

Structure from Motion (SfM) – Uma Breve Revisão Histórica, Aplicações nas Geociências e Perspectivas Futuras

Structure from Motion (SfM) - A Brief Historical Review, Applications in Geosciences and Future Perspectives

Guilherme Gandra Franco¹  & André Naime² 

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, MG, Brasil

²Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), Belo Horizonte, MG, BR

E-mails: guigandra@yahoo.com.br; andre.naime.ibama@gmail.com

Resumo

O presente artigo de revisão narra a trajetória de um dos algoritmos mais utilizados na fotogrametria com Veículo Aéreo não Tripulado (VANT), que a partir da visão computacional, tem se destacado como solução de baixo custo para obtenção de informações da superfície terrestre. Apesar de sua concepção ter sido formulada em meados da década de 1950 e com propósitos distantes das geociências, foi a partir dos avanços da indústria da computação e robótica, no início da década de 1980, que o *Structure from Motion* (SfM) absorveu significativas melhorias para consagrá-lo como um importante recurso de modelagem tridimensional. No entanto, somente na última década (2010), observou-se um exponencial crescimento nas aplicações e análises do SfM nas geociências, principalmente a partir da popularização dos VANTs. Com isso, vieram à tona suas principais aplicações e limitações – neste estudo também serão abordadas suas características, principalmente as que diferem de técnicas já consagradas como o LiDAR, e perspectivas futuras dessa tecnologia.

Palavras-chave: Visão computacional; Fotogrametria; VANT

Abstract

This review article addresses the trajectory of one of the most applied algorithms in photogrammetry with UAV, which from a computer-vision standpoint has stood out as a low-cost solution to obtain information about the earth's surface. Although its conception was formulated in the mid-1950s and with purposes far from geosciences, it was from the advances of the computer and robotics industry in the early 1980s that Structure from Motion (SfM) absorbed significant improvements to enshrine it as an important three-dimensional modeling resource. However, only in the last decade (2010), there was an exponential growth in the applications and analysis of SfM in geosciences, mainly from the popularization of UAVs. With that, its main applications and limitations emerged – in this study, the characteristics will also be addressed, especially those that differ from established techniques such as LiDAR and future perspectives of this technology.

Keywords: Computational Vision; Photogrammetry; UAV

1 Introdução

A computação gráfica assume dois papéis no cotidiano humano: o primeiro como uma arte de comunicação visual e o segundo como uma ciência transdisciplinar embarcada por métodos físicos e matemáticos entre computadores e displays (Hughes et al. 2013). Ainda que sua origem seja datada dos anos 1950, passou por um célere progresso a partir da popularização dos computadores em face dos avanços técnicos alcançados pelos processadores e pelo armazenamento em disco, sobretudo no final da década de 1970. Pode-se também fazer um paralelo da corrida da computação gráfica com a indústria do entretenimento de *video games* e cinema. Neste período, surgem o console de jogos Atari e o estúdio *Lucas Film*, que marcou gerações com o lançamento da saga *Star Wars*, com significativos avanços no uso de recursos de computação gráfica em movimento *wire-frame* – cena *Death Star Briefing*, em *Episode IV, A New Hope*, 1977 (Grahame 2008).

Contudo, apesar de pouco abordado nos estudos que envolvem modelagem tridimensional computadorizada, sabe-se que o estado da arte destas técnicas absorvera determinados processos de maturação criados há algumas décadas. Um dos principais estudos foi o experimento analógico denominado *Kinetic Depth Effect* (Wallach & O'Connell 1953) no qual o psicólogo Hans Wallach analisou a percepção de projeções tridimensionais a partir da animação ou movimento de imagens. O ensaio consistiu em uma ilustração de um cubo de arame estático com uma sombra projetada. Naturalmente, o observador absorve a projeção ortográfica bidimensional. No entanto, quando a figura passa por um processo de animação, rotacionando em seu próprio eixo, o cérebro humano simula a percepção de tridimensionalidade a partir da movimentação das arestas da figura (Ullman 1979).

Segundo Wagemans (2015), foi a partir desses estudos que o cientista da computação Shimon Ullman, do Laboratório de Inteligência Artificial do *Massachusetts Institute of Technology (MIT)*, formulou na década de 1970, em ambiente computacional, o que viria a ser o protótipo de um dos algoritmos de modelagem tridimensional mais relevantes na aerofotogrametria moderna, o *Structure from Motion (SfM)*. A principal questão do seu teorema consistia na inferência tridimensional de um bloco a partir de projeções bidimensionais, uma vez que nenhuma informação 3D é transmitida nas projeções individuais. Para a demonstração do *SfM*, foram projetados em um monitor dois cilindros, cada um deles definido por 100

pontos espalhados randomicamente em sua superfície lateral (Figura 1). As coordenadas de cada um dos pontos foram armazenadas na memória do computador. Passou-se então a simular a rotação dessa projeção do cilindro em 36 posições a cada 10° em determinado intervalo de tempo no sentido horário. As primeiras percepções tridimensionais puderam ser abstraídas nas próprias projeções quando colocadas em movimento, uma vez que a densidade dos pontos se concentrava nas bordas do cilindro, proporcionando noções de profundidade. Ao analisar as figuras estáticas, segundo Ullman (1979), cada quadro da apresentação era uma visão desconhecida e irreconhecível dos dois cilindros, indicando que a familiaridade e reconhecimento não são pré-requisitos para a interpretação do movimento.

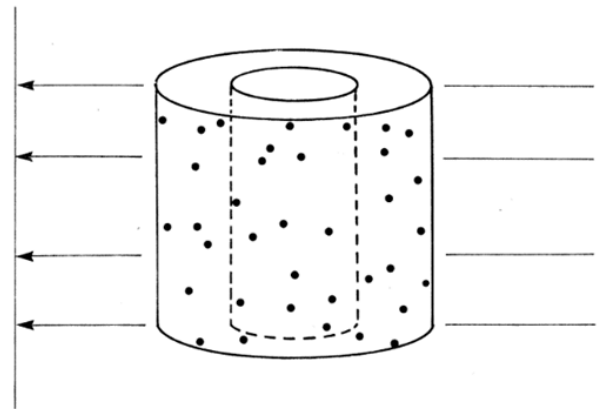


Figura 1 Modelo de Ullman.

