

Avaliação da Precisão de Modelos Digitais de Elevação Obtidos por Aeronaves Remotamente Pilotadas

Marcos D. S. Lopes^(1*), Lucas S. Santana⁽²⁾, Lucas G. M. dos Santos⁽³⁾, Carmem L. S. Carmem⁽¹⁾, Luana R. Ferreira⁽¹⁾, Tiago S. Costa⁽¹⁾, Luana R. Ferreira⁽¹⁾, Josiane M. da Silva⁽³⁾, Felype S. Pires⁽⁴⁾, Ruan C. G. de S. Rodrigues⁽⁴⁾, Bruno S. Borgens⁽⁴⁾

¹ Discente em Engenharia Agrícola e Ambiental, UFVJM, Unai-MG

² Professor adjunto, UFVJM, Unai/MG

³ Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal, UFVJM, Unai/MG

⁴ Discente em Agronomia, UFVJM, Unai-MG

*E-mail do autor principal: marcos.david@ufvjm.edu.br

RESUMO EXPANDIDO

INTRODUÇÃO

Observa-se um avanço significativo nas ciências do sensoriamento remoto, acompanhado por uma crescente demanda por informações geoespaciais, impulsionada pela facilidade na aquisição de dados (Selmy, Kuche e Yang, 2024). Nesse contexto, os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) destacam-se como ferramentas essenciais devido à sua capacidade de caracterizar detalhadamente a superfície terrestre. Suas aplicações abrangem desde o zoneamento agroecológico e o planejamento agrícola e urbano até estudos relacionados às mudanças climáticas (Silva, Miranda e Candeias, 2022).

Para a geração desses modelos, as técnicas de fotogrametria digital por meio de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) consolidaram-se como uma alternativa prática e eficiente, principalmente pelo baixo custo, rapidez na aquisição e pela capacidade de fornecer produtos com alta resolução e qualidade geométrica (Sitoe, 2024). Equipadas com câmeras RGB e sensores multiespectrais, as ARPs possibilitam a obtenção de ortomosaicos com alta resolução espacial, permitindo capturar micro variações topográficas que antes eram imperceptíveis por métodos tradicionais (Teixeira et al., 2023).

Entretanto, a precisão dos MDEs gerados está diretamente relacionada a parâmetros específicos de voo, como altitude, sobreposição das imagens e direção do imageamento, que influenciam a acurácia altimétrica e a consistência dos modelos (Bento et al., 2022). Além das condições de aquisição, o processamento dos dados é uma etapa crucial, na qual softwares de fotogrametria, como o *AgiSoft Metashape*, utilizam algoritmos do tipo Structure from Motion (SfM) para gerar nuvens de pontos densas e reconstruções

tridimensionais altamente detalhadas (Fonstad et al., 2011).

Apesar dos avanços tecnológicos, ainda são escassos os estudos que comparam a influência de diferentes configurações de voo, o que dificulta a determinação da aplicabilidade dos MDEs gerados sob variados parâmetros. Por isso, este trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade e a precisão dos modelos digitais de elevação produzidos a partir de voos realizados com diferentes ARPs, parâmetros operacionais e direções de imageamento, buscando compreender em que medida essas variáveis impactam a acurácia final dos modelos.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Fazenda Experimental Santa Paula, da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, campus Unai-MG, em uma área caracterizada como Latossolo Vermelho, de aproximadamente 900 m² (Figura 1).

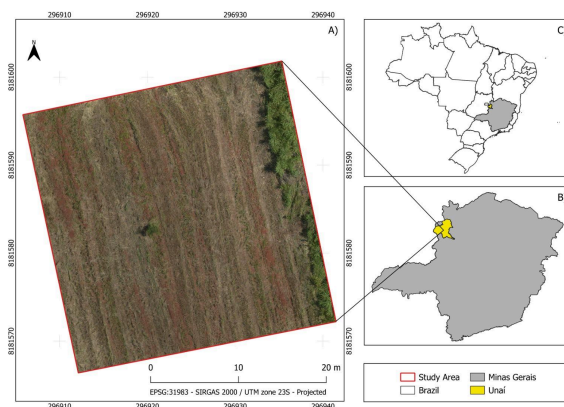


Figura 1 - Área de Estudo.

