

Avaliação da Acurácia posicional de Ortomosaicos e MDS gerados com UAS PPK segundo o PEC-PCD em Encostas Íngremes

Assessment of the Positional Accuracy of PPK-Based UAS Orthomosaics and DSM according to PEC-PCD over Steep Slopes

Leandro França¹; Afonso de Paula dos Santos²; Ilton Freitas³; Sávía Gavazza⁴; Simone Sato⁵

- ¹ Universidade Federal de Pernambuco/Departamento de Engenharia Civil, Recife/PE, Brasil. Email: leandro.franca@ifpb.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0863-1926>
- ² Universidade Federal de Viçosa/Departamento de Engenharia Civil, Viçosa/MG, Brasil. Email: afonso.santos@ufv.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7248-4524>
- ³ GeoOne Innovation and Training, João Pessoa/PB, Brasil. Email: ilton@geoone.com.br
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9257-3978>
- ⁴ Universidade Federal de Pernambuco/Departamento de Engenharia Civil, Recife/PE, Brasil. Email: savia@ufpe.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4433-7735>
- ⁵ Universidade Federal de Pernambuco/Departamento de Engenharia Cartográfica, Recife/PE, Brasil. Email: simone.sato@ufpe.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2516-8876>

Resumo: Este estudo compara a acurácia posicional de produtos aerofotogramétricos — Ortomosaico e Modelo Digital de Superfície (MDS) — gerados em área de encosta íngreme em Recife-PE utilizando dois sistemas UAS: DJI Mavic 3 Enterprise (M3E) com RTK/PPK e DJI Mini 3 operando em PPK via solução T2R, com processamento realizado tanto em ambiente open source (WebODM/ODM) quanto em software proprietário (Agisoft Metashape). O objetivo foi avaliar a acurácia planimétrica e altimétrica sem o uso de pontos de controle no processamento, empregando GCPs exclusivamente como pontos de checagem para cálculo das discrepâncias posicionais, RMS planimétrico, altimétrico e tridimensional, além da classificação conforme o Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). Nos processamentos aplicaram-se correção de rolling shutter (DJI Mini 3), uso obrigatório das coordenadas precisas das imagens (*force-gps*) com precisão adotada de 0,02 m para os centros perspectivos (*gps-accuracy*) e geotags corrigidas via PPK com processamento GNSS no RTKLib e T2R-Geotagger; os voos seguiram altura de 100 m (*terrain-following*), sobreposição de 85%/75% e velocidade de 6 m/s. Os resultados, avaliados no QGIS/LFTools, mostraram que, no Metashape, o Mini 3 obteve $RMS_{XY} \approx 9,3$ cm e $RMS_Z \approx 11,5$ cm, enquanto o M3E alcançou $RMS_{XY} \approx 5,5$ cm e $RMS_Z \approx 4,5$ cm; já no WebODM, o Mini 3 apresentou $RMS_{XY} \approx 13,1$ cm e $RMS_Z \approx 18,2$ cm, enquanto o M3E obteve $RMS_{XY} \approx 6,4$ cm e $RMS_Z \approx 4,8$ cm. Quanto ao PEC-PCD planimétrico, o Mini 3 apresentou desempenho equivalente nos dois softwares — Classe B para escala 1:500 e Classe A para 1:1.000 e menores — enquanto o M3E alcançou Classe A em todas as escalas; no PEC-PCD altimétrico, o Mini 3 obteve melhor desempenho no Metashape (Classe B em 1:500 e A em 1:1.000), enquanto no WebODM se verificou redução da qualidade (Classe C em 1:500 e B em 1:1.000), e o M3E manteve Classe A em todas as escalas. Conclui-se que o M3E é o UAS que garante maior qualidade posicional independentemente do software, embora o Mini 3 operando em PPK demonstre capacidade de gerar produtos compatíveis com os padrões cartográficos brasileiros, atingindo PEC-PCD Classe A até 1:1.000 na planimetria e até 1:2.000 na altimetria, configurando-se como solução de menor custo, alta mobilidade e aplicabilidade para monitoramento de encostas, infraestrutura e gestão de riscos.