Fonte: Ullman (1979).

A partir do experimento dos cilindros, Ullman absorve a ideia de que os pontos projetados seriam a chave para a modelagem tridimensional. Segundo o autor, uma reconstrução métrica única é possível a partir de três projeções contendo quatro pontos. Para formular tal correspondência, foram dados então os pontos O, A, B e C em três projeções ortográficas P1, P2 e P3 (Figura 2).

O teorema de Ullman baseou-se também no estudo de Kruppa (Snavely 2008) no ano de 1913, que inferiu a trigonometria como chave para a definição dos parâmetros tridimensionais de dada projeção. Para tal, Ullman definiu uma coordenada no ponto O, e através do relacionamento cartesiano, foram atribuídas coordenadas aos pontos A, B e C. O *motion* assumido se deu através da rotação e translação das cenas P1, P2 e P3. Dado que a, b e c sejam os vetores que conectam o ponto O aos pontos A, B e C, pode-se obter as coordenadas tridimensionais de cada ponto.

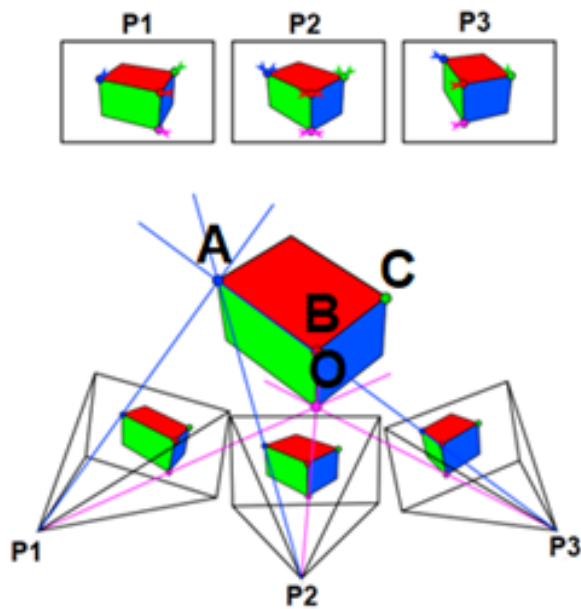


Figura 2 Modelo lógico do SfM. Galland et al. 2016.

Fonte: Application of open-source photogrammetric software MicMac for monitoring surface deformation in laboratory models. Journal of Geophysical Research.

2 O Desenvolvimento do SfM na Computação Moderna

Absorvendo o relacionamento de pontos e seu elevado potencial para modelagem tridimensional, Lucas & Kanade (1981) desenvolveram o método de estimativa do fluxo óptico que viria a se tornar o algoritmo mais popular para a estereoscopia digital. Segundo Campoy et al. (2008), a maioria dos elementos referenciais em uma imagem possui uma posição bem definida, por exemplo, as geometrias das formas representadas na matriz. Com isso, o algoritmo funciona a partir de duas premissas: a primeira é que a intensidade de pixels deve existir para que uma geometria possa ser bem identificada e a segunda está relacionada à mudança na posição das feições em diferentes cenas, que deve ser mínima. Por exemplo, dada uma feição p_i com coordenadas (X, Y) na cena I_k , o rastreador tentará encontrar a mesma posição na feição seguinte I_{k+1} que formula a expressão $p'_i = (X, Y) + t$ onde:

$t = (t_x, t_y)$ sendo t o vetor do movimento entre as duas cenas e pode ser definido pela função 1:

$$e(t) = \sum (I_k(p_i) - I_{k+1}(p_i+t))^2 w(W) \quad (1)$$

Onde:

$w(x)$ é uma função para atribuir pesos diferentes à janela de comparação W .

Esse fenômeno é denominado *motion tracking*, que resulta em dezenas de vetores dispostos aleatoriamente nas cenas. Campoy et al. (2008) atribuem a seleção randômica das feições ao algoritmo *Random Sample Consensus (RANSAC)* desenvolvido por Fischler & Bolles em 1981. Segundo Campoy, o *RANSAC* seleciona aleatoriamente um subconjunto de pontos que são submetidos a testes e este procedimento é repetido até que sejam eleitos os melhores pontos para a composição da movimentação da feição. Portanto, Fischler & Bolles (1981) buscam, com o *RANSAC*, se oporem a algumas técnicas correntes a fim de reduzir a quantidade de pontos *landmarks* para melhorias no tempo de resposta da modelagem tridimensional.

Contemporâneo ao estudo de Lucas & Kanade (1981), Hans P. Moravec, do instituto de robótica da *Carnegie-Mellon University*, publica o artigo *Rover Visual Obstacle Avoidance*, que também trata dos referenciais das cenas, no entanto, a partir das quinas dos objetos (*corners*) como elementos chave para a detecção da geometria tridimensional. A aplicabilidade do seu estudo era sistematizar o caminhamento de um robô com aptidão para desviar de obstáculos em seu percurso, mas serviu também como premissa para que em 1988 desenvolvessem o algoritmo *Corner and Edge Detector*. O estudo consistiu no aprimoramento dos detectores de quinas, ao desenvolver um algoritmo que respondia à identificação das curvas e bordas nas cenas (Harris & Stephens 1988). Mais tarde, em 1999, David Lowe, do departamento de computação da *University of British Columbia*, Canadá, publicou no Congresso Internacional de Computação Visual do ano de 1999 o artigo *Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints*, no qual apresenta o *Scale Invariant Feature Transform (SIFT)*, aquele que viria a ser o algoritmo base para a estereoscopia digital do SfM utilizado em um dos mais populares programas de aerofotogrametria do mercado, o Agisoft Metashape (Shervais 2016), a partir dos *keypoint descriptors*.

