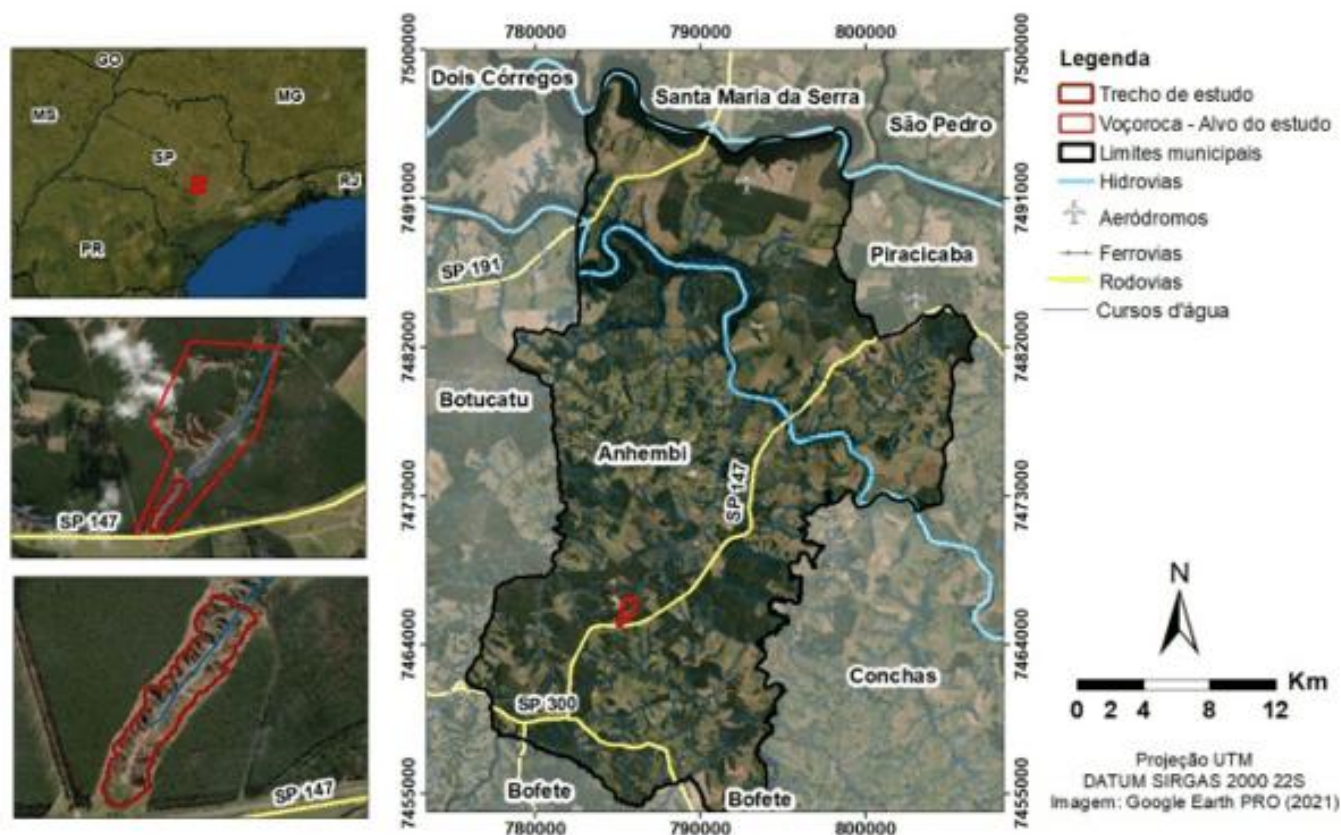
Apesar de muito estudadas, existem muitas lacunas a serem respondidas e compreendidas sobre a formação e desenvolvimento de voçorocas (POESEN, 2018). Alguns exemplos dessas lacunas são a quantificação e entendimento da evolução temporal e espacial dessas feições, definição das correlações entre os padrões geomorfológicos e sedimentares mais ou menos suscetíveis a erosões, definição de um monitoramento preciso de evolução das voçorocas, entre outros.

O uso de geotecnologias e outras ferramentas de sensoriamento remoto podem auxiliar no monitoramento e compreensão dessas feições. O emprego de VANTs para identificação e análise de sinais de instabilidade, assim como seu acompanhamento e derivação de produtos georreferenciados, representa um passo tecnológico significativo.

O emprego de drones permite, além do imageamento de áreas remotas, difíceis de serem alcançadas por via terrestre, uma economia financeira e de tempo nos projetos e estudos relacionados. Isso ocorre uma vez que as tomadas de imagem são feitas de um ponto fixo, sem a necessidade de se deslocar equipes para regiões de difícil acesso. A técnica de SfM associada a tomada das fotografias por VANTs ganhou espaço nas geociências a partir de 2010. Destaca-se pela sua facilidade de uso e baixo custo, sem uma necessidade de grande rigor geométrico na aquisição das imagens (CARRIVICK; SMITH; QUINCEY, 2016).

Neste trabalho foi realizada uma comparação qualitativa e quantitativa de dados coletados utilizando o SfM e o LiDAR embarcado em VANT dentro de um mesmo contexto geológico. Esta comparação utiliza uma voçoroca localizada no município de Anhembi – SP (Figura 2) como alvo e considera aspectos como volume de sedimentos remobilizados, reflexos geotécnicos do fenômeno, eficiência das duas técnicas, além do custo-benefício associado a cada uma delas. Essa voçoroca foi escolhida por ter um tamanho adequado para se realizar o sobrevoo no tempo disponível, e por ter feições erosivas recente e visíveis em seu interior.

Figura 2. Mapa de localização da área de estudo, com detalhe sobre a voçoroca e o trecho analisado



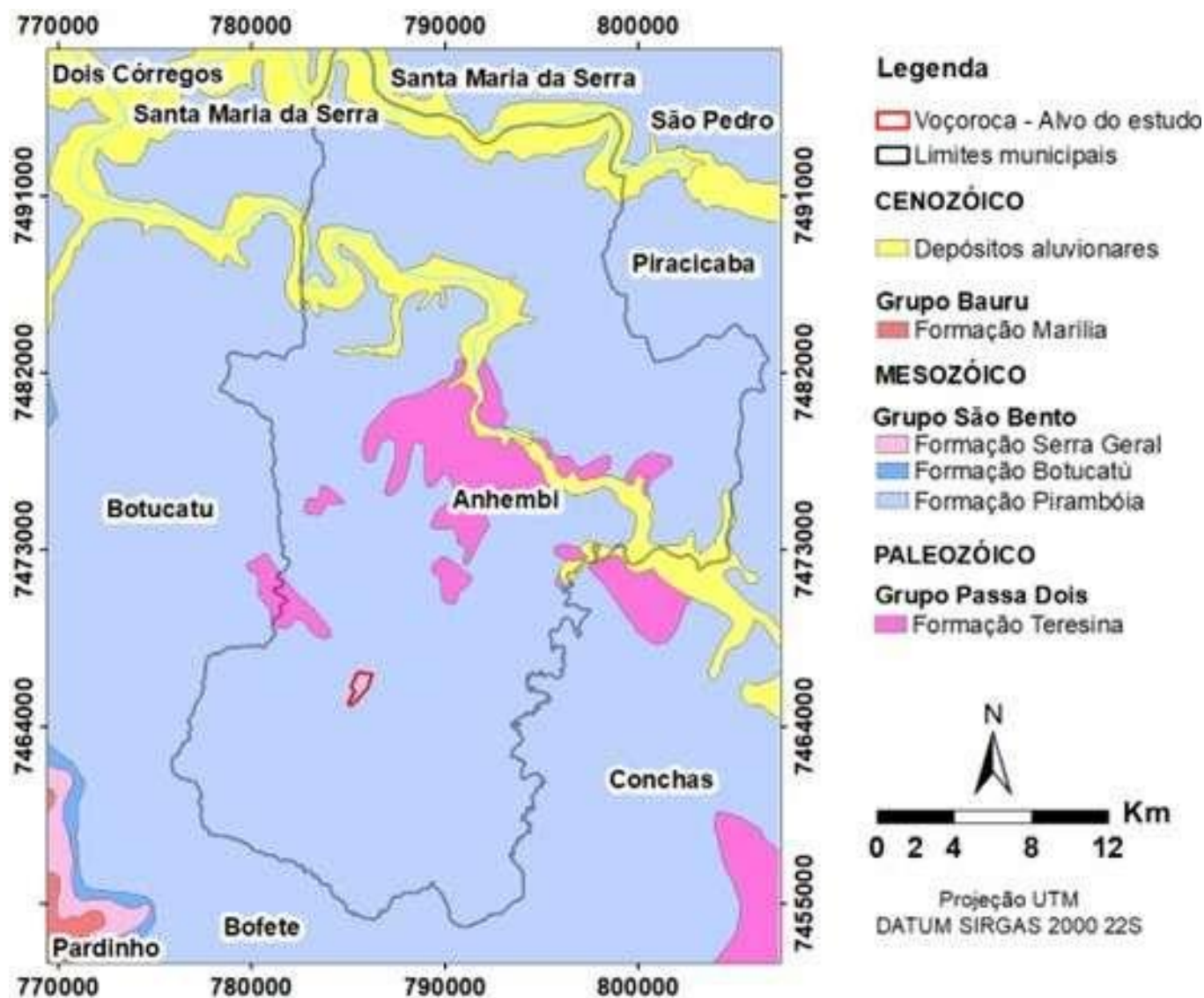
Fonte: Autores (2024)

CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo está inserida na Bacia do Paraná. Esta bacia intracratônica exibe uma forma ovalada com eixo maior N-S, com contornos erosivos relacionados em grande parte a fenômenos geotectônicos meso-cenozóicos. De acordo com Milani e Ramos (1998), estes fenômenos subtraíram significativa área do contexto deposicional original.