Para a realização deste estudo, foram utilizadas duas aeronaves remotamente pilotadas (ARPs): o DJI Mavic 3 Enterprise e o DJI Phantom 4 RTK, escolhidas por suas características complementares em termos de sensores, resolução espacial e capacidade de voo (Tabela 1). O Mavic 3 Enterprise combina uma câmera RGB com um sensor multiespectral de quatro bandas, oferecendo alta precisão em mapeamentos de pequena escala. Já o Phantom 4 RTK possui uma câmera RGB de maior resolução e um sensor multiespectral de cinco bandas, sendo mais adequado para levantamentos detalhados e coleta de dados em diferentes condições de voo.

Tabela 1 -Inserir aqui o título da tabela

Característica	DJI Mavic 3 Enterprise	DJI Phantom 4 RTK
Peso máximo de decolagem	1.050 g	1.487 g
GNSS	GPS, Galileo, BeiDou, GLONASS	GPS, Galileo, GLONASS
Câmera RGB	20 MP	48 MP
Sensor multiespectral	4 sensores CMOS 1/2,8" (5 MP)	5 sensores CMOS 1/2,9" (2,12 MP)
Lente	25 mm, f/2,0, FOV 73,91°	5,74 mm, f/2,2, FOV 62,7°
Obturador	1/2.000 s	Até 1/8.000 s
Intervalo mínimo de disparo	0,7 s	—
Velocidade máxima	21 m/s	—
Autonomia de voo	43 min	27 min
Bandas espectrais	Green (560 ± 16 nm), Red (650 ± 16 nm), RedEdge (730 ± 16 nm), NIR (860 ± 26 nm)	Blue (450 ± 16 nm), Green (560 ± 16 nm), Red (650 ± 16 nm), RedEdge (730 ± 16 nm), NIR (840 ± 26 nm)
Pixel	3,3 µm	3,01 µm

O planejamento dos voos teve como objetivo maximizar a resolução espacial e a qualidade dos MDEs, utilizando as alturas mínimas permitidas pelos sensores de colisão. Para o Phantom 4 RTK, os voos foram realizados a 15 metros de altura, com velocidade de 1,0 m/s, resultando em uma Ground Sample Distance (GSD) de 0,80 cm/pixel, sobreposição frontal de 80% e lateral de 70%. No caso do Mavic 3 Enterprise, a altura foi de 12 metros, mantendo a mesma velocidade e sobreposições, o que proporcionou um GSD de 0,55 cm/pixel. Todos os voos foram executados em duas direções distintas, longitudinal e transversal, com a câmera orientada verticalmente (-90°), garantindo cobertura completa e redundância nos dados coletados. As imagens capturadas foram processadas no software Agisoft Photoscan, em uma estação de trabalho equipada com processador AMD Ryzen 9 7900X (4,7–5,6 GHz), 64 GB de memória RAM DDR5 (4.800 MHz) e GPU NVIDIA GeForce RTX 4060 Ti GDDR6, o que permitiu a geração de nuvens de pontos densas e ortomosaicos de alta precisão. O processamento seguiu etapas padronizadas, incluindo alinhamento das fotos,

geração das nuvens densas e criação dos MDEs, assegurando consistência entre os diferentes conjuntos de imagens.

Para a análise quantitativa dos MDEs, foi desenvolvido um script no ambiente R que realizou uma amostragem sistemática de 1.000 pontos georreferenciados aleatórios. Os valores altimétricos correspondentes foram extraídos de todos os 15 MDEs, e um rigoroso controle de qualidade garantiu que apenas os pontos com dados válidos em todos os modelos fossem utilizados. Após essa filtragem, 636 pontos foram considerados para as análises comparativas, assegurando consistência espacial e eliminando possíveis vieses de localização.