Segundo Lowe (2004), o *SIFT* é composto por 4 estágios. O primeiro consiste na detecção da escala do espaço das cenas, seguido da localização dos *keypoints* para a correspondência. Assim, são atribuídas as orientações das cenas para que por fim ocorra a mensuração dos dados de iluminação e distorção dos pontos – *keypoint descriptors* (Figura 3). Sumariamente, é descrito como um mecanismo de busca dos melhores pontos homólogos entre as diferentes cenas que tem como resultante uma nuvem de pontos tridimensional esparsa obtida pelo *Bundle Adjustment* (Westoby et al. 2012).

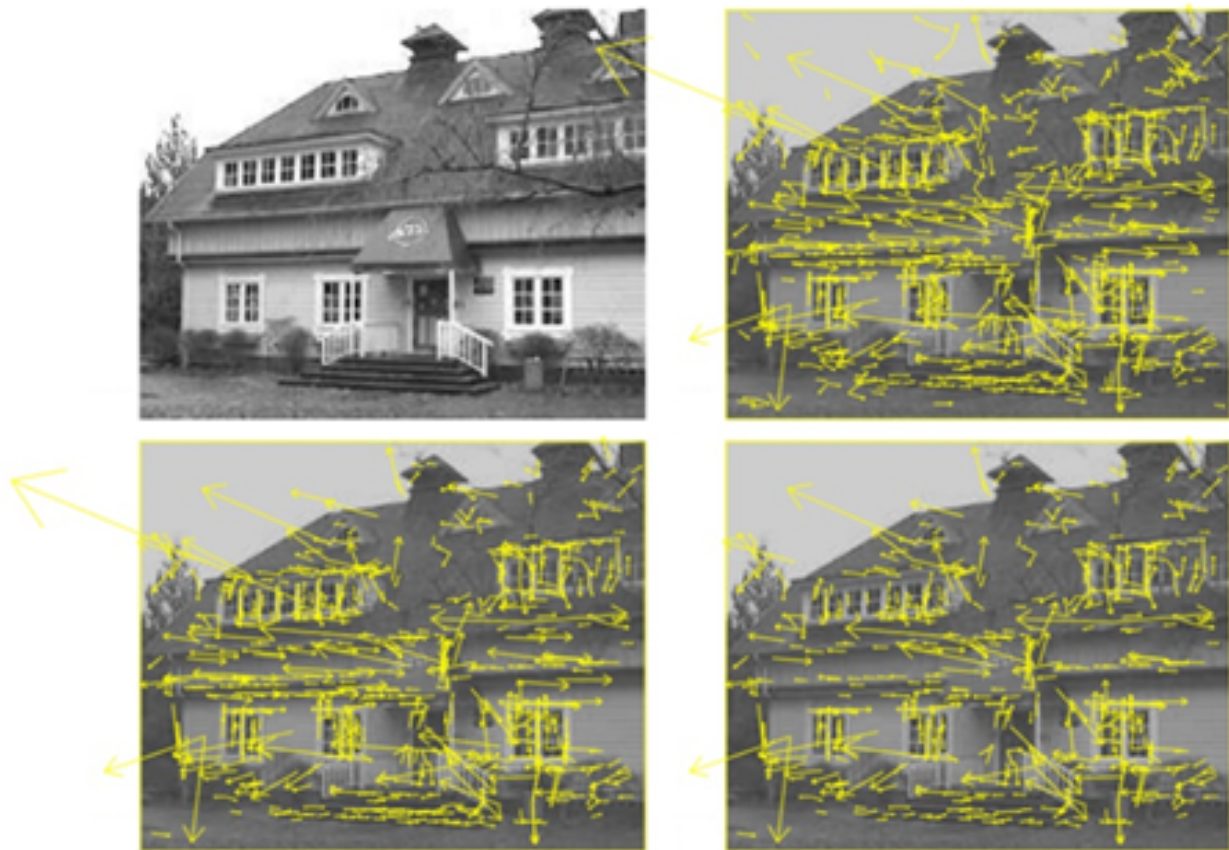


Figura 3 Identificação dos keypoints. Lowe, 2004. *Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision.*

As virtudes do *SIFT* fazem dele um algoritmo versátil para aplicações em vários campos da ciência que demandam modelagem tridimensional, principalmente quando se coleta dados com variância da rotação, escala e pequenas mudanças na iluminação (Silveira et al. 2011).

A partir da seleção dos *keypoints*, aplica-se então o algoritmo *Bundle Adjustment*, que cumpre um importante papel na consolidação dos dados oriundos da trigonometria tridimensional do *SfM*. De acordo com Jubanski (2005), após o registro dos *keypoints* nas cenas, estabelece-se uma conexão entre seu feixe de luz com o centro perspectivo da câmera. Para tal, o algoritmo busca encontrar essas posições de pontos 3D e parâmetros da câmera que minimizem o erro de reprojeção dos pontos homólogos entre os diferentes pares de cenas a partir de um problema de mínimos quadrados não linear, em que o erro é o quadrado da diferença entre a localização da característica observada e a projeção do ponto 3D correspondente no plano da imagem (Agarwal et al. 2010). Como resultante desse ajuste, obtém-se a nuvem esparsa de pontos homólogos, a primeira representação de um bloco tridimensional do

SfM da qual derivará a nuvem de pontos densa a partir do *Multi-view Stereo – MVS*.

O *MVS* consiste em densificar a nuvem esparsa a partir da vasta coleção de cenas de um objeto por diferentes posições e o estabelecer como um sólido. Para isso, independentemente do ângulo de captura, deve-se obter uma taxa de sobreposição entre as cenas que varia entre 60 e 80% (Verhoeven et al. 2012). Datado do início dos anos 2000, o algoritmo passa a compor o conjunto de operações configuradoras do *SfM*. Com isso, finaliza o longo processo evolutivo de três décadas, exemplificado na Figura 4.

Apoiados nesse conjunto de algoritmos, processos de criação de malhas triangulares (*TIN*), de sólidos e de ortomosaicos, capazes de expressar feições centimétricas da paisagem, passam a ser permitidos nos mais diversos programas especialistas disponíveis no mercado. Neste momento, a Fotogrametria é instigada a absorver os proveitos citados acima. Como consequência, observa-se um pico na produção científica – plataforma Scopus nos últimos 20 anos (Figura 5) –, no qual foi quantificada a produção de periódicos com as palavras chaves *photogrammetry* e a sigla *SfM*.