Na área de estudo afloram rochas do subgrupo Irati e da Formação Teresina, permianos, e o grupo triássico-jurássico São Bento. A Formação Teresina aflora com siltitos arroxeados já fraturados (pastilhados). Já as rochas da Formação Irati são compostas por sequências de folhelhos e calcários (ARAUJO, 2003; Figura 3).

Figura 3. Mapa geológico da área de estudo



Fonte: adaptado de CPRM (2019).

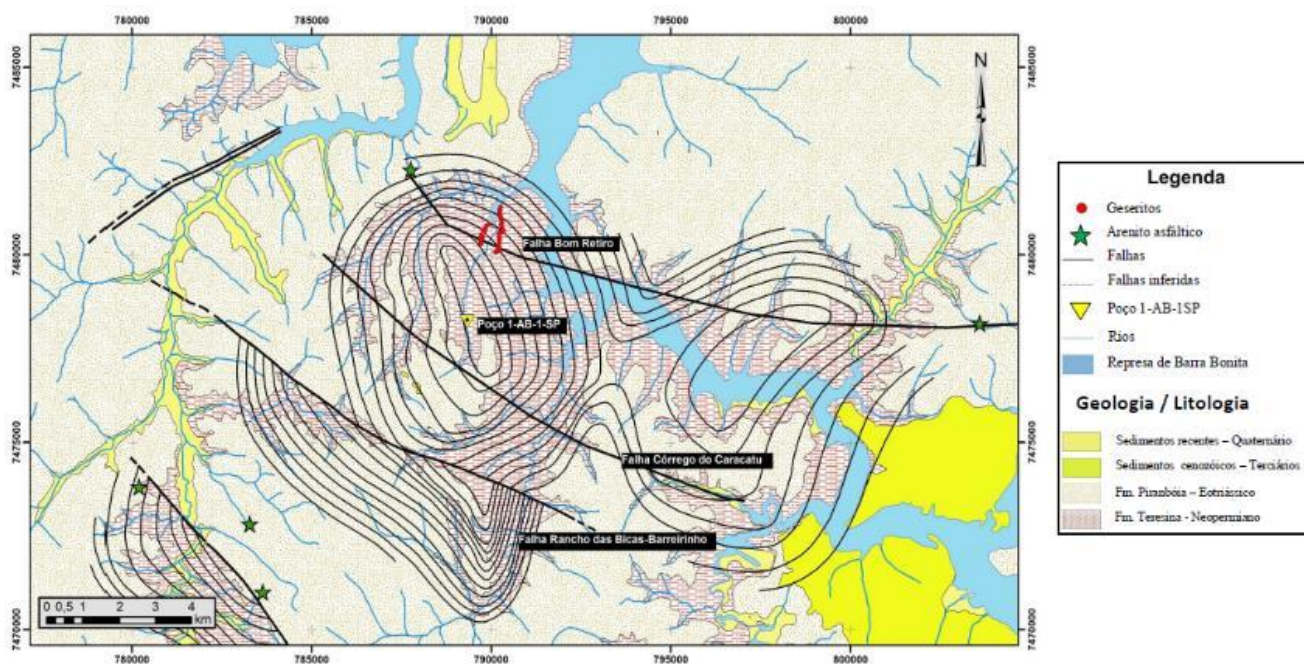
O grupo São Bento é constituído na região pelas formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral. A Formação Pirambóia apresenta arenitos médios e finos em sequências de estratificações cruzadas métricas de grande porte. A Formação Botucatu contém arenitos arredondados avermelhados com grãos foscas de tamanho médio. As rochas da formação Serra Geral se apresentam na forma de derrames basálticos tabulares sobrepostos a Formação Botucatu.

No interior da voçoroca estudada aparece o contato entre as Formações Pirambóia, no topo, e Teresina, na base. Este contato possui, no entanto, origem controversa. Segundo Petri e Fulfaro (1983), o início da deposição da Formação Pirambóia é marcado em grande área do Estado de São Paulo por regolito fóssil sob forma de brecha de siltito em matriz arenosa. A partir de estudo de fácies, Matos (1995) reconhece a atuação de processos deposicionais regidos por marés no regolito fóssil, intercalando a

deposição de sedimentos finos e de exposição e constituindo uma exposição de fácies com passagem transicional. O autor propôs o estabelecimento e uma nova unidade litoestratigráfica denominada camada Porangaba, substituindo a denominação regolito fóssil. Há locais, entretanto, em que esta camada não está presente no contato em questão, ocorrendo dos arenitos eólicos da Formação Pirambóia aparecerem diretamente sobre os sedimentos finos subjacentes, indicando uma erosão por ação eólica mais acentuada (CAETANO-CHANG e WU, 1995).

Estruturalmente, a área está inserida no contexto do Alto Estrutural de Anhembi (Figura 4). Este alto estrutural consiste no cruzamento de dois grandes lineamentos regionais na parte norte da Falha de Jacutinga (SOARES *et al.*, 1996), de direção NE, com o lineamento Tietê (SAAD, 1977), de direção NW. Esta feição caracteriza-se pelo afloramento de rochas Eopermianas da Formação Teresina na porção central da estrutura, circuncidada por rochas Triássicas da Formação Pirambóia (CAVALLARO, 2013).

Figura 4. Mapa geológico do Alto Estrutural de Anhembi



Fonte: Cavallaro (2013).

METODOLOGIA E DADOS

A comparação dos métodos SfM e LiDAR é necessária para elucidar as diferenças de resultados técnicos e a relação custo-benefício entre os mesmos. Equipamentos LiDAR são mais onerosos e menos acessíveis a população, se comparado a VANTs com câmeras RGB. Ambos os métodos têm como objetivo reconstituir um cenário tridimensional através de imagens óticas e modelos digitais de terreno, para que seja viável a fotointerpretação da mesma e a análise do volume de sedimentos erodido ao longo

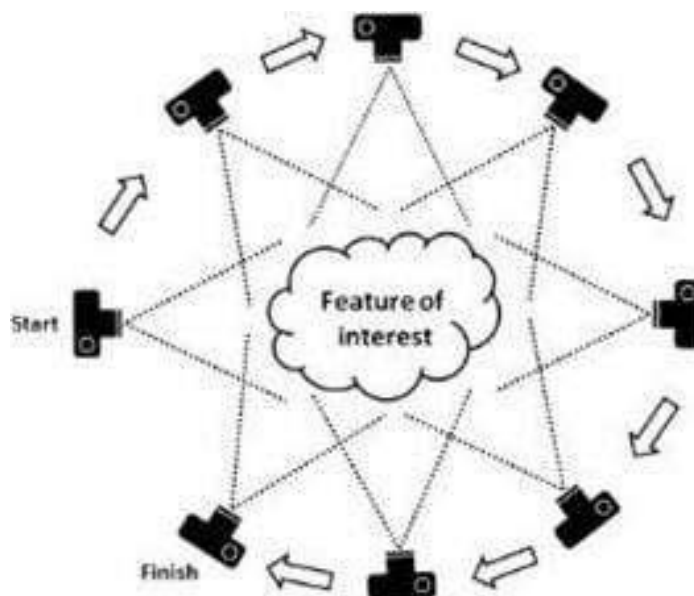
dos anos. Para a quantificação do volume foi necessário a geração de Modelos Digitais de Terreno, tanto via processamentos aerofotogramétricos tradicionais (SfM), quanto via LiDAR.

Structure from Motion (SfM)

A técnica de SfM consiste no imageamento de intervalo (*range imaging*) dos campos de visão de máquina e percepção visual. A técnica trata da reconstrução de uma cena tridimensional a partir de uma série de imagens em duas dimensões adquiridas por um sensor em movimento (VIANA, 2015; Figura 5). A diferença entre SfM e a fotogrametria tradicional está no fato de que no SfM, a geometria de cena, a posição entre as câmeras e suas orientações são resolvidas automaticamente sem a necessidade de especificar uma série de dados com coordenadas 3D conhecidas (WESTOBY *et al.*, 2012).

A base para a modelagem da superfície utilizada neste trabalho é fotogrametria digital. Com as reconstruções a partir das fotografias tiradas pelo drone, é possível quantificar o volume e área das feições erosivas. Este parâmetro permite, por exemplo em casos de monitoramentos, estimar a degradação futura do ambiente por essas erosões, bem como dimensionar a perda de solo nessas áreas.

Figura 5. Princípio da SfM, baseado na extração de estruturas 3D a partir das múltiplas imagens sobrepostas.

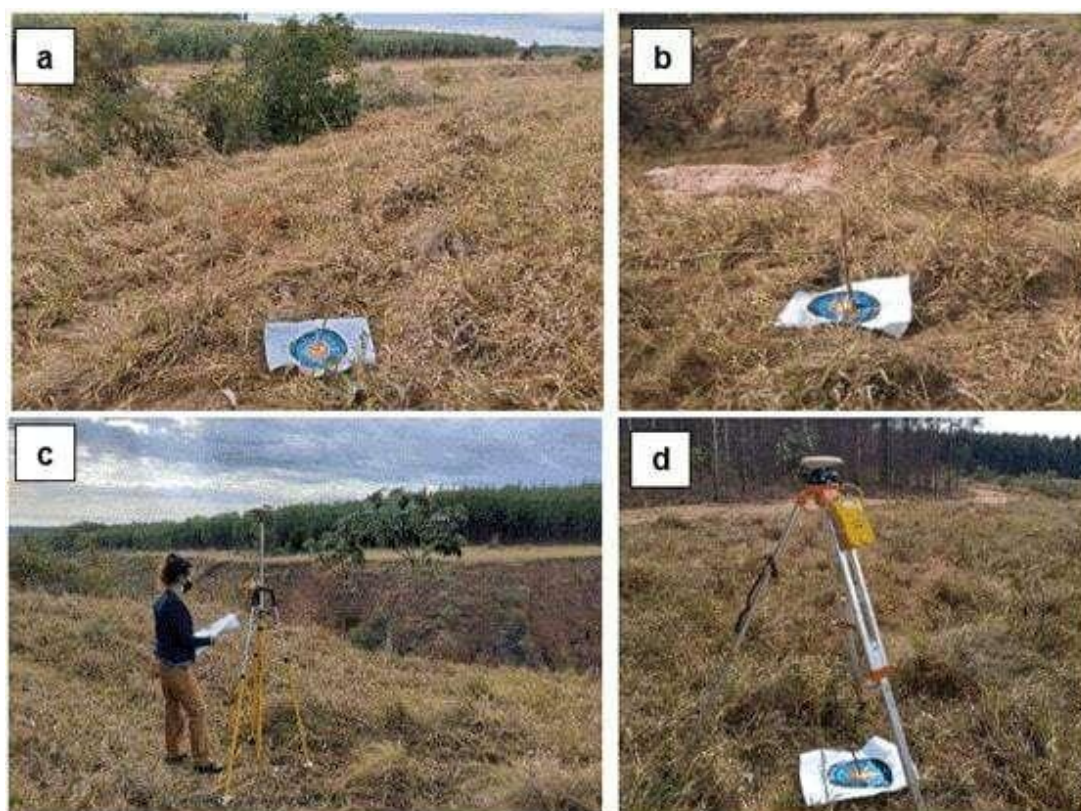


Fonte: extraído de Westoby *et al.* (2012).