Palavras-chave: Acurácia posicional; UAS PPK; Fotogrametria com UAS.

Abstract: This study compares the positional accuracy of photogrammetric products: orthomosaic and digital surface model (DSM), generated in a steep slope area in Recife, Brazil, using two UAS platforms: the DJI Mavic 3 Enterprise (M3E) with RTK/PPK and the DJI Mini 3 operating in PPK mode via the T2R solution, with processing performed in both open-source (WebODM/ODM) and proprietary (Agisoft Metashape) environments. The objective was to evaluate horizontal and vertical accuracy without the use of ground control points (GCPs) during processing, employing GCPs exclusively as checkpoints for the computation of positional discrepancies, horizontal, vertical, and three-dimensional RMS, as well as classification according to the Brazilian Cartographic Accuracy Standard for Digital Cartographic Products (PEC-PCD). The processing workflow included rolling shutter correction (for the DJI Mini 3), enforced use of GNSS-derived image coordinates (*force-gps*) with an adopted accuracy of 0.02 m for camera perspective centers (*gps-accuracy*), and PPK-corrected geotags obtained via GNSS processing in RTKLib and T2R-Geotagger. Flights were conducted at 100 m altitude (*terrain following*), with 85%/75% forward/lateral overlap and a speed of 6 m/s. The results, evaluated in QGIS/LFTools, showed that in Metashape the Mini 3 achieved $RMS_{XY} \approx 9.3$ cm and $RMS_Z \approx 11.5$ cm, while the M3E reached $RMS_{XY} \approx 5.5$ cm and $RMS_Z \approx 4.5$ cm. In WebODM, the Mini 3 achieved $RMS_{XY} \approx 13.1$ cm and $RMS_Z \approx 18.2$ cm, whereas the M3E obtained $RMS_{XY} \approx 6.4$ cm and $RMS_Z \approx 4.8$ cm. Regarding planimetric PEC-PCD classification, the Mini 3 exhibited equivalent performance in both environments — Class B at 1:500 scale and Class A from 1:1,000 onward — while the M3E achieved Class A at all evaluated scales. For vertical PEC-PCD classification, the Mini 3 showed better performance in Metashape (Class B at 1:500 and Class A at 1:1,000), whereas in WebODM a reduction in quality was observed (Class C at 1:500 and Class B at 1:1,000), and the M3E maintained Class A at all scales. It is concluded that the M3E ensures the highest positional accuracy regardless of processing software. However, the Mini 3 operating in PPK demonstrates the capability to produce products compliant with Brazilian cartographic accuracy standards, achieving PEC-PCD Class A up to 1:1,000 in planimetry and up to 1:2,000 in altimetry, representing a lower-cost, high-mobility solution suitable for slope monitoring, infrastructure assessment, and risk management.

Keywords: Positional accuracy; UAS PPK; UAS photogrammetry.

1. Introdução

O uso de drones para aquisição de dados geoespaciais tem se expandido de forma expressiva nas últimas décadas, impulsionado pela redução de custos, avanços nos sistemas GNSS embarcados e aprimoramentos nos algoritmos de fotogrametria digital.

No âmbito científico internacional, o termo *Unmanned Aerial Systems* (UAS) é amplamente adotado por seu caráter abrangente, englobando não apenas a aeronave (*Unmanned Aerial Vehicle* – UAV), mas também a estação de controle, o enlace de comunicação e eventuais cargas úteis (COLOMINA; MOLINA, 2014, p. 80). Segundo Nex et al. (2022, p. 216), os UAS representam uma das tecnologias emergentes mais significativas nas geociências e no sensoriamento remoto nas últimas duas décadas. Embora o termo “drone” seja popularizado no uso comercial e midiático, no Brasil a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e a Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) empregam majoritariamente a designação *Remotely Piloted Aircraft* (RPA) em documentos regulatórios (ANAC, 2017, p. 4). A adoção de UAS neste trabalho busca alinhar-se às práticas predominantes na literatura científica internacional, preservando a correspondência terminológica com os equivalentes UAV e RPA.