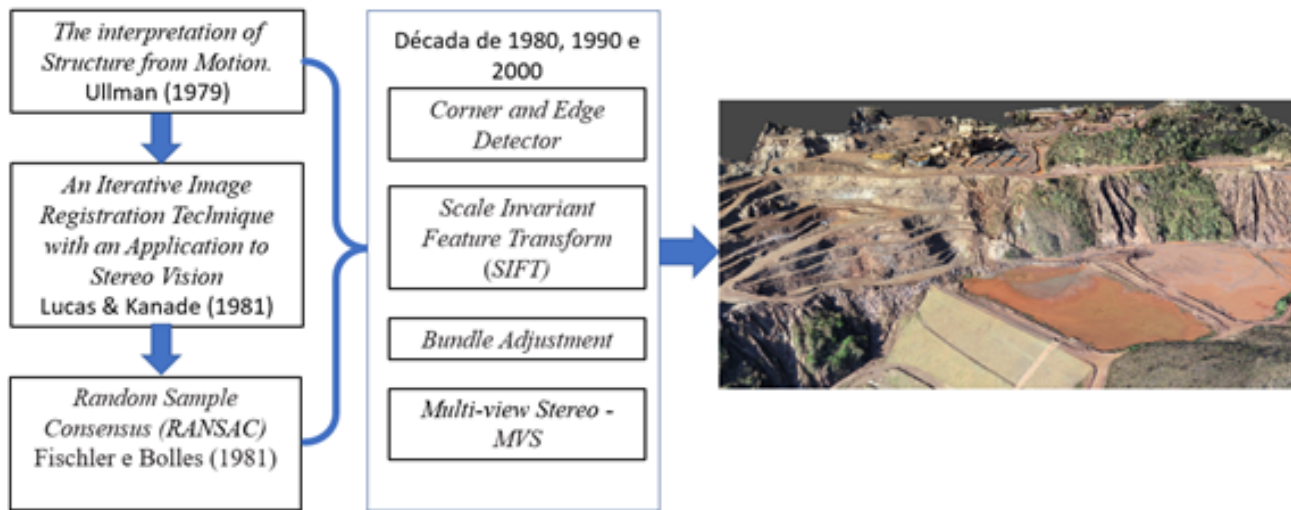


Figura 4 Resumo das operações e cronologia do SfM.

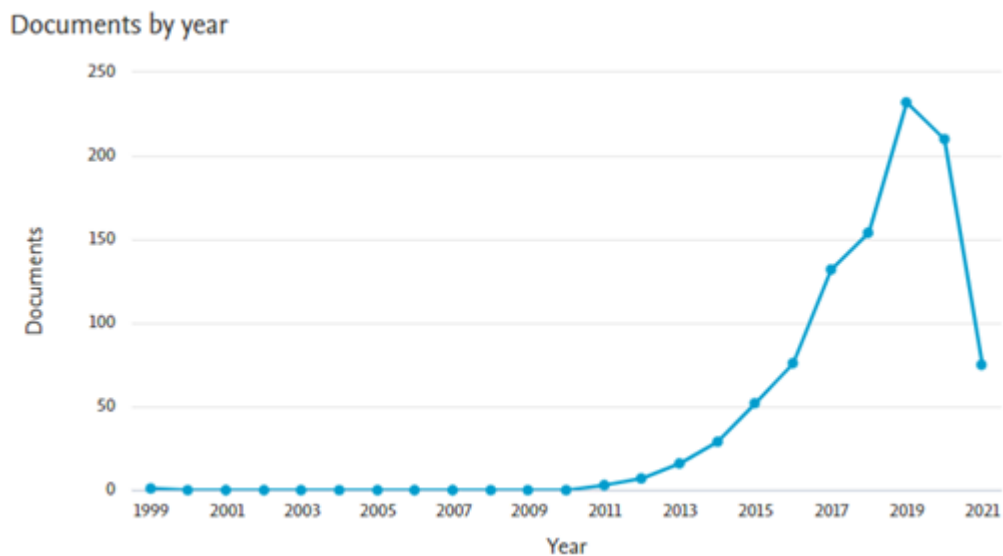


Figura 5 Bibliometria do tema fotogrametria associada com *Structure From Motion* na plataforma Scopus 2021.

Salvo os anos de 2020 e 2021, que ocasionalmente apresentou um decréscimo de publicações, possivelmente por influência da pandemia de COVID-19 e *lockdown* na grande maioria dos países, pôde-se observar que o assunto obteve um salto significativo, principalmente a partir de 2013, muito em função da popularização dos VANTs.

3 O SfM nas Geociências

A consulta bibliométrica combinada dos termos *SfM* e Fotogrametria naturalmente apontou um processo de maturação inicial, com um pequeno número de trabalhos

pautados em testes e avaliações dos modelos tridimensionais gerados com o algoritmo. Jebara, Azarbayejani & Pentland (1999) publicaram, na *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society*, o artigo denominado *3D Structure from 2D Motion*, com ensaios práticos em ambientes externos e internos para verificação das características e limitações de suas aplicações. Nesse contexto, ressalta-se a importante capacidade da transdisciplinaridade do *SfM*, que outrora transitava unicamente nas áreas computacionais, ao ser introduzido em um periódico exclusivo de Sensoriamento Remoto. No entanto, somente na década seguinte estudos práticos começam a ocupar um papel de destaque nas

publicações científicas. *Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application*, de James & Robson (2012), expôs testes de acurácia posicional cartográfica de mapeamentos na escala 1:1.000. O estudo se deu a partir da combinação de coordenadas precisas coletadas por receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e estações totais, com pontos referenciados em três Modelos Digitais de Superfície. Os resultados indicaram que, devido aos baixos valores de Erro Máximo de Escala em 0,2% observados nos testes, a cartografia poderia absorver práticas com o *SfM*.