Para minimizar o erro dos modelos gerados, foram coletados pontos de controle por meio de equipamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Para o georreferenciamento são necessários pelo menos três pontos de controle de solo (*Ground Control Points* - GCPs) adquiridos no terreno estudado por meio de equipamentos GNSS de alta precisão. Os pontos devem ser distribuídos na cena, evitando configuração linear (VIANA *et al.*, 2018).

A aquisição dos pontos de controle, identificados como alvos e numerados de 1 a 5 (Figuras 6a e b), foi realizada com dois receptores GNSS Trimble 5700 L1. O Alvo 1 foi o alvo de referência (base; Figura 6c), e adquiriu coordenada durante 4 horas, proporcionando maior precisão ao ponto. Os demais alvos tiveram aquisição das coordenadas por cerca de uma hora cada (Figura 6d). Os pontos foram sinalizados por alvos, de modo que cada um pudesse ser identificado nos imageamentos e então lhes fossem atribuídas às devidas coordenadas para o georreferenciamento preciso dos produtos fotogramétricos.

Figura 6. (a) e (b) Exemplos das marcações dos alvos para a aquisição dos pontos de controle; (c) Receptor GNSS fixo no Alvo 1; (d) Receptor GNSS móvel, coletando informações em um dos alvos.



Fonte: Autores (2024)

A Tabela 1 apresenta os parâmetros configurados para o levantamento aerofotogramétrico automatizado. Para reconhecimento da área em campo foram adquiridas imagens em voos manuais.

Tabela 1. Parâmetros configurados no VANT na data de aquisição.

Parâmetros	20/05/2023
Duração do voo	20 Minutos
Número de fotos do voo automático	403
Sobreposição frontal	80%
Sobreposição lateral	80%
Altitude de voo	50 metros
GSD planejado	1,25 cm/pix
Angulação da câmera ao longo de todo o voo	90° (NADIR)

Fonte: Autores (2024)

O posicionamento relativo necessita de um ponto de coordenada conhecida para que os dados sejam processados. Dessa forma foi, primeiramente, realizada a transposição de coordenadas das estações de aquisição da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) para um dos alvos. Nesse caso para o Alvo 1 (base) onde o receptor GNSS esteve como base de referência (GARBELINI, 2021).

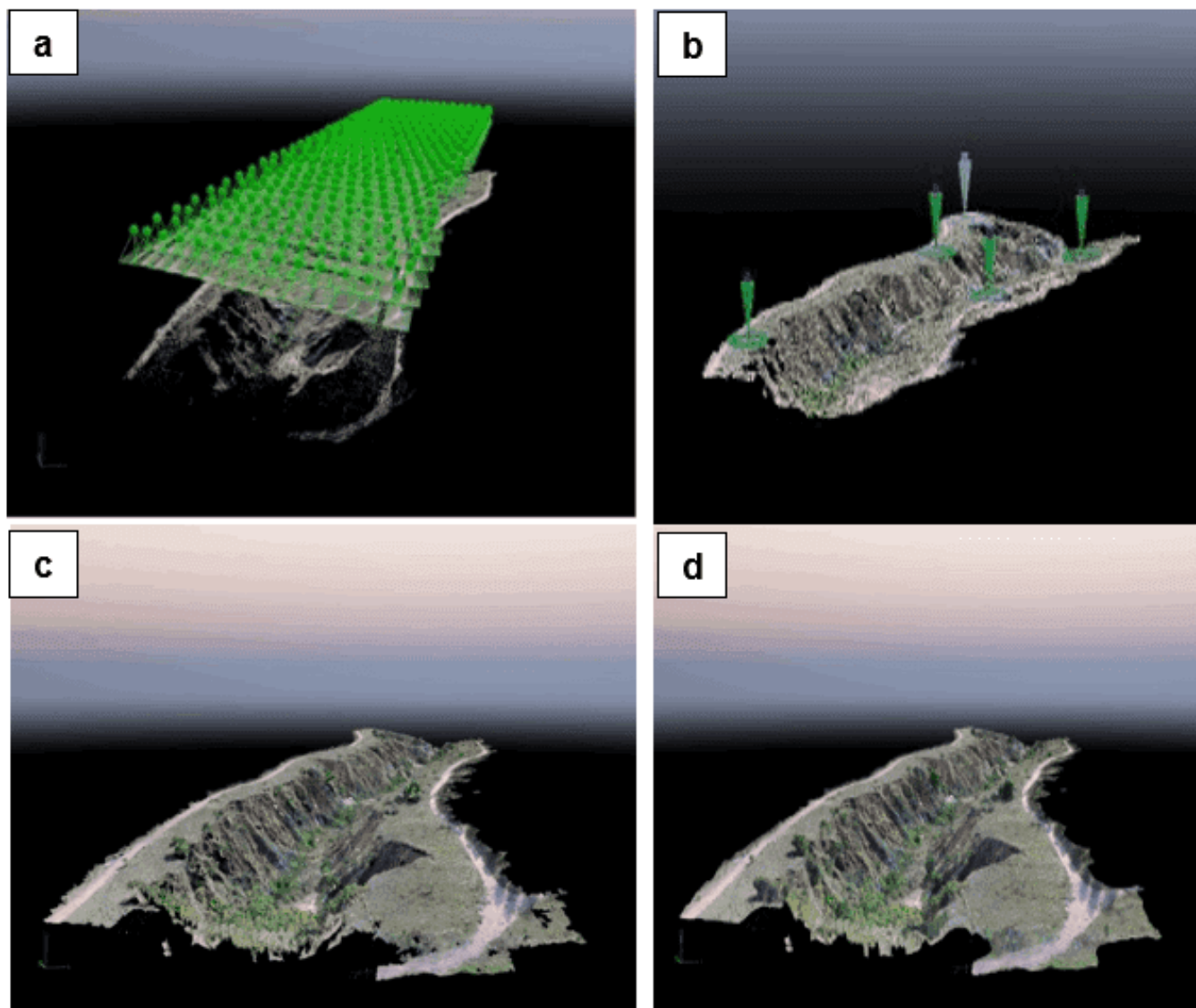
Nesse processamento são necessárias ao menos duas estações para fazer a triangulação do posicionamento com a base (IBGE, 2008). Para uma maior precisão, foram selecionadas 8 estações para a triangulação. A distância entre as estações escolhidas em relação à localização da base foi de aproximadamente 250 km, seguindo as recomendações para realizar a transposição entre a base e os demais alvos com eficácia (INCRA, 2013).

Com base nas efemérides obtidas por essas oito estações, foram processadas as linhas de base e, posteriormente, realizado o ajuste de rede automaticamente, avaliando e determinando a precisão da coordenada transposta. Desta forma, a coordenada da base foi calculada e ajustada, garantindo a melhor precisão ao Alvo 1 (base). Isso permitiu usar as coordenadas da base como referência para os demais alvos (IBGE, 2008).

Com a obtenção das coordenadas dos pontos de controle foi conduzido o processamento do imageamento automatizado da voçoroca. No processamento inicial são identificando pontos coincidentes em um grupo de imagens sobrepostas, bem como são calculadas a posição e orientação da câmera do drone. Esse procedimento gerou uma nuvem esparsa de pontos 3D (pontos com coordenadas X, Y e Z (Figuras 7a e 7b)). Os alvos dispostos no terreno (Figura 6) foram identificados e atribuídos das coordenadas X, Y, Z adquiridas com o GNSS, conferindo uma alta precisão para os modelos gerados.

Durante o processamento e configuração dos parâmetros de resolução, é automaticamente realizada a densificação dos pontos, interpolação, estruturação e texturização. Em seguida uma nova nuvem densa é gerada, (Figura 7c). A partir das informações de posição e altitude, são gerados o modelo 3D (Figura 7d), constituído de malhas poligonais obtidas pela tesselação de seus pontos, Modelo Digital de Elevação (MDE) e ortomosaico.

Figura 7. Aquisição e processamento dos dados coletados por VANT na voçoroca: (a) Posição da câmera, indicada por esferas verdes, sobre uma nuvem de pontos esparsos no programa Pix4D Mapper; (b) Posição dos pontos de controle sobre nuvem de pontos esparsos; (c) Nuvem de pontos densa; (d) Malha poligonal texturizada.