Entre as aplicações mais relevantes dessas plataformas, destaca-se a fotogrametria digital associada às técnicas *Structure from Motion* (SfM) e *Multi-View Stereo* (MVS), capazes de gerar ortomosaicos, nuvens de pontos densas e modelos digitais de elevação (MDE) a partir de séries de imagens aéreas (TKÁČ; MÉSÁROŠ, 2019, p. 31). A qualidade geométrica desses produtos depende de fatores como parâmetros de voo (sobreposição, altura, escala), características do sensor (distância focal, tamanho de pixel) e da geometria do bloco e distribuição de Pontos de Controle no Solo (GCPs), além de efeitos relacionados ao tipo de obturador da câmera (ELHADARY et al., 2022, p. 211; MEDEIROS et al., 2025, p. 305; MORA-FELIX et al., 2020, p. 1018).

Em sensores com *rolling shutter*, comuns em câmeras CMOS de menor custo, a captura sequencial pode introduzir distorções, sobretudo em voos rápidos ou sobre relevo acidentado; nesses casos, estratégias de aquisição e/ou modelagem específica do *rolling shutter* pode reduzir vieses (BRUNO; FORLANI, 2023, p. 4; ÎNCEKARA; SEKER, 2021, p. 550; SIMÕES et al., 2022, p. 347; ZHOU et al., 2020, p. 4). Ademais, em terrenos com forte variação hipsométrica, o planejamento com acompanhamento do relevo contribui para manter GSD/escala mais uniformes e, por consequência, minimizar distorções e efeitos sistemáticos (GARGARI et al., 2023, p. 16; GUIMARÃES et al., 2025, p. 44; SINGH; MISHRA; JAIN, 2023, p. 669–670).

O processamento das imagens pode ser realizado em softwares comerciais amplamente consolidados, como Agisoft Metashape e Pix4Dmapper, ou em soluções de código aberto, como o WebODM, integrante do projeto OpenDroneMap (OPENDRONEMAP, 2025, s/p.; TOFFANIN, 2023, p.3). Este último destaca-se pela flexibilidade, transparência dos algoritmos e menor custo, características inerentes a projetos *open source*, cujo código está publicamente disponível para estudo e reprodutibilidade, sendo particularmente atraente para instituições de ensino, pesquisa e profissionais que atuam com recursos limitados (GBAGIR; EK; COLPAERT, 2023, p. 446; KOSTRZEWA et al., 2025, p. 71).

A acurácia posicional dos produtos fotogramétricos é um elemento central para a confiabilidade de aplicações técnicas, pois influencia diretamente o mapeamento e monitoramento de fenômenos ambientais e urbanos (TASCA; FRANCO; SIQUEIRA, 2025, p. 956). Produtos com elevada acurácia posicional permitem análises detalhadas de suscetibilidade a processos erosivos, desmatamento, crescimento urbano desordenado, destruição de áreas de preservação permanente, monitoramento de infraestruturas críticas, riscos de inundação e deslizamentos de encostas (ARAÚJO SILVA et al., 2025, p. 2055; BRITO et al., 2025, p. 324; PESSOA NETO; LAFAYETTE; CORREA, 2025, p. 14; SILVA et al., 2025, p. 116).

Em contextos de gestão de riscos, como o acompanhamento de movimentos de massa ou a avaliação de áreas vulneráveis a enchentes, a disponibilidade de mapeamentos de alta acurácia, obtidos a partir de soluções de menor custo, possibilita campanhas de monitoramento frequentes e economicamente viáveis, fortalecendo a tomada de decisão e a adoção de medidas preventivas (DO VALE et al., 2025, p. 2877).