Martín et al. (2013) salientou a alta capacidade de detalhamento superficial da nuvem de pontos do *SfM* para extração de perfis geológicos no artigo *Construction of accurate geological cross-sections along trenches, cliffs and mountain slopes using photogrammetry*, no qual foi possível ofertar uma solução análoga a métodos convencionais de levantamento topográfico com o uso de instrumentação óptica, porém mais rápida.

Destaca-se também o estudo de Nakano et al. (2014), que pôde mensurar, em escala temporal, a área ocupada e o volume de lava vulcânica pós erupção depositada na ilha de Ogasawar, comparando-os com a topografia primitiva do local, no artigo *Landform monitoring in active volcano by UAV and SfM-MVS technique*. Tal metodologia possibilitou a utilização dos dados de terreno para estimativas precisas de área e massa com operações seguras em áreas de risco, devido ao fato de a coleta ser efetuada por sensores remotos.

Na geomorfologia, Prosdocimi et al. (2015), considerando o *SfM* como uma solução de baixo custo, buscaram mapear processos erosivos em canais de drenagem com câmeras compactas de celulares para serem comparados com os fornecidos por *Light Detection And Ranging* (LiDAR). *Bank erosion in agricultural drainage networks: New challenges from structure-from-motion photogrammetry for post-event analysis* (2015) utilizou o parâmetro Índice de Rugosidade dos dois Modelos Digitais de Superfície (MDS) e concluiu que ambas as metodologias são capazes de fornecer mensurações semelhantes. Nesse mesmo período, o espaço urbano passa também a figurar nas aplicações do algoritmo. Yoshimura et al. (2016), em *Automatic registration of MLS point clouds and SfM meshes of urban area*, propõem uma nova metodologia de combinação de dados LiDAR com o *SfM* para modelagem tridimensional detalhada de edificações e registros de classificação supervisionada.

No Brasil, destacam-se as primeiras publicações baseadas em fotogrametria e *SfM* a partir do registro fotográfico terrestre para a produção de inventário arquitetônico cultural. Campos et al. (2015), no artigo *Data*

Product Specification Proposal for Architectural Heritage Documentation with Photogrammetric Techniques: A Case Study in Brazil, testam a acurácia do *SfM* para a elaboração de um inventário digital contendo a escultura de Prudente de Moraes e o modelo tridimensional da estação ferroviária, ambos no município de Presidente Prudente, no estado de São Paulo. Os resultados da estação atenderam excelentes limites de RMSE – métrica de qualidade posicional do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) vigente no Brasil – com valores de 0,010 m (Classe A) para a escala de 1:50, entretanto, a estátua apresentou desvios de 1,83 cm (Classe B) para a escala de 1:10. Graça, Mitshita & Gonçalves (2014), no artigo *Photogrammetric Mapping Using Unmanned Aerial Vehicle*, também realizaram testes posicionais com GNSS de precisão para checagem da ortofoto e MDT produzidos por aerolevantamento subsidiado pelo aeromodelo Pípir J3 Hydro, com uma câmera Sony Cyber-shot DSC-W300 acoplada. Com o uso desses equipamentos, foi possível observar erros de 45 cm no bloco aerofotogramétrico. Ainda que os resultados não tenham sido satisfatórios, os autores já sinalizavam quais seriam as possíveis melhorias da técnica e não descartaram a metodologia do *SfM* para aplicações futuras.

Assim como o estudo citado de James & Robson (2012), a introdução da técnica no ambiente científico brasileiro inicialmente buscou validar testes e verificações posicionais para que demais estudos com *SfM* pudessem ser aplicados e chancelados por aplicações multidisciplinares. Independentemente da categoria de análise mapeada, centenas de outros estudos foram publicados e o exponencial aumento constatado no uso do *SfM* na fotogrametria e na modelagem de cenários também trouxe à tona aquela que seria a principal fraqueza do algoritmo – a extração de dados do terreno natural, principalmente sob florestas ou vegetação densa. Esse processo, tão simplificado com os sensores LiDAR, limita o *SfM* a representar efetivamente a superfície registrada, uma vez que sua concepção ocorre a partir de uma vasta coleção de fotografias, nas quais o plano projetado no Dispositivo de Carga Acoplada da câmera é a única informação a ser trabalhada para a modelagem tridimensional (Figura 6).

Essa falha pode ser contornada através de filtros classificadores que excluem objetos indesejados, manualmente ou através de algoritmos de seleção automática de feições. O programa Agisoft Metashape Pro, por exemplo, tem se destacado no mercado por apresentar parâmetros para classificar a nuvem de pontos e possibilitar a extração das feições que não pertencem ao terreno natural. São eles:

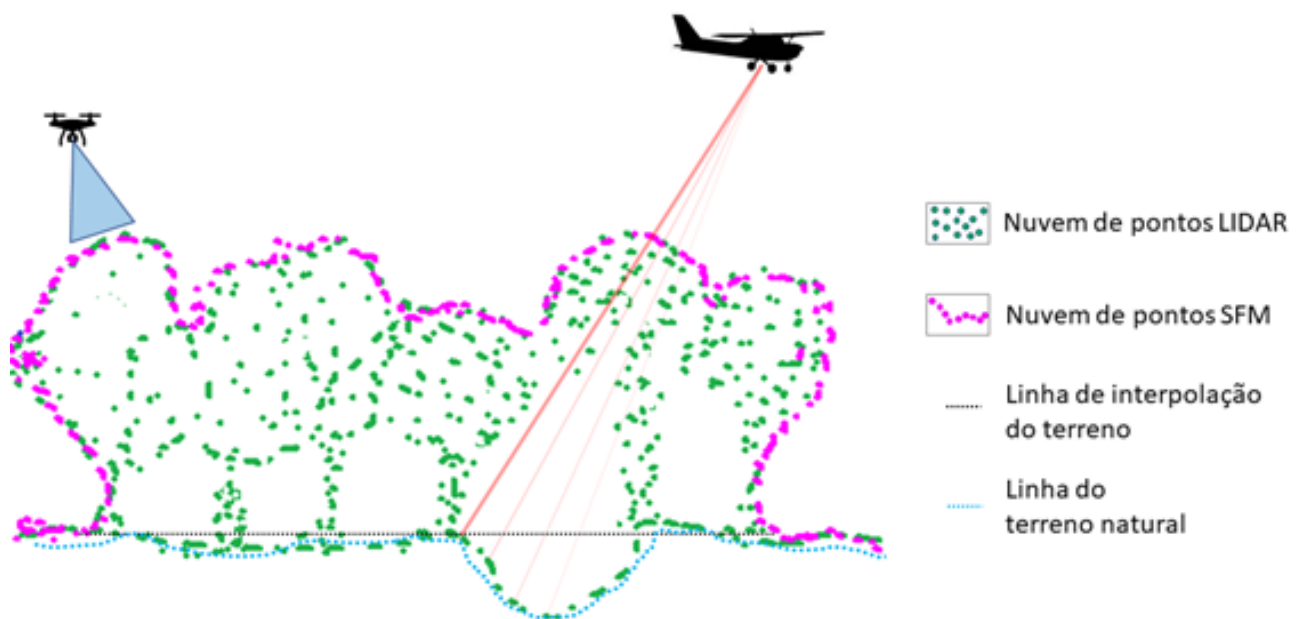


Figura 6 Comparativo do *LiDAR* versus *SfM*.

Ângulo máximo – primeira condição checada –, que consiste em uma limitação de ângulo projetado na linha do solo e os pontos vizinhos próximos, ou seja, todo objeto acima do ângulo estabelecido será eliminado da nuvem de pontos. Distância máxima, que compreende no tamanho do objeto avaliado em relação ao solo, definida por metros e, por fim, Tamanho da célula, que representa o aglomerado de pontos da nuvem a ser dividido como uma etapa preparatória no procedimento de classificação de pontos básicos.

Além disso, como alternativas de melhoria no processo de filtragem, o programa é capaz de realizar classificações supervisionadas a partir da composição *RGB* do ponto e seu agrupamento. Conforme dados do fabricante (Agisoft Metashape 2020), são utilizados algoritmos proprietários de inteligência artificial para a identificação dessas classes de uso e ocupação da superfície terrestre, como: estradas, florestas, pastagens, edificações, dentre outros. Após o operador eliminar todas as classes não compreendidas como elemento do terreno natural, ocorre um preenchimento dos espaços vazios com vetores que formam triângulos, oriundos da nuvem de pontos de terreno mais próxima. Dessa forma, a malha triangular reformula o Modelo Digital de Terreno, todavia, tal técnica se torna incapaz de definir qualquer variação contida nestes espaços interpolados, como demonstrado na Figura 6. Mesmo com essa limitação, a técnica de filtragem e interpolação pode ser bem-vinda em estudos em áreas com pouca densidade de vegetação.

Outro limitador do *SfM*, agora exclusivamente em veículos aéreos que voam em baixas altitudes, é a necessidade de acompanhamento da variação do gradiente do terreno para que o *SIFT* consiga identificar os pontos homólogos a partir da sobreposição entre as diversas fotos capturadas. Em razão do ângulo de abertura da câmera e da variação de altitude da superfície mapeada, algumas áreas podem não ser cobertas e, com isso, a identificação dos *keypoints* fica limitada somente a áreas com sobreposição (Figura 7).

Uma vez que o primeiro processo do *SfM* é a busca desses pontos homólogos, em alguns programas denominado “alinhamento das fotos”, os buracos e a ausência de correspondência são transmitidos para as fases posteriores, que acabam comprometendo a qualidade da ortofoto e do MDS. Para contornar esse problema, alguns programas de automação de voos contêm dados da superfície do terreno para dimensionamento da altitude da missão (Figura 7). É carregado o MDT oriundo da missão *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, que mapeou todo o globo terrestre com sensores de radar e entregou uma matriz com *ground sample distance (GSD)* de 90 metros, contendo o valor médio da cota em cada pixel. Em contrapartida, os voos automatizados nesses programas são executados em velocidades mais baixas do que os mesmos realizados nos voos horizontais, reduzindo a capacidade de recobrimento de áreas, no entanto, garantindo a sobreposição lateral e longitudinal configurada.

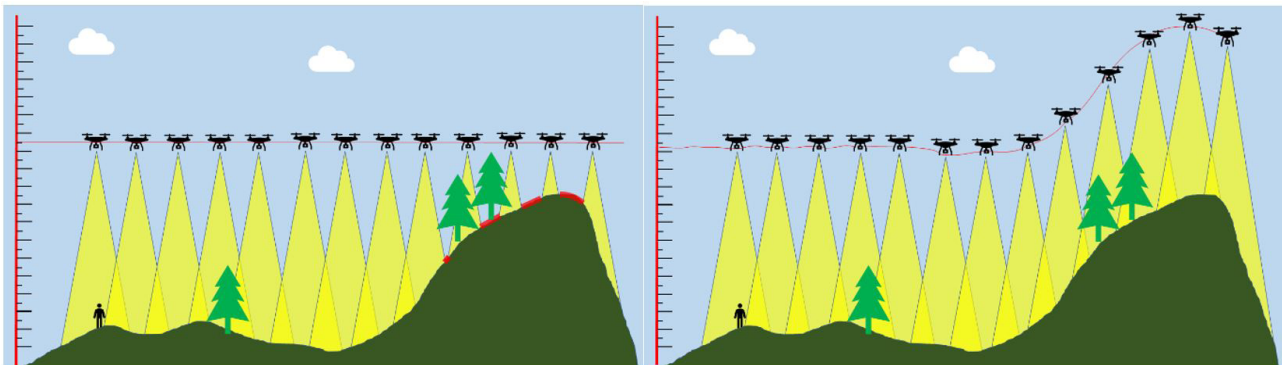


Figura 7 Comparativo de voo com altitude fixa (esquerda) com altitude relativa ao solo (direita).