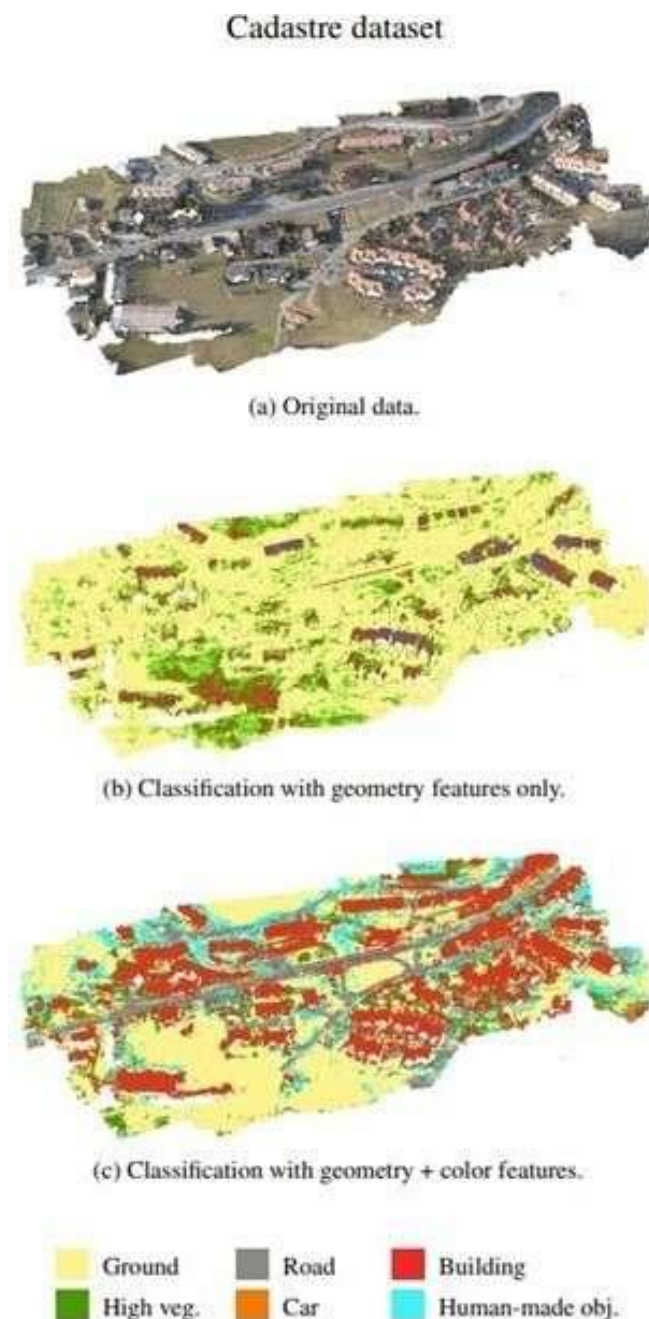
Fonte: Autores (2024)

O processamento do ortomosaico é realizado através da ortorretificação das imagens através do MDE, o qual permite eliminar as distorções geométricas e detectar áreas oclusas. Isso garante uma visão ortogonal da superfície, de modo a representar a área o mais próximo da realidade, podendo ser usado para medir distâncias, áreas e direções precisas entre pontos (SHIN; LEE, 2021).

A geração do Modelo Digital de Terreno (MDT) utilizou a proposta de Becker *et al.* (2018) para classificar a nuvem de pontos com base em recursos geométricos e de cor (Figura 7d). Essa filtragem tem

como objetivo retirar os pontos que não sejam classificados como terreno (*ground*) da nuvem de pontos e, por consequência, do Modelo Digital de Terreno a ser gerado (Figura 8).

Figura 8. Resultado da Classificação da nuvem utilizando apenas dados geométricos e utilizando dados geométricos + feições de cor



Fonte: extraído de Becker *et al.* (2018).

LiDAR

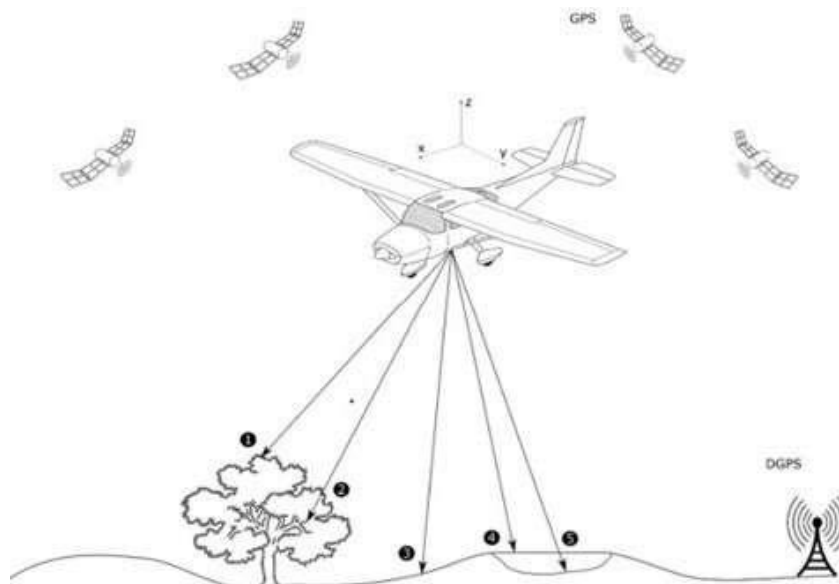
Nos anos 60, dispositivos de medição de alta resolução, comumente conhecidos como *Laser Range Finders* (detectores de distância a laser) ou *Laser Detection and Ranging* (detecção e alcance a laser;

LADAR) ou ainda *Light Detection and Ranging* (LiDAR), foram desenvolvidos para fins militares (BROOKER 2009; PETRIE; TOTH, 2018). Os sistemas de escaneamento a laser atuam com sensores ativos e operam segundo princípios similares ao sistema de RADAR (*Radio Detection and Ranging*). O LiDAR utiliza os comprimentos de ondas mais curtas do espectro eletromagnético, se comparado a comprimentos de onda de rádio.

O LiDAR utilizado neste trabalho trabalha com o comprimento de onda de 905 nm, natural do VANT DJI Zenmuse L1. Estes sistemas foram desenvolvidos inicialmente de duas formas, dependendo da posição do sensor e da estratégia de aquisição. A primeira forma trata de sistemas de plataformas remotas, com sistemas orbitais ou aerotransportados por laser (*Airborne Laser Scanning* - ALS) operados a partir de aeronaves de asa fixa, helicópteros e Veículos Aéreos não Tripulados (VANTs). A segunda introduz sistemas de escaneamento terrestres, ou escaneamento terrestre por laser (*Terrestrial Laser Scanning* - TLS), incluindo sistemas de varreduras estacionárias e varreduras móveis, em um veículo em movimento (ARAÚJO *et al.*, 2022).

Levantamentos ALS são normalmente realizados visando cobrir áreas grandes ($> 1 \text{ km}^2$). As posições x, y e z de cada ponto obtido por ALS são geradas a partir de um sensor laser que produz e emite pulsos laser ou laser em comprimento de onda contínua. Junto ao sensor, é utilizado um Sistema Inercial de Navegação - *Inertial Navigation System* (INS) e um receptor GPS. O GPS opera em uma plataforma aerotransportada e conectado uma rede GPS que opera em terra de forma conjugada (Figura 9). Métricas do terreno, como elevação, altitude e as distâncias (*ranges*) do objeto em relação ao instrumento são calculadas a partir do registro do tempo entre emissão e a recepção do sinal laser refletidos de um alvo (ARAÚJO *et al.*, 2022).

Figura 9. Princípios e componentes de um sistema ALS. 1 - Primeiro retorno, copa da vegetação; 2 - segundo retorno, dossel da vegetação; 3 - retorno terreno; 4 - primeiro retorno, espelho d'água; 5 - retorno do laser verde (aplicado em topobatimetria)



Fonte: extraído de Araújo *et al.* (2022).

Levantamentos ALS podem gerar MDTs com resolução métrica à centimétrica e são mais eficazes para investigação de fenômenos geomorfológicos ou geológicos de maior magnitude e/ou maior alcance espacial. Cada vez mais, sensores de varredura laser vêm sendo operados embarcados em VANTs, o que facilita e desonera a aquisição de dados por operadores menos especializados. Nos levantamentos de campo em Anhembi foram utilizados o VANT DJI Matrice 300 e o sensor LiDAR DJI L1 Zenmuse (Figura 10).

A sobreposição utilizada para os dados LiDAR no levantamento foi de 30% nas coordenadas x e y. As fotografias foram ajustadas automaticamente para colorizar os pontos gerados no levantamento. O voo teve duração aproximada de 12 minutos e uma altura de 50 metros em relação ao ponto de decolagem, gerando um *Ground Sample Distance* (GSD), ou Distância de Amostra do Solo, de aproximadamente 2,5 cm.

Figura 10. Utilização do drone e LiDAR em campo.