Para assegurar a qualidade posicional, o georreferenciamento das imagens pode ser aprimorado com receptores GNSS de alta precisão, por meio de técnicas como *Real-Time Kinematic* (RTK) e *Post-Processed Kinematic* (PPK). No PPK, as correções são aplicadas após o voo, a partir dos registros de uma estação de referência, dispensando a correção em tempo real das coordenadas das fotografias e permitindo o uso de efemérides e relógios precisos no pós-processamento (ARKALI; ATIK, 2025, p. 327). Quanto à necessidade de controle em solo, estudos recentes indicam que o PPK pode reduzir substancialmente e, em alguns casos, eliminar a dependência de vários GCPs, mantendo acurácia horizontal e vertical ≤ 10 cm; ainda assim, recomenda-se, quando viável, ao menos um GCP para mitigar possíveis vieses do bloco (RAUHALA, 2024, p. 79; TÜRK et al., 2022, p. 476). Resultados adicionais apontam que configurações mais robustas (por exemplo, correções provenientes de múltiplas bases) podem melhorar a acurácia altimétrica mesmo sem GCPs (MARTÍNEZ-CARRICONDO; AGÜERA-VEGA; CARVAJAL-

RAMÍREZ, 2023, p. 4). Em áreas de difícil acesso, como encostas íngremes e setores instáveis, o PPK tem sido empregado com sucesso para produzir ortomosaicos e modelos altimétricos com qualidade cartográfica, reduzindo os riscos operacionais associados à implantação de GCPs (ŽABOTA; KOBAL, 2021, p. 3–6).

Apesar dos avanços recentes, persiste uma lacuna na literatura quanto à avaliação sistemática da acurácia posicional de produtos aerofotogramétricos obtidos com drones de menor custo equipados com PPK, a exemplo do DJI Mini 3 integrado a soluções nacionais, como a desenvolvida pela empresa T2R. Esse cenário é particularmente relevante porque a maior parte dos estudos ainda se concentra na linha de UAS “Enterprise” com RTK/PPK nativos, enquanto kits embarcados em aeronaves de entrada têm potencial para democratizar o mapeamento de alta precisão. A escassez de evidências torna-se ainda mais evidente quando se requer a validação simultânea de ortomosaicos e Modelos Digitais de Elevação (MDE), com base em coordenadas absolutas tridimensionais obtidas por GNSS de alta precisão como referência, sobretudo em contextos desafiadores como encostas e áreas de alta declividade.

Este estudo busca preencher essa lacuna de forma inédita ao integrar a avaliação do desempenho do UAS Mini 3 PPK processado no WebODM em levantamentos sobre encostas, considerando tanto métricas planimétricas e altimétricas. Nesse cenário, parte-se da seguinte hipótese: UAS de entrada, como o DJI Mini 3 equipado com PPK, podem produzir ortomosaicos e MDE com qualidade suficiente para aplicações em engenharia e monitoramento ambiental, mesmo em áreas de elevada declividade, desde que acompanhados de planejamento de voo adequado (alto recobrimento, *terrain following*) e controle de qualidade.

O objetivo geral é avaliar se drones de baixo custo, como o Mini 3 PPK, podem substituir, em determinadas condições de processamento, soluções da categoria *Enterprise*, como o Mavic 3E, em levantamentos de encostas, sem o uso de pontos de controle, mantendo a conformidade com os padrões de acurácia posicional estabelecidos em normas e especificações vigentes. Especificamente, busca-se: (1) quantificar o impacto dessas escolhas na acurácia planimétrica e altimétrica, por discrepâncias em X, Y e Z, RMS (XY/Z) e PEC-PCD, utilizando coordenadas GNSS de alta precisão como referência; e (2) comparar o desempenho do Mini 3 PPK ao de uma plataforma de categoria superior (Mavic 3E, RTK/PPK), bem como ao processamento em software livre (WebODM) e em software comercial (Agisoft Metashape) sob condições equivalentes.

2. Metodologia

2.1 Área de Estudo

A área de estudo se localiza na região do Morro Alto do Reservatório em Recife–PE, com área de aproximadamente 0,4 km². A Figura 1 apresenta a região de estudo, juntamente com a distribuição dos pontos de checagem utilizados na avaliação da acurácia posicional.