4 Perspectivas e Conclusões

Como observado, o *SfM*, comumente tratado como uma unidade, configura-se como um conjunto de algoritmos que, apesar dos avanços significativos na visão computacional, operações de filtragem e classificação associadas aos interpoladores, não operam bons resultados nos conglomerados de vegetação, exclusivamente por ser incapaz de capturar a morfologia do solo, escondida pelo dossel das árvores. Para esses casos, o *LiDAR* se configura como uma opção recomendada, porém, restritiva, uma vez que os elevados custos dessa tecnologia, associados ao

elevado consumo de energia e ao peso dos sensores – que permitem serem transportados em veículos com um alto *payload* –, fazem com que muitos projetos de mapeamento sejam inviabilizados. De acordo com Graham (2018), alguns equipamentos chegam a custar quantias acima de U\$100.000,00, no entanto, deve-se ainda considerar os custos com mão de obra, aeronaves, licenças e insumos. Quando embarcado nos VANTs, o *LiDAR* consome a mesma fonte de energia dos motores que sustentam o equipamento no ar, o que reduz sua autonomia de voo em taxas acima de 50% em relação a um voo convencional (Figura 8).



Figura 8 Drone Matrice 600 PRO do fabricante DJI com sensor LiDAR embarcado.

A Tabela 1 representa de forma simplificada alguns equipamentos empregados nos serviços de modelagem tridimensional, seus respectivos custos e características. O período de referência da pesquisa foi o mês de maio de 2021, considerando valores de mercado praticados nos Estados Unidos em lojas como Amazon ou no próprio catálogo eletrônico dos fabricantes dos equipamentos listados. Nota-se que há uma discrepância exacerbada entre o SfM e a tecnologia LiDAR, onde o valor do primeiro correspondeu a 1,45% do valor do seu concorrente.

A resposta otimista para a rápida absorção dessa tecnologia na fotogrametria subsidiada por VANTs pode estar na indústria de telefonia celular. No ano de 2020 a fabricante Apple lançou, em seus dispositivos móveis profissionais, sensores LiDAR de curto alcance para modelagem tridimensional. Com a compactação desse recurso apto a ser transportado no bolso, pode-se prever que, em um curto prazo, as geociências poderão ser beneficiadas com esses recursos tecnológicos embarcados em pequenas aeronaves não tripuladas, o que facilitaria a coleta de dados topográficos de grandes áreas cobertas por vegetação. Ilici

& Toth (2020), no artigo *High-Definition 3D Map Creation Using GNSS/IMU/LiDAR Sensor Integration to Support Autonomous Vehicle Navigation*; Tang et al. (2020), em *Performance Test of Autonomous Vehicle Lidar Sensors Under Different Weather Conditions*; e Kumar, Karthika & Soman (2020), em *Stereo Camera and LIDAR Sensor Fusion-Based Collision Warning System for Autonomous Vehicles*, também sinalizam que a partir da corrida por otimizações dos veículos autônomos, a indústria automobilística tem colhido bons resultados com a tecnologia LiDAR e, com isso, um iminente aumento de escala produtiva poderá reduzir os elevados custos desses sensores.

Em aplicações como as aqui descritas, bem como nas centenas de outros estudos já realizados, o SfM, que surgiu a partir de inspirações no campo da psicologia, se consolidou na computação e foi incorporado às geociências, faz jus a sua popularidade e se consagrou como um conjunto de algoritmos indispensáveis para a obtenção de dados com baixo custo e alto nível de detalhamento das formas da superfície mapeada, com longa aplicabilidade, apesar de suas limitações.

Tabela 1 Resumo técnico dos sensores utilizados para modelagem tridimensional.

Veículo aéreo	Custo do veículo novo USD	Sensor	Custo do sensor USD	Custo total da solução USD	Autonomia de voo (km linear)	Área mapeada por voo	Tempo gasto para liberação de voo	Altura de voo (m)
DJI Phantom 4 PRO	\$1.600,00	Cmos (20MP)	–	\$1.600,00	18	< 60 hectares	1 dia	120
DJI Matrice 600 PRO	\$6.500,00	LiDARit Eagle X	104.000	\$110.550,00	7	< 20 hectares	1 dia	120
Cessna 182	\$300.000,00	Leica CityMapper Airborne	78.000	\$378.000,00	2.000	> 10.000 hectares	Até 30 dias	1.000

5 Referências

- Agarwal, S., Snavely, N., Seitz, S.M., Szeliski, R. 2010, 'Bundle Adjustment in the Large', *Computer Vision*, vol. 6312, pp. 29-42.
- Agisoft Metashape 2020, *User Manual Professional Edition, Version 1.6*, acesso em 25 Jan 2021, <https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_6_en.pdf>
- Campos, M., Tommaselli, A., Ivánová, I. & Billen, R. 2015, 'Data Product Specification Proposal for Architectural Heritage Documentation with Photogrammetric Techniques: A Case Study in Brazil'. *Remote Sensing*, vol. 7, no. 10, pp. 13337-63. <http://dx.doi.org/10.3390/rs71013337>
- Campoy, P., Correa, J.F., Mondragón, I., Martínez, C., Olivares, M., Mejias, L., Artieda J. 2008, 'Computer Vision Onboard UAVs for Civilian Tasks', *International Symposium on Unmanned Aerial Vehicles*, pp. 105-35. <https://core.ac.uk/download/pdf/148653348.pdf>
- Fischler, M.A., Bolles, R.C. 1981, 'Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography', *Communications of the ACM*, vol. 24, pp. 381-95. <https://doi.org/10.1145/358669.358692>
- Galland, O., Bertelen, H. S., Guldstrand, F., Girod, L. 2016, 'Application of open-source photogrammetric software MicMac for monitoring surface deformation in laboratory models', *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 121, no. 4, pp. 2852-72. <https://doi.org/10.1002/2015JB012564>
- Graça, N., Mitishita, E., Gonçalves, J. 2014, 'Photogrammetric Mapping Using Unmanned Aerial Vehicle', *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-1, pp. 129-33. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-129-2014>
- Graham, L. 2018, Drone Mapping – SfM versus Low Precision LIDAR, acesso em 10 Dezembro 2020, <<https://support.geocue.com/drone-mapping-sfm-versus-low-precision-lidar/>>.
- Grahame, J. 2008, *Star Wars: Prehistoric Computer Graphics*, acesso em 10 Dezembro 2020, <<https://www.retrothing.com/2008/04/star-wars-prehi.html>>.
- Harris, C. & Stephens, M. 1988, 'A Combined Corner and Edge Detector', *Proceedings of The 4th Alvey Vision Conference*, pp. 147-51. <http://www.bmva.org/bmvc/1988/avc-88-023.pdf>