Fonte: Autores (2024)

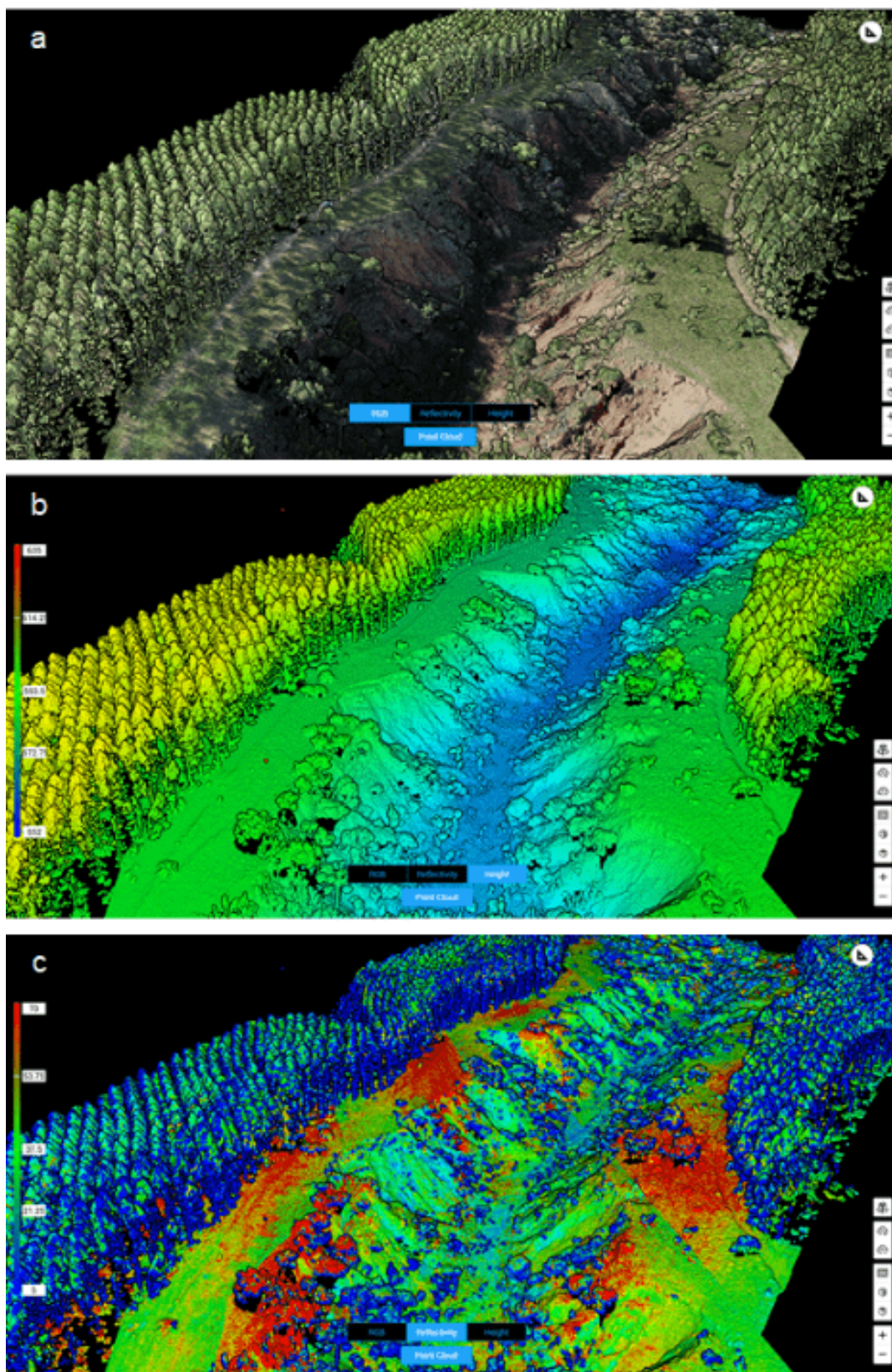
O LiDAR utilizado neste estudo possui 3 retornos, de mesmo comprimento de onda, de forma que para cada ponto amostrado 3 feixes de LiDAR são emitidos, de sorte que, em locais com presença de vegetação, aumente a probabilidade que o segundo ou terceiro retorno alcancem o terreno de fato, gerando uma nuvem de pontos fidedigna ao terreno aerolevantado.

Os dados brutos são integrados com as fotos RGB que coloreem os arquivos laser gerando um arquivo de nuvem de pontos colorizado (Figura 11a). Também são produzidos os dados de hipsometria e de reflectância do terreno (Figura 11b e c). Depois de pré-processada, a nuvem de pontos será base para a geração de ortofotos, Modelo Digital de elevação (MDE) e Modelo Digital do Terreno (MDT). Para o georreferenciamento da nuvem foram usados pontos de controle, de forma e método similar ao realizado nos levantamentos por SfM.

A filtragem da nuvem de pontos, bem como a geração dos MDE e MDT foram realizadas em softwares de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Foram aplicados filtros no arquivo de nuvem de pontos a fim de excluir vegetação e edificações do modelo, deixando apenas os pontos relativos ao terreno (*ground*), para que o MDT fosse fidedigno.

Diferentemente da aerofotogrametria clássica, o Modelo Digital de Terreno é gerado a partir da filtragem dos retornos do LiDAR, ou seja, é possível retirar fisicamente os retornos que são aqueles provenientes da reflexão em copas de árvores ou outros obstáculos que não sejam de fato o terreno.

Figura 11. Imagem esquemática da nuvem de pontos da voçoroca, com visualização de (a) imagem em RGB (b) hipsometria; e (c) refletância (Retirado do DJI Terra).

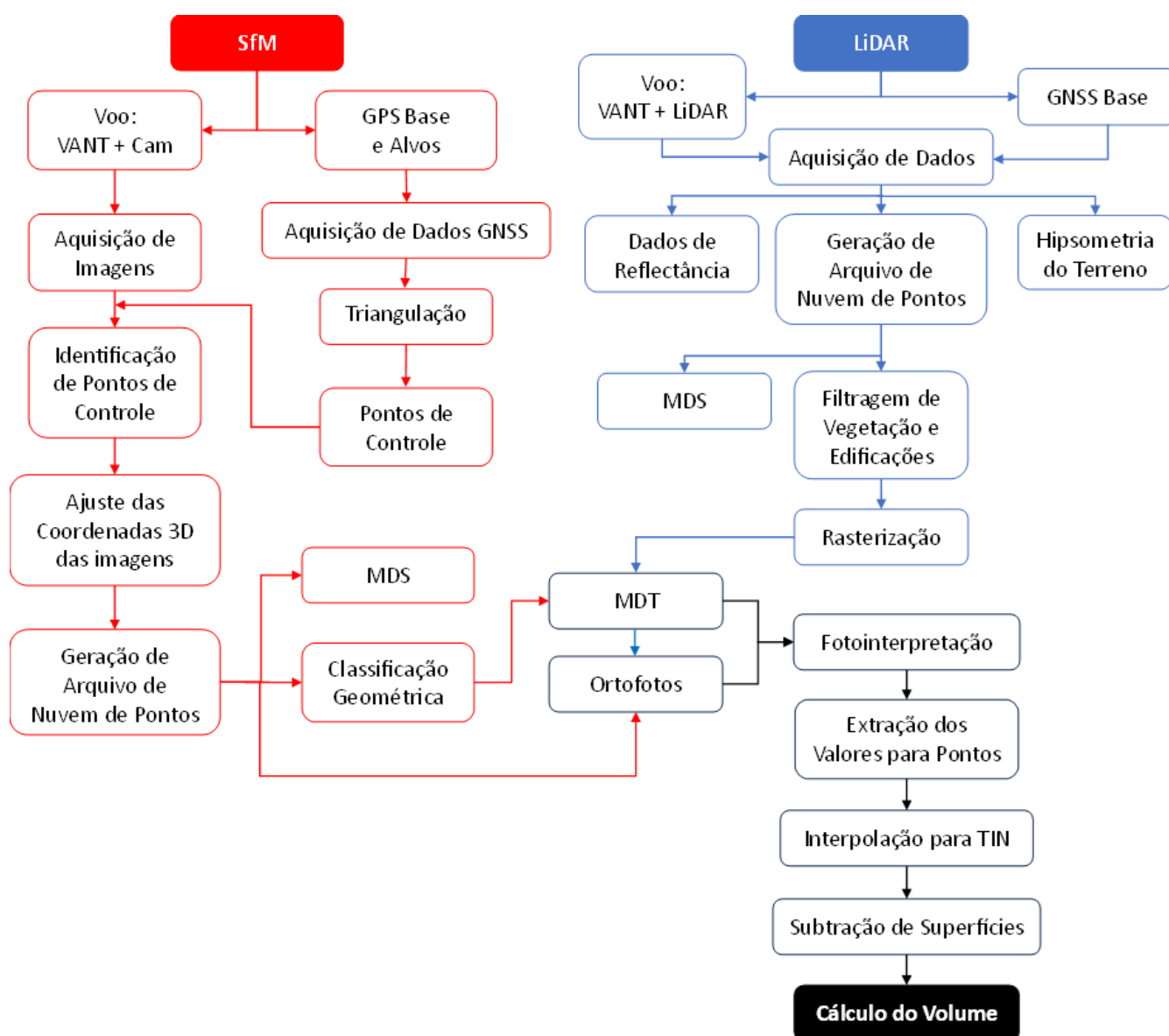


Fonte: Autores (2024)

Cálculo de Volume da Voçoroca

Após os processamentos das imagens adquiridas pelo VANT foi possível calcular o volume da voçoroca pelos resultados das duas metodologias apresentadas. O cálculo do volume utilizou servidores GIS para calcular a diferença entre a altitude de uma superfície inferida e o MDT (Figura 12; JULIAN; NUNES, 2020).

Figura 12. Fluxograma para o Cálculo do Volume da Voçoroca a partir dos Modelos Digitais de Terreno oriundos do LiDAR e do SfM.