A análise estatística incluiu a obtenção de estatísticas descritivas (média, mediana e desvio padrão) e a aplicação de análise de variância unidirecional (ANOVA), seguida do teste de comparações múltiplas Tukey HSD, permitindo identificar diferenças significativas entre os MDEs ($p < 0,05$). Essa abordagem possibilitou avaliar a consistência altimétrica entre os modelos e quantificar o efeito das diferentes plataformas, parâmetros de voo e direções de imageamento sobre a precisão dos modelos digitais de elevação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) gerados apresentaram variações significativas em função do equipamento utilizado, da direção de voo e dos parâmetros de aquisição. A análise de variância (ANOVA) revelou diferenças estatisticamente significativas entre os modelos ($F = 37.534$, $p < 0,001$), indicando que tanto o tipo de ARP quanto às condições de voo influenciam a altura registrada nos MDEs (Tabela 2).

Tabela 2 -Inserir aqui o título da tabela

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	p
Modelo	14	141403.47	10100.25	37534.86	0.001***
Resíduos	9525	2563.08	0.27	—	—

***. Altamente significativo ($p < 0,001$)
*. Significativo ($p < 0,05$)
NS: Não significativo

O teste de comparações múltiplas Tukey HSD permitiu identificar os pares de modelos com diferenças mais relevantes. A maior diferença significativa registrada foi de -11,95 m entre os voos longitudinais realizados com o Mavic 3 Enterprise e o Phantom 4 RTK, enquanto a menor diferença significativa foi de 0,10 m (Tabela 3). A comparação entre os modelos 29_05_2025_15_45_TRANS_M e o 30_05_2025_15_40_TRANS_M foi o que apresentou a maior significância sendo considerado uma diferença crítica (Figura 2). Algumas comparações não apresentaram

diferenças significativas, evidenciando consistência entre determinados modelos, especialmente quando os voos foram realizados com a mesma aeronave e sentidos semelhantes.

Tabela 3- Principais Diferenças Entre Modelos (Teste de Tukey).

Comparação	Diferença (m)	IC 95% Inferior	IC 95% Superior	Valor p	Significância
Maior Diferença	29_05_2025_10_31_LONG_M vs 28_05_2025_12_50_LONG_P	-11,95	-12,05	-11,85	<0,001
Menor Diferença Significativa	29_05_2025_11_08_LONG_P vs 29_05_2025_10_55_LONG_P	0,10	0,004	0,20	0,034
Maior Diferença Não-Significativa	28_05_2025_12_50_TRANS_P vs 28_05_2025_12_50_LONG_P	-0,09	-0,19	0,01	0,104
Diferença Crítica	30_05_2025_15_40_TRANS_M vs 29_05_2025_15_45_TRANS_M	0,004	-0,09	0,10	1,000

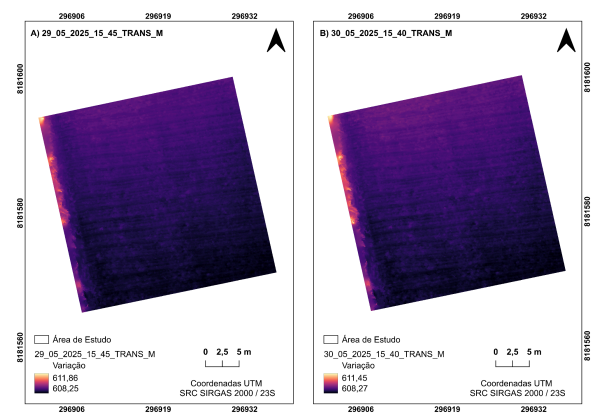


Figura 2 - Modelos Digitais de Elevação onde a comparação obteve diferença crítica

As estatísticas descritivas dos modelos indicam que a média altimétrica variou entre 605,54 m e 617,49 m, com desvio padrão variando de 0,45 m a 0,59 m (Tabela 4). Essa variação reflete tanto as diferenças entre os equipamentos quanto a influência da direção de voo.

Tabela 4 - Estatísticas descritivas dos modelos avaliados.