- Hughes, J. F., Dan, A., Mcguire, M., Sklar, D. F., Foley, J. D., Feiner, S. K., Akeley, K. J. F. 2013, *Computer graphics: Principles and practice*. Addison-Wesley, USA.
- Ilici, V., Toth, C. 2020, 'High-Definition 3D Map Creation Using GNSS/IMU/LIDAR Sensor Integration to Support Autonomous Vehicle Navigation', *Sensors*, vol. 20, no. 3, p. 899. <https://doi.org/10.3390/s20030899>
- James, M. R., Robson, S. 2012, 'Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application', *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, vol. 117, no. F3. <https://doi.org/10.1029/2011JF002289>
- Jebara, T., Azarbayejani, A., Pentland, A. 1999, '3D structure from 2D motion', *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 16, no. 3, pp. 66-84. <https://doi.org/10.1109/79.768574>
- Jubanski, J. J. 2005, 'Desenvolvimento e avaliação de um sistema de vôo apoiado por GPS para aerotriangulação por feixes de raios', Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. <http://educapes.capes.gov.br/handle/1884/3874>
- Kumar, A., Karthika, R., Soman, K. P. 2020, 'Stereo Camera and LIDAR Sensor Fusion-Based Collision Warning System for Autonomous Vehicles', *Advances in Computational Intelligence Techniques* pp. 239-52. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-2620-6_17
- Lowe, D.G. 2004, 'Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints', *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, pp. 91-110. <https://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/ijcv04.pdf>
- Lucas, B. D., Kanade, T. 1981, 'An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision', *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 121-30.
- Martín, S., Uzkeđa, H., Poblet, J., Bulnes, M., Rubio, R. 2013, 'Construction of accurate geological cross-sections along trenches, cliffs and mountain slopes using photogrammetry', *Computers & Geosciences*, vol. 51, pp. 90-100. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.09.014>
- Moravec, H. 1981, 'Rover Visual Obstacle Avoidance', *Proceedings of the 7th international joint conference on Artificial intelligence*, vol. 2, pp. 785-90. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/1623264.1623304>
- Nakano, T., Iwahashi, J., Kamiya, I., Nakajima, H., Tobita, M. 2014, 'Landform monitoring in active volcano by UAV and SFM-MVS technique', *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-8, pp. 71-5. <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-8-71-2014>
- Prosdociami, M., Calligaro, S., Sofia, G., Fontana, G., Tarolli, P. 2015, 'Bank erosion in agricultural drainage networks: new challenges from structure-from-motion photogrammetry for post-event analysis', *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 40, no. 14, pp. 1891-906. <https://doi.org/10.1002/esp.3767>
- Scopus 2021, Pesquisa com as palavras-chave: Fotogrametria e SfM. Acessada em Maio de 2021, <<https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sid=ef146539d71adfc54efd8f62a6dc7e&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY+%28SFM%2c+photogrammetry%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=35&count=946&analyzeResults=Analyze+results&txGid=72c6b7bc10c617ea8eef955486c8234a>>
- Shervais, K. 2016, *Structure from Motion (SfM) Photogrammetry Field Methods Manual for Students* acessado em 23 Setembro 2020, <https://d32ogoqmya1dw8.cloudfront.net/files/getsi/teaching_materials/high-rez-topo/sfm_field_methods_manual.v3.pdf>
- Silveira, M. T., Feitosa, R. Q., Brito, J., Jacobsen, K. 2011, 'Correspondência eficiente de descritores SIFT para construção de mapas densos de pontos homólogos em imagens de sensoriamento remoto', *Boletim de Ciências Geodésicas*, vol. 17, no. 1, pp. 130-60. <https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/21162>
- Snavely, N. 2008, 'Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections: A Survey', Tese de Doutorado, University of Washington. <https://www.cs.cornell.edu/~snave/publications/thesis/thesis.pdf>
- Tang, L., Shi, Y., He, Q., Sadek, A., Qiao, C. 2020, 'Performance Test of Autonomous Vehicle Lidar Sensors Under Different Weather Conditions', *Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2674, no. 1. <https://doi.org/10.1177/0361198120901681>
- Ullman, S. 1979, 'The Interpretation of Structure from Motion', *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 203, no. 1153, p. 405. <http://www.jstor.org/stable/77505>
- Verhoeven, G., Doneus, M., Briese, C., Vermeulen, F. 2012, 'Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs', *Journal of Archaeological Science*, vol. 39, no. 7, pp. 2060-70. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.02.022>
- Wagenmans, J. 2015, *The Oxford Handbook of Perceptual Organization*, Oxford University Press, UK.
- Wallach, H., O'connell, D. N., Neisser, U. 1953, 'The memory effect of visual perception of three-dimensional form', *Journal of Experimental Psychology*, vol. 45, no. 5, pp. 360-68. <https://doi.org/10.1037/h0063368>
- 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*, vol. 179, no. 15, pp. 300-14. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Yoshimura, R., Date, H., Kanai, S., Honma, R., Oda, K., Ikeda, T. 2016, 'Automatic registration of MLS point clouds and SfM meshes of urban area', *Geo-spatial Information Science*, vol. 19, no. 3, pp. 171-81. <https://doi.org/10.1080/10095020.2016.1212517>

Recebido em: 17/01/2021

Aprovado em: 09/06/2021

Como citar:

Franco, G.G. & Naime, A.F. 2021, 'Structure from Motion (SfM) – Uma Breve Revisão Histórica, Aplicações nas Geociências e Perspectivas Futuras', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 44: 40853. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_40853