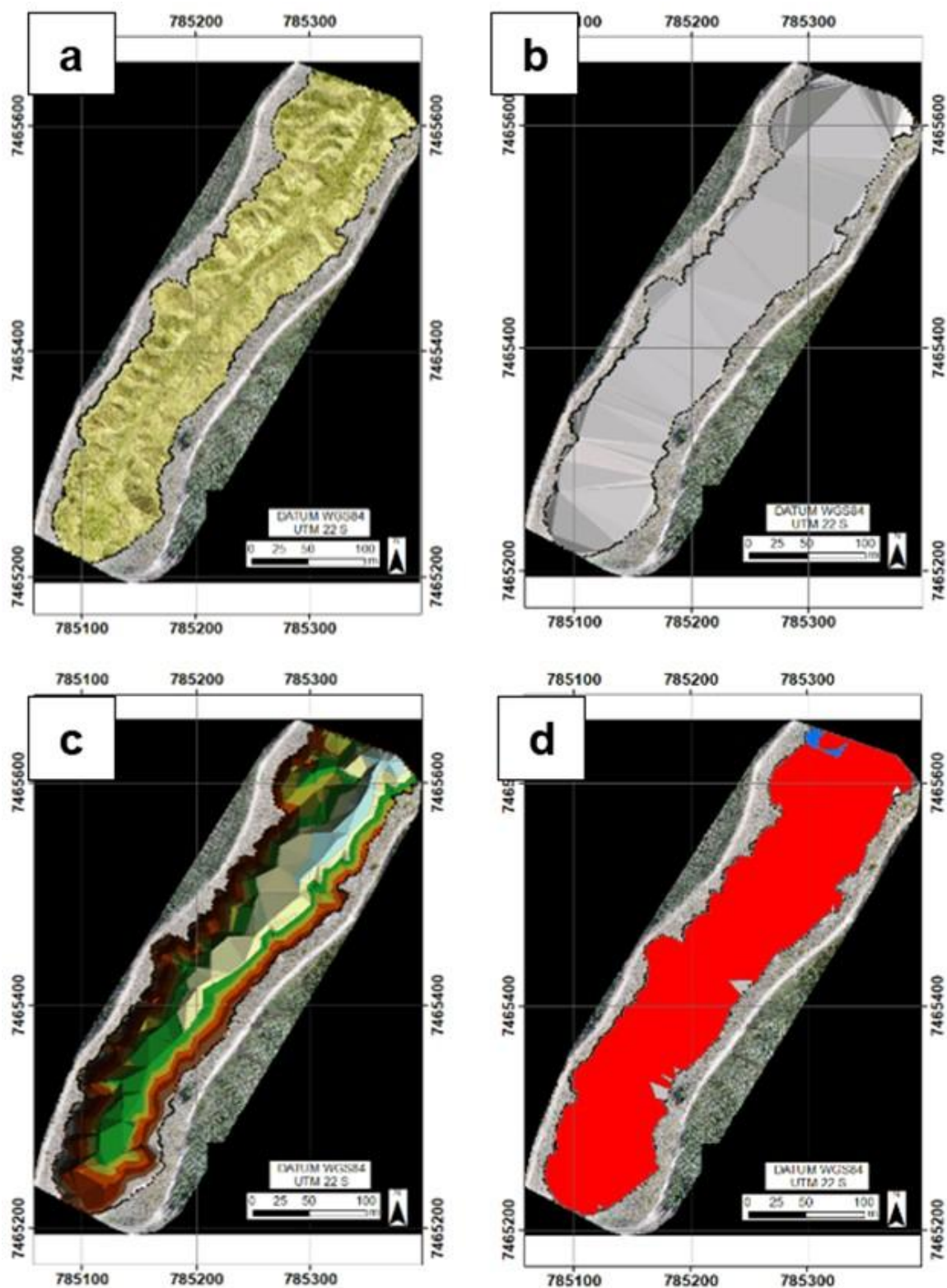


Fonte: Autores (2024)

Por meio de fotointerpretação realizada a partir das ortofotos adquiridas pelo drone, foram delimitadas as bordas da voçoroca (Figura 13a). Foram atribuídos aos seus vértices valores de altitude extraídos do MDT e aqueles no limite da voçoroca puderam ser interpolados pelo método linear via TIN

(*Triangle Irregular Network*; Figuras 13b e 13c). Foi gerada então superfície virtual para reprodução da topografia original do terreno, antes do início da erosão. Para executar o cálculo do volume erodido, foi calculada a diferença entre as altitudes das duas camadas e multiplicado o resultado pela resolução espacial do MDT, gerando o volume do que está abaixo e acima de superfície original (Figura 13d).

Figura 13. (a) Delimitação vetorial da superfície original estimada em amarelo, e seus respectivos vértices com informação de altitude; (b) Interpolação linear em malha triangular dos vértices para gerar uma superfície 3D; (c) Transformação do arquivo raster do MDT em TIN; e (d) Resultado do cálculo de volume, em vermelho o volume abaixo da superfície original (volume erodido), em azul é apresentada a área cujo volume estaria acima da superfície estimada, e em cinza estaria nas mesma altitude da referência.



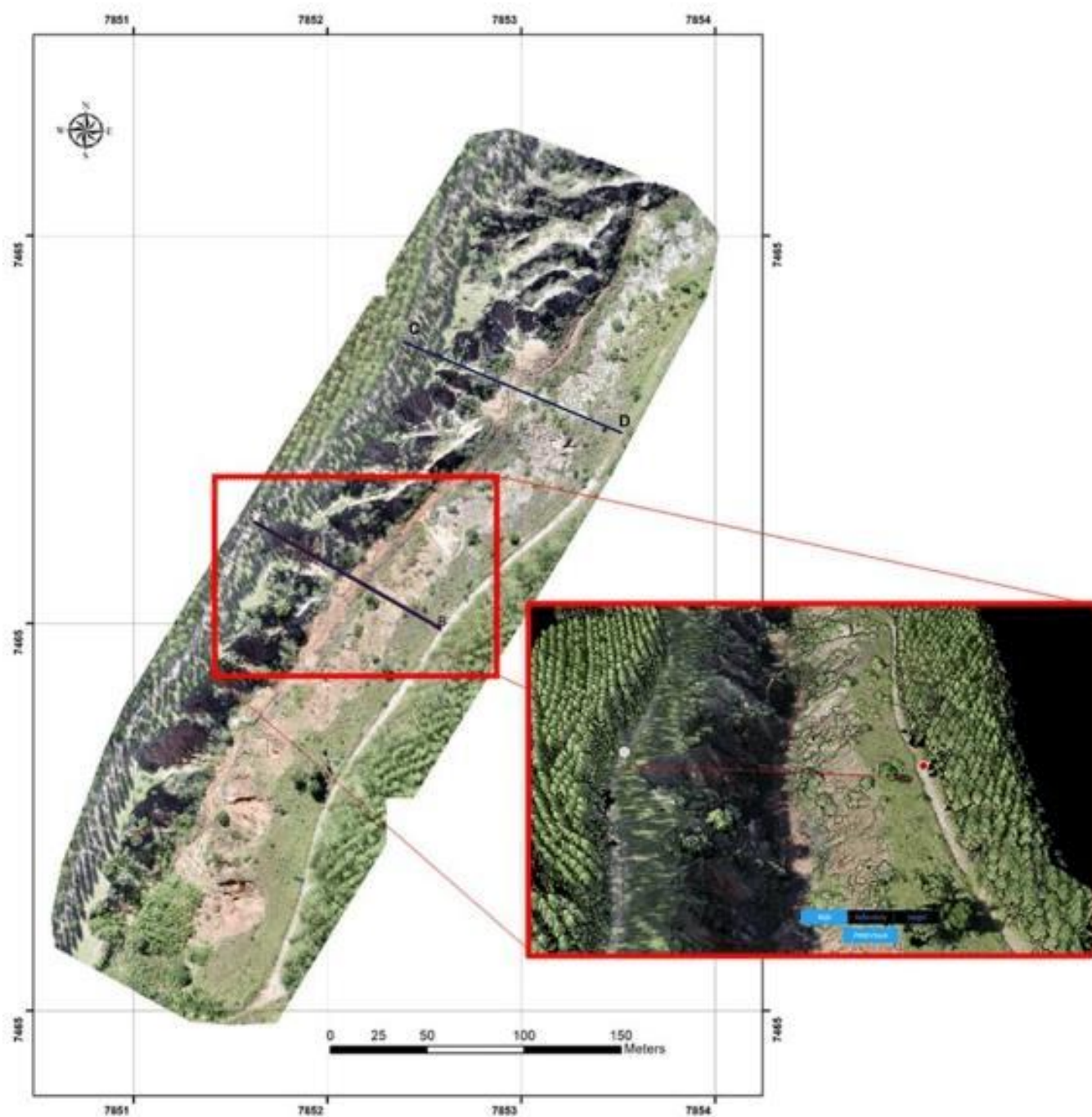
Fonte: Autores (2024)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O volume da voçoroca utilizando o MDT gerado pelos levantamentos com sensor LiDAR foi de 332,131 m³, aproximadamente 25% maior do que o obtido pelo método SfM, com 264,576 m³. Tal diferença pode ser explicada devido a eficiência na filtragem da nuvem de pontos geradora dos modelos. Nas filtragens realizadas na nuvem gerada pelo LiDAR pode-se retirar com precisão os retornos que não são considerados solos, uma vez que o método de imageamento é ativo. Ou seja, a maior parte da vegetação foi extraída por esse método, conferindo um volume calculado maior.

A filtragem realizada para o SfM é realizada por meio de algoritmos que utilizam parâmetros geométricos e de coloração da nuvem para se gerar o modelo mais próximo ao terreno. Esse método, entretanto, utiliza apenas as fotografias tiradas pelo VANT sendo, portanto, um método passivo de aquisição. Para fins de análise e comparação, foram gerados dois perfis altimétricos perpendiculares ao maior eixo da voçoroca, tendo como base os MDTs gerados pelo LiDAR e pelo método SfM, (Figura 14).