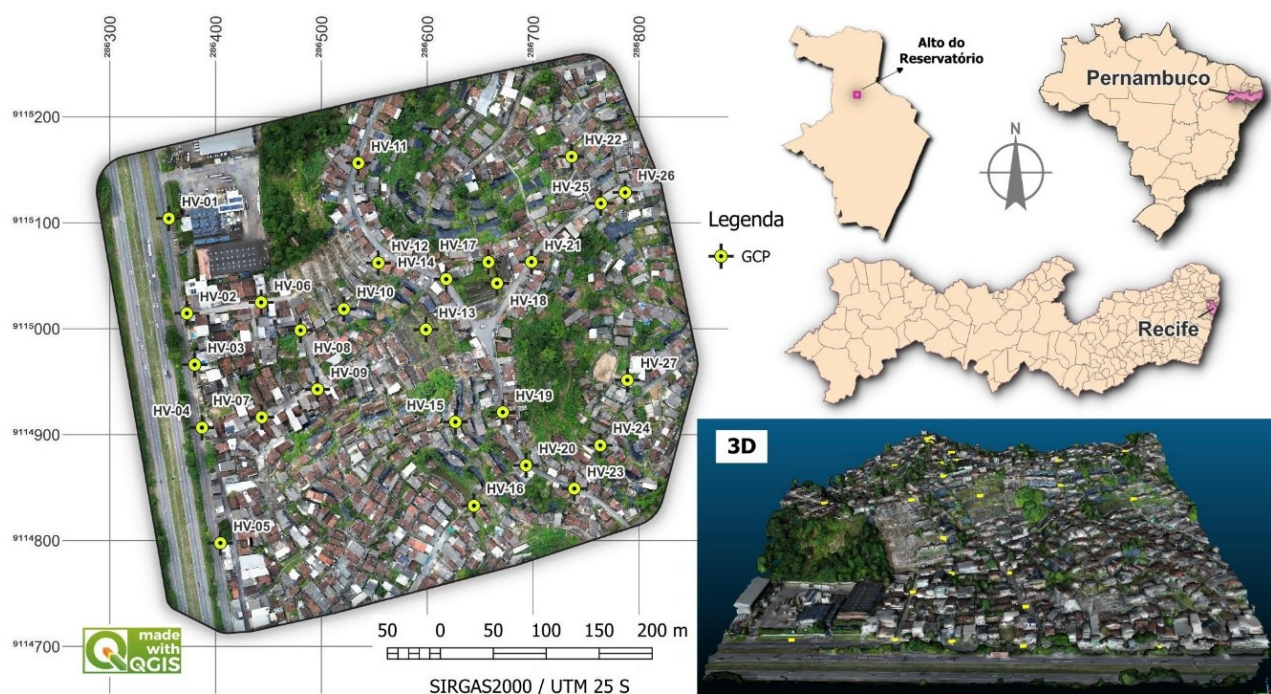


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo situada no Morro Alto do Reservatório em Recife-PE.
Fonte: Autores (2025).

2.2 Equipamentos, softwares e versões

Os equipamentos e softwares utilizados neste trabalho foram:

- Aeronaves: DJI Mini 3 (com kit PPK T2R) e DJI Mavic 3E (RTK/PPK).
- GNSS: receptor geodésico Polaris S100 (L1/L2).
- Planejamento e missão: QGIS 3.40.9 com GeoFlight Planner (planejamento) e execução da missão via aplicativo Litchi Pilot.
- Processamento fotogramétrico (*open source*): WebODM 2.8.1 com OpenDroneMap engine 3.5.5.
- Processamento fotogramétrico (comercial): Agisoft Metashape 2.2.0 (parâmetros assimilados aos do WebODM) para comparação entre os softwares de processamento.
- PPK e Geotag: RTKLib ver. demo5 b34d (pós-processamento) e T2R Geotagger v1.0.63 (escrita das coordenadas corrigidas nas fotos).
- Avaliação de qualidade: QGIS 3.40.9 com LFTools v2.4.0 para cálculo de discrepâncias em X,Y,Z; RMS planimétrico e altimétrico; e Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC-PCD).