Modelo	Média (m)	Desvio Padrão	Nº de amostras
28_05_2025_11_15_LONG_M	616.32	0.45	636
28_05_2025_11_24_TRANS_M	614.85	0.49	636
28_05_2025_12_50_LONG_P	617.49	0.53	636
28_05_2025_12_50_TRANS_P	617.40	0.54	636
29_05_2025_09_50_TRANS_M	607.60	0.52	636
29_05_2025_10_31_LONG_M	605.54	0.57	636
29_05_2025_10_55_LONG_P	614.96	0.50	636
29_05_2025_11_08_LONG_P	615.07	0.53	636
29_05_2025_15_20_TRANS_P	609.57	0.52	636
29_05_2025_15_32_LONG_P	610.16	0.59	636
29_05_2025_15_45_TRANS_M	608.93	0.53	636
29_05_2025_16_07_LONG_M	608.48	0.50	636
30_05_2025_10_11_TRANS_M	608.68	0.49	636
30_05_2025_10_29_LONG_M	609.02	0.46	636
30_05_2025_15_40_TRANS_M	608.94	0.53	636

A análise de precisão, realizada por meio da amplitude e do coeficiente de variação (CV), revelou que a maioria dos MDEs apresentou alta

precisão (CV < 0,09%), embora alguns modelos tenham sido classificados como de precisão média devido a amplitudes maiores (Tabela 5). Essa avaliação reforça que a consistência altimétrica dos MDEs depende do equipamento, dos parâmetros de voo e da direção de imageamento.

Tabela 5 - Análise de precisão dos modelos.

Modelo	Amplitude (m)	Coefficiente de Variação (%)	Precisão Relativa
28_05_2025_11_15_LONG_M	3,07	0,07	Alta
28_05_2025_11_24_TRANS_M	3,46	0,08	Alta
28_05_2025_12_50_LONG_P	3,55	0,09	Alta
28_05_2025_12_50_TRANS_P	3,61	0,09	Alta
29_05_2025_09_50_TRANS_M	3,24	0,09	Alta
29_05_2025_10_31_LONG_M	3,63	0,09	Alta
29_05_2025_10_55_LONG_P	3,53	0,08	Alta
29_05_2025_11_08_LONG_P	5,49	0,1	Média
29_05_2025_15_20_TRANS_P	3,39	0,08	Alta
29_05_2025_15_32_LONG_P	5,86	0,1	Média
29_05_2025_15_45_TRANS_M	3,42	0,09	Alta
29_05_2025_16_07_LONG_M	2,75	0,08	Alta
30_05_2025_10_11_TRANS_M	2,89	0,08	Alta
30_05_2025_10_29_LONG_M	3,1	0,08	Alta
30_05_2025_15_40_TRANS_M	3,45	0,09	Alta

Alta precisão: CV < 0,09%
Média precisão: CV ≥ 0,09%

Os resultados deste estudo evidenciaram diferenças altimétricas significativas entre os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) gerados a partir de diferentes aeronaves e direções de voo, o que corrobora as observações de Deliry e Avdan (2024), que também identificaram influência direta de variáveis operacionais, como altura de voo, número e distribuição de pontos de controle (GCPs) e software de processamento, sobre a acurácia geométrica dos produtos gerados por Structure from Motion (SfM). Assim como relatado pelos autores, verificou-se que pequenas alterações nos parâmetros de aquisição resultam em variações altimétricas perceptíveis, ainda que dentro de limites compatíveis com aplicações de alta resolução. A influência do tipo de equipamento observada nos dados é consistente com as conclusões de Kameyama e Sugiura (2021), que, ao comparar diferentes processadores SfM (Pix4Dmapper, PhotoScan e Terra Mapper), constataram discrepâncias métricas associadas às características dos sensores embarcados e aos algoritmos de reconstrução tridimensional. No presente trabalho, o DJI Mavic 3 Enterprise apresentou maior consistência entre os voos, com menores variações entre direções de imageamento, enquanto o Phantom 4 RTK mostrou maior amplitude de variação altimétrica, comportamento semelhante ao relatado por Kameyama e Sugiura ao comparar softwares com diferentes padrões de densificação da nuvem de pontos. Essas diferenças refletem como a

calibração interna da câmera e a estabilidade do voo impactam diretamente a fidelidade altimétrica dos modelos.