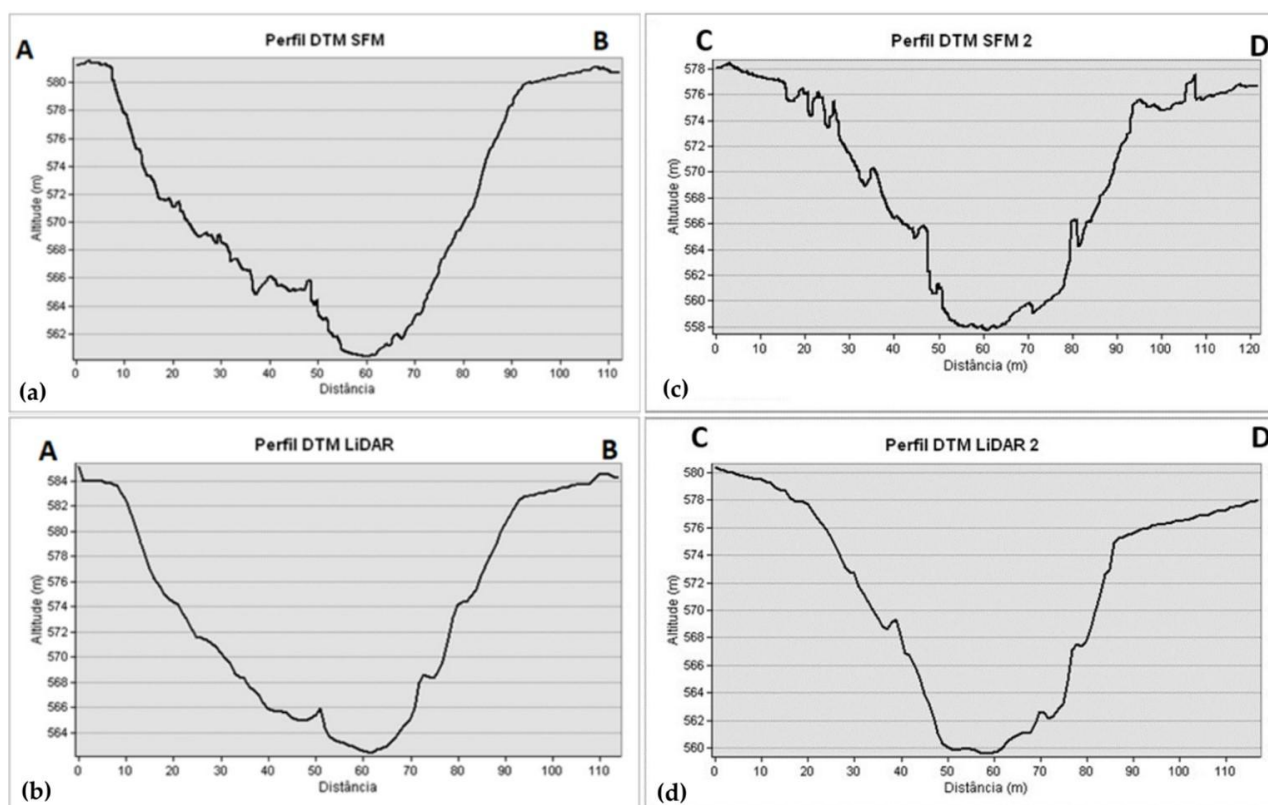
Figura 14. Ortofoto da Voçoroca gerada por VANT, com o perfil A – B e C-D. Inset: Perfil traçado perpendicular ao maior eixo da Voçoroca. O ponto branco se refere ao extremo A e o ponto vermelho ao extremo B.



Fonte: Autores (2024)

Mesmo com ambos os levantamentos georreferenciados pelos mesmos pontos de controle, há uma sutil diferença nas cotas ao longo dos perfis (Figuras 15). O perfil gerado a partir do MDT oriundo do levantamento LiDAR mostra, em geral, cotas mais elevadas em relação ao MDT gerado no levantamento aerofotogramétrico.

Figura 15 - (a) Perfil traçado perpendicular ao maior eixo da Voçoroca, utilizando o MDT gerado por Structure From Motion; (b) Perfil traçado perpendicular ao maior eixo da Voçoroca, utilizando o MDT gerado por LiDAR; (c) Perfil traçado perpendicular ao maior eixo da Voçoroca, utilizando o MDT gerado por Structure From Motion; e (d) Perfil traçado perpendicular ao maior eixo da Voçoroca, utilizando o MDT gerado por LiDAR.



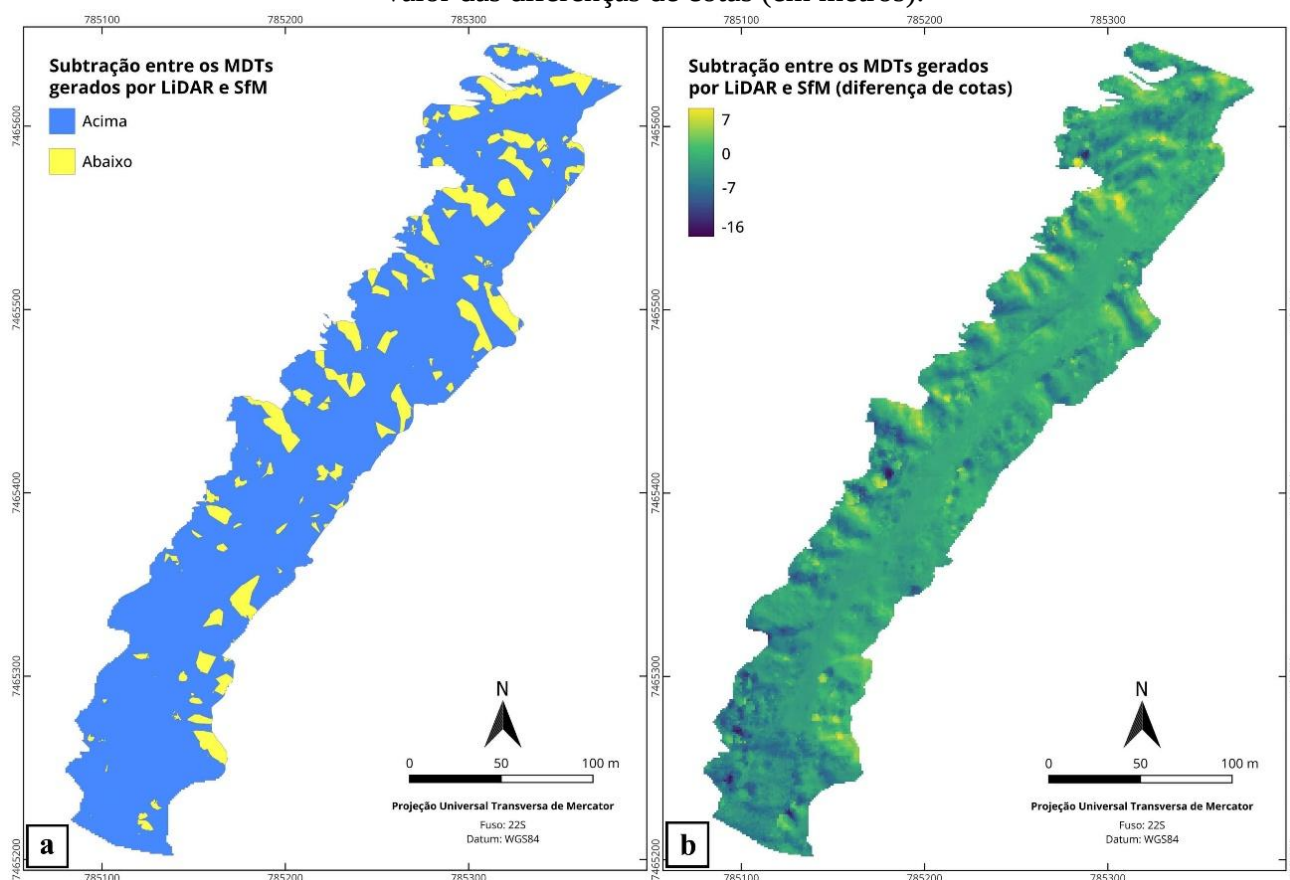
Fonte: Autores (2024)

Uma hipótese para essa causa é que o filtro descrito por Becker *et al.* (2018) pode ter superestimado pontos considerados como não sendo os de terreno, ou seja, pode ter retirado pontos do modelo que eram, de fato, terreno para a geração do MDT. Se por um lado a filtragem, por vezes, deixa de extrair pontos de vegetação por entender que o mesmo se trata de solo, por outro ela classifica pontos de solo como vegetação (ou outra classificação), realizando a extração indevida. Nas figuras 16a e 16b foram realizadas subtrações dos MDTs gerado por SfM e por LiDAR. Pode se observar, especialmente, que a maior parte do MDT gerado por LiDAR está em cota superior ao MDT gerado por SfM.

O perfil gerado através do MDT do método SfM possui mais ruído se comparado ao MDT obtido pelo LiDAR. Esse aspecto também pode ser explicado pela diferença na filtragem na nuvem de pontos de ambos os métodos. Com a filtragem exata dos retornos de Terreno e “Não Terreno” feita no LiDAR, obtém-se um perfil de terreno mais suavizado, com a retirada da maior parte da vegetação do modelo e, possivelmente, mais próximo do real.

O perfil mais suavizado obtido no levantamento LiDAR, portanto, deve-se ao fato do mesmo representar o terreno de fato, extraindo a grande maior parte da vegetação do modelo. Já o perfil obtido a partir dos dados SfM, por sua vez, contém “resíduos” da vegetação, que não foram completamente extraídos, através de processamentos puramente aerofotogramétricos.

Figura 16. (a) Espacialização da subtração dos MDTs gerados por LiDAR e SfM (nesta ordem, ou seja: MDT LiDAR – MDT SfM); (b) Espacialização da subtração dos MDTs gerados por LiDAR e SfM, com o valor das diferenças de cotas (em metros).



Fonte: Autores (2024)

Embora observada diferença na ordem de 25% entre os volumes calculados utilizando cada um dos MDTs, deve se levar em consideração na avaliação do resultado como um todo o custo-benefício de cada equipamento. Um VANT profissional capaz de realizar um levantamento aerofotogramétrico, custa na ordem de dez vezes menos se comparado a um VANT de maior porte, equipado de um sensor LiDAR.

CONCLUSÕES

A comparação dos produtos gerados a partir das diferentes tecnologias dá insumos e alternativas de geotecnologias para serem empregadas na Prevenção de Desastre. Neste sentido, compreende-se que é

oneroso e improvável que a maioria dos municípios e estados brasileiros tenham capacidade financeira de adquirir equipamentos semelhantes aos utilizados neste estudo para o levantamento LiDAR, que tem o custo na ordem de dezenas de milhares de reais. É também improvável que os mesmos municípios e estados tenham pessoal capacitado com conhecimento necessário para manusear os equipamentos, além de processar e interpretar os dados gerados pelos mesmos.