2.3 Planejamento de voo

Os voos foram planejados no QGIS (plugin GeoFlight Planner) com 85% de sobreposição frontal, 75% lateral, 100 m AGL e 6 m/s. Aqui, AGL (*above ground level*) denota a altura relativa ao terreno sob cada waypoint, e não em relação ao ponto de decolagem.

As missões foram exportadas e executadas no aplicativo Litchi Pilot, com a altitude definida no Mission Hub no modo *Above Ground* (acompanhamento do relevo), no qual as altitudes de cada *waypoint* são calculadas em relação ao solo a partir de elevação on-line integrada ao Litchi (provedor/DEM não divulgado publicamente). Para referência operacional desse modo e suas limitações, ver a documentação do Litchi Mission Utilities sobre “Above Ground”. (LITCHI UTILITIES, s.d., s/p.)

2.4 Apoio Terrestre

Os pontos GCP para checagem foram levantados com o receptor GNSS geodésico Polaris S100 pelo método Relativo Estático Rápido (*fast static*): 5 min de rastreamento no rover em cada ponto, com estação base rastreando > 4 h e coordenadas corrigidas por posicionamento relativo estático por estação da RBMC de Recife-PE. Todos os dados brutos foram convertidos para RINEX e processados no RTKLib. As coordenadas finais foram empregadas como referência absoluta para validação dos produtos aerofotogramétricos (ortomosaicos e MDE).

2.5 Processamento do PPK do UAS

O processamento dos dados PPK do UAS foi realizado com o RTKLib (demo5 b34d), gerando a trajetória refinada da aeronave. Em seguida, o T2R Geotagger (v1.0.63) escreveu as coordenadas corrigidas (tempo-posição) nos metadados EXIF das fotografias do UAS Mini 3 (e do Mavic 3E, também utilizado em modo PPK), garantindo alinhamento temporal preciso entre câmera no instante da captura da fotografia e a solução GNSS.

2.6 Processamento fotogramétrico no WebODM

O processamento principal foi conduzido no WebODM utilizando o *preset High Resolution* com o parâmetro *pc-quality = High*, visando maximizar a densificação, a definição de feições e a qualidade final dos ortomosaicos e modelos altimétricos (OPENDRONEMAP, 2025). Essa configuração foi mantida constante em todos os cenários para garantir comparabilidade direta entre os resultados e isolar o efeito dos fatores avaliados. A análise de acurácia considerou como premissas metodológicas: (i) uso obrigatório das coordenadas GNSS das fotografias com precisão a priori definida por *gps-accuracy* associada ao parâmetro *force-gps* de 2 cm, e (ii) aplicação da correção de *rolling shutter*.

Justificativas metodológicas:

- Uso de PPK: a correção pós-processada das geotags das fotos permite obter coordenadas mais precisas dos centros de perspectiva, resultando em modelos SfM e produtos fotogramétricos mais alinhados à realidade do terreno, reduzindo a dependência de pontos de controle para o georreferenciamento do bloco fotogramétrico.
- Correção de *rolling shutter*: a ativação desse recurso mitiga distorções geométricas causadas pela leitura sequencial típica de sensores CMOS, sobretudo ao longo da direção de voo, melhorando a consistência interna do bloco e a fidelidade geométrica das feições representadas.
- Parâmetro “*force-gps*” e definição de “*gps-accuracy*”: a atribuição de pesos adequados às observações GNSS é fator preponderante para o ajustamento no processamento. Valores excessivamente otimistas (e.g., 0,02 m) podem impor rigidez excessiva ao bloco, forçando a incorporação de efeitos sistemáticos provenientes das geotags; enquanto pesos demasiadamente permissivos (por exemplo, 1 m) reduzem a influência da solução PPK e deterioram o potencial de acurácia posicional. A escolha de 2 cm representa um compromisso metodológico baseado no perfil de estabilidade do voo, capacidade da câmera e consistência da solução fixa do PPK.