Além disso, a relação entre relevo, interpolação e precisão identificada neste estudo está em conformidade com os resultados de Akar (2017), que demonstrou que a escolha do método de interpolação e a variação topográfica influenciam a qualidade final dos MDEs gerados por VANTs. Ainda que a área de estudo apresenta relevo suave, as variações encontradas entre voos longitudinais e transversais indicam que a geometria do imageamento afeta a reconstrução da superfície, especialmente em micro desníveis. De modo geral, os resultados indicam que as diferenças mais expressivas ocorreram entre modelos de ARPs distintos e entre voos realizados em sentidos opostos, enquanto comparações entre vôos semelhantes apresentaram alta consistência altimétrica. A análise estatística robusta, combinada com a avaliação da precisão, permitiu identificar padrões claros de variação nos MDEs e estabelecer recomendações para a escolha de equipamentos e parâmetros de voo em levantamentos topográficos de alta resolução.

CONCLUSÃO

Os resultados mostraram variações altimétricas entre os Modelos Digitais de Elevação gerados, associadas às diferenças de aeronave, direção de voo e parâmetros de aquisição. A análise de variância indicou diferenças significativas ($F = 37.534$; $p < 0,001$), com variações entre -11,95 m e 0,10 m. As médias altimétricas variaram de 605,54 m a 617,49 m, com desvios-padrão entre 0,45 m e 0,59 m, e a maioria dos modelos apresentou coeficiente de variação inferior a 0,09%, classificando-se como de alta precisão. Esses resultados evidenciam que as configurações de voo e os equipamentos empregados resultaram em MDEs consistentes e adequadas para aplicações que demandam detalhamento altimétrico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG (APQ-00509-24), e à Fundação Arthur Bernardes - FUNARBE, pelo fomento à formação e à pesquisa científica.

REFERÊNCIAS

TEIXEIRA, N. N.; LIMA, C. A. de; SANTOS, M. S. T.; CRUZ JÚNIOR, D. C.; SANTOS, A. L. de O.; SABINO, B. G. M. Avaliação da acurácia altimétrica em levantamentos topográficos urbanos com aeronaves remotamente pilotadas. *Revista de Gestão e Secretariado*, [S. l.], v. 14, n. 12, p. 21403-21430, 2023.

FONSTAD, M.; DIETRICH, J.; COURVILLE, B.; JENSEN, J.; CARBONNEAU, P. E. Topographic structure from motion. *AGU Fall Meeting Abstracts*, [S. l.], 2011.

SITOE, J. E. J. Aplicação de técnicas da fotogrametria digital com recurso a imagens colhidas por drones na produção de um mapa planialtimétrico: estudo de caso Bairro Chiango. 2024. Trabalho de Licenciatura (Ciências de Informação Geográfica) – Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Ciências, Maputo, 2024.

SILVA, J. F. da; MIRANDA, R. de Q.; CANDEIAS, A. L. B. Análise dos Modelos Digitais de Elevação (PE3D, SRTM-30, SRTM-90, ASTER GDEM, TOPODATA, TANDEM-X, ALOS PALSAR e ALOS AW3D30) e a necessidade da produção de dados altimétricos em excelência no Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 15, n. 3, p. 1543-1555, 2022.

BENTO, N. L.; FERRAZ, G. A. E. S.; BARATA, R. A. P.; SANTANA, L. S.; BARBOSA, B. D. S.; CONTI, L.; BECCIOLINI, V.; ROSSI, G. Overlap influence in images obtained by an unmanned aerial vehicle on a digital terrain model of altimetric precision. *European Journal of Remote Sensing*, [S. l.], v. 55, n. 1, p. 263-276, 2022.

SELMY, S. A. H.; KUCHE, D. E.; YANG, Y. Geospatial Data: Acquisition, Applications and Challenges. In: *EXPLORING REMOTE SENSING – METHODS AND APPLICATIONS*. IntechOpen, 2024.

AKAR, Alper. Evaluation of accuracy of DEMs obtained from UAV-point clouds for different topographical areas. *International Journal of Engineering and Geosciences*, v. 2, n. 3, p. 110–117, 2017.

DELIRY, Sayed Ishaq; AVDAN, Uğur. Accuracy assessment of UAS photogrammetry and structure from motion in surveying and mapping. *International Journal of Engineering and Geosciences*, v. 9, n. 2, p. 165–190, 2024.

KAMEYAMA, Shohei; SUGIURA, Katsuaki. Effects of differences in structure from motion software on image processing of unmanned aerial vehicle photography and estimation of crown area and tree height in forests. *Remote Sensing*, v. 13, n. 4, p. 626, 2021.