Com base nos resultados provenientes dos processamentos realizados tanto para a geração dos Modelos Digitais de Terreno pelos métodos LiDAR e SfM, quanto para a mensuração do volume da voçoroca, foi possível evidenciar as diferenças em termos de qualidade dos resultados, considerando a complexidade de cada método.

O Modelo Digital de Terreno gerado através de processamentos aerofotogramétricos tradicionais, utilizando a metodologia SfM possui maior quantidade de ruídos no arquivo raster, uma vez que a supressão de pontos considerados como vegetação foi realizada toda utilizando técnicas de Inteligência Artificial que consideram a geometria e a coloração dos pontos para classificar o que é *ground* e o que não é *ground*. Esta metodologia indireta da filtragem da nuvem de pontos, que é geradora do MDT, confere ao modelo considerável quantidade de ruídos. Os ruídos são frequentemente oriundos da vegetação, a qual não foi completamente suprimida na filtragem da nuvem de pontos que originou o modelo gerado.

Já o MDT gerado através da aquisição utilizando o sensor LiDAR embarcado no VANT, possui menor quantidade de ruídos no arquivo raster. Nos perfis gerados, transversais ao maior eixo da voçoroca, é possível notar que os mesmos são mais suaves se comparados aos perfis gerados a partir do MDT oriundo do SfM. A suavização do perfil, bem como a menor quantidade de ruídos no modelo se dá, provavelmente, devido ao fato da filtragem da nuvem de pontos ter sido mais assertiva, uma vez que o LiDAR possui três retornos para cada ponto levantado, sendo possível retirar do modelo, com mais precisão, todos aqueles pontos que não sejam de fato pontos de terreno.

No cálculo da volumetria, observou-se que o volume calculado utilizando o MDT gerado a partir dos dados LiDAR foi cerca de 25% maior se comparado ao volume calculado utilizando o MDT gerado a partir do SfM. Apesar da diferença significativa entre os volumes calculados, a utilização da aerofotogrametria digital e do SfM para gerar insumos voltado a Prevenção de Desastres não deve ser descartada, uma vez que o método é na ordem de dez vezes mais barato se comparado aos equipamentos e softwares necessários para aquisição e processamento de dados LiDAR, e possui resolução significativamente maior se comparado a dados de Modelos Digitais de Terreno satelitais gratuitos disponíveis atualmente.

Pelos fatores abordados o LiDAR é uma ferramenta mais poderosa para a obtenção de insumos digitais (Modelos Digitais de Terreno, Elevação e Ortofotos) para melhorar os modelos utilizados para

prevenir desastres geo-hidrológicos no Brasil. No entanto, pode se considerar que os insumos gerados por Structure From Motion, utilizando VANTs tradicionais são válidos, com um custo-benefício alto e devem ser utilizados, porém levando-se em consideração os limites físicos do método.

REFERÊNCIAS

- ARAUJO, Carlos César de. **Gênese das ocorrências de arenito asfáltico da borda leste da Bacia do Paraná, SP**. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 2003. 135p. DOI. 10.11606/T.44.2003.tde-27102015-141633
- ARAÚJO, João Paulo De Carvalho, *et al.* Uso do lidar na geomorfologia: aplicações e desafios futuros. In: JÚNIOR, O. A. C. *et al.* **Revisões de literatura da geomorfologia brasileira**, 1ª Ed., Universidade de Brasília, 2022, p. 931-956. DOI. 10.26512/9786586503852.c34
- BECKER, C. *et al.* Classification of Aerial Photogrammetric 3D Point Clouds. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 84, n. 5, p. 287-295, 2018. DOI. 10.14358/PERS.84.5.287
- BROOKER, Graham. **Introduction to Sensors for Ranging and Imaging**. SciTech Publishing, 2009. DOI. 10.1049/SBRA014E
- CAETANO-CHANG, Maria R.; WU, Fu T. As formações Pirambóia e Botucatu no Estado de São Paulo. In: IV SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 1995, São Pedro. **Atas do IV Simpósio**, São Pedro, 1995, p. 64.
- CARRIVICK, Jonathan L.; SMITH, Mark W.; QUINCEY, Duncan J. **Structure from Motion in the Geosciences**. 1ª Ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2016. 208p. DOI. 10.1002/9781118895818
- CAVALLARO, Francisco De Assis. **Investigação Geofísica do Alto Estrutural de Anhembi-SP**. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. DOI. 10.11606/T.44.2013.tde-11022014-145456
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Anhembi, SP**. CPRM, 2019. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/21477>
- D'OLEIRE-OLTMANN, Sebastian. *et al.* Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Monitoring Soil Erosion in Morocco. **Remote Sensing**, v. 4, n. 11, p. 3390-3416, 2012. DOI. 10.3390/rs4113390

GARBELINI, Larissa. **Aplicação de geotecnologias na caracterização de processos erosivos: estudo de uma voçoroca em Anhembi-SP**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

GARRITANO, Fabrizio; GUERRA, Antônio José Teixeira; AUGUSTINEFULLEN, Michael. Unmanned Aerial Vehicle for monitoring gully erosion in Rio de Janeiro State. In: EUROPEAN GEOSCIENCES UNION GENERAL ASSEMBLY, 2019, Viena. **Geophysical Research Abstracts - EGU 2019**. Viena: European Geosciences Union, 2019. v. 21.

GUERRA, Antônio José Teixeira. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T; SILVA, A.; BOTELHO, R.G.M. (organização). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. p. 17–340.

IBGE - FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Recomendações para Levantamentos Relativo Estático – GPS**. Rio de Janeiro: IBGE, 2008.

INCRA - INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA. **Manual Técnico de Posicionamento: georreferenciamento de imóveis rurais**. Brasília/DF: INCRA, 2013.

JULIAN, Carolina; NUNES, João Osvaldo Rodrigues. Uso de VANT e geoprocessamento para cálculo de solo erodido em voçoroca localizada no distrito de Amadeu Amaral. Marília/SP - Brasil. **Revista Brasileira De Geomorfologia**, v. 21, n. 4, p. 835-845, 2020. DOI. 10.20502/rbg.v21i4.1818

MATOS, Sérgio Luís Fabris de. **O contato entre o Grupo Passa Dois e a Formação Pirambóia na borda da Bacia do Paraná no estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Sedimentologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995. DOI. 10.11606/D.44.1995.tde-22102015-141645

MILANI, Edison J.; RAMOS, Victor A. Orogenias Paleozóicas no Domínio Sul-ocidental do Gondwana e os Ciclos de Subsidência da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 4, p. 473-484, 1998. DOI. 10.25249/0375-7536.1998473484

NIETHAMMER, Uwe. *et al.* UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. **Engineering Geology**, v. 128, p. 2-11, 2012. DOI. 10.1016/j.enggeo.2011.03.012

PETRI, Setembrino; FÚLFARO, Vicente José. **Geologia do Brasil**. São Paulo: T. A. Queiroz, 1983. 631 p. ISBN 85-850008-02-4.

PETRIE, Gordon; TOTH, Charles K. Introduction to laser ranging, profiling, and scanning. In: SHAN, J.; TOTH, C. K. **Topographic laser ranging and scanning: principles and processing**. 2ª Ed. Boca Raton: CRC Press, 2018. p. 1-28. ISBN 9781315154381.

POESEN, Jean. Soil Erosion in the Anthropocene: Research Needs. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 43, n. 1, p. 64–84, 2018. DOI. 10.1002/esp.4250

SAAD Antonio Roberto. **Estratigrafia do subgrupo Itararé no Centro Sul do Estado de São Paulo**. Dissertação (mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1977.

SELBY, Michael John. **Earth's changing surface: an introduction to geomorphology**. 5ª Ed. Oxford: Oxford University Press, 1991.

SHIN, Young Ha; LEE, Dong-Cheon. True Orthoimage Generation Using Airborne LiDAR Data with Generative Adversarial Network-Based Deep Learning Model. **Journal of Sensors**, v. 2021, n. 1, 2021. DOI. 10.1155/2021/4304548

SOARES, P. C. *et al.* O alto estrutural Pitanga-Quatiguá-Jacutinga na Bacia do Paraná: uma estrutura litosférica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39, 1996, Salvador. **Anais do XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia**. Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, 1996. p. 411-414.

TAHAR, Khairul Nizam; AHMAD, Anuar; AKIB, Wan Abdul Aziz Wan Mohd. Unmanned aerial vehicle technology for low cost landslide mapping. In: 11TH SOUTH EAST ASIAN SURVEY CONGRESS AND 13TH INTERNATIONAL SURVEYORS' CONGRESS INNOVATION TOWARDS SUSTAINABILITY, Kuala Lumpur, 2011.

TURNER, Darren; LUCIEER, Arko; DE JONG, Steven. M. Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). **Remote Sensing**, v. 7, n. 2, p. 1736-1757, 2015. DOI. 10.3390/rs70201736

VIANA, Camila Duelis. **Análise estrutural de discontinuidades baseada em técnicas de structure from motion: aplicação em mina a céu aberto**. Dissertação (Mestrado em Geotectônica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. DOI. 10.11606/D.44.2015.tde-08072015-150656

VIANA, Camila Duelis, *et al.* Structural analysis of clastic dikes using Structure from Motion - Multi-View Stereo: a case-study in the Paraná Basin, southeastern Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 48, n. 4, p. 839-852, 2018. DOI. 10.1590/2317-4889201800201898

WARRICK, Jonathan A., *et al.* New Techniques to Measure Cliff Change from Historical Oblique Aerial Photographs and Structure-from-Motion Photogrammetry. **Journal of Coastal Research**, v. 33, n. 1, p. 39–55, 2017. DOI. 10.2112/jcoastres-d-16-00095.1

WESTOBY, Matthew J. *et al.* 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300-314, 2012. DOI. 10.1016/j.geomorph.2012.08.021