2.7 Processamento fotogramétrico no Agisoft Metashape

Para buscar isolar o efeito do software, mantendo a paridade metodológica com o WebODM, as imagens geotagueadas por PPK (RTKLib + T2R Geotagger) foram importadas no Agisoft Metashape, adotando o mesmo critério de pesos das geotags. Em *Reference Settings*, definiu-se *Camera location accuracy = 0,02 m* (em XY/Z), equivalente ao cenário ótimo no WebODM (*force-gps + gps-accuracy = 0,02 m*). O *rolling shutter* foi habilitado para o DJI Mini 3 e não aplicado ao Mavic 3E (obturador mecânico). O alinhamento foi executado em alta qualidade, com pré-seleção por referência (uso da posição PPK), seguido de *Optimize Cameras*, ponderando as observações GNSS conforme a precisão definida (Agisoft, 2025).

Na reconstrução, geraram-se *Depth Maps* e *Dense Cloud* em alta qualidade; o MDS foi derivado da nuvem densa e o ortomosaico produzido mantendo GSD compatível ao voo (100 m, *terrain following*).

2.8 Avaliação da qualidade posicional

Nos ensaios comparativos foram utilizados os 26 pontos de checagem independentes (sem GCPs no processamento), levantados por GNSS, assegurando comparabilidade direta entre plataformas (WebODM × Metashape) e aeronaves (Mini 3 × Mavic 3E). Em cada ponto, calcularam-se as discrepâncias nas componentes X, Y e Z entre os valores observados nos produtos aerofotogramétricos e os valores de referência geodésicos obtidos com receptor GNSS geodésico (com acurácia melhor que 1 cm em 3D).

Para os produtos planimétricos (ortomosaico), os centros dos alvos foram medidos no raster; para o componente altimétrico, as cotas foram extraídas no Modelo Digital de Superfície (MDS). Essa abordagem segue a noção de acurácia posicional absoluta adotada em normas e guias técnicos (BRASIL, 2016, p. 3-21; ISO, 2023, p.1; ASPRS, 2024, p.17).

A avaliação foi realizada no QGIS 3.40.9, com o plugin LFTools 2.4.0, computando-se as discrepâncias posicionais, o RMS planimétrico (XY) e altimétrico (Z), além da classificação segundo o PEC-PCD.

Formulação estatística

Segundo França et al. (2019), a medida de acurácia proposta por Gauss é o Erro Quadrático Médio (*Mean Square Error - MSE*), em que σ^2 é a variância (componente aleatória) e b é a tendência (componente sistemática), também conhecida como viés.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2}{N} \simeq \sigma^2 + b^2 \tag{1}$$

O erro (ε) é a diferença do valor obtido em relação ao valor verdadeiro. Como o valor verdadeiro é abstrato, utiliza-se o conceito de discrepância (d), dado por:

$$d = v_t - v_r \tag{2}$$

Onde v_t é o valor de teste da componente x, y ou z obtido dos produtos aerofotogramétricos e v_r é o valor de referência do seu ponto homólogo obtido do levantamento geodésico com GNSS.

A tendência (média) e a precisão (desvio-padrão) das discrepâncias são dadas por:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N} \tag{3}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2}{N}} \tag{4}$$

Já a acurácia é expressa pelo valor do RMS, ou seja, a raiz quadrada do MSE:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N d_i^2}{N}} \tag{5}$$

Onde em cada componente fica:

- $RMS_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N dX_i^2}{N}}$
- $RMS_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N dY_i^2}{N}}$
- $RMS_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N dZ_i^2}{N}}$

O RMS_{XY} planimétrico pode ser expresso como:

$$RMS_{XY} = \sqrt{RMS_X^2 + RMS_Y^2} \tag{6}$$

A classificação PEC-PCD foi derivada das discrepâncias (d) e RMS obtidos, seguindo as especificações da ET-CQDG (BRASIL, 2016) com valores de Erro Máximo (EM) e Erro Padrão (EP) definidos na Tabela 1.

Tabela 1 — Padrões do PEC-PCD e PEC, em metros, para grandes escalas.

Tipo	PEC-PCD	PEC	1:500		1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000	
	(2016)	(1984)	EM	EP	EM	EP	EM	EP	EM	EP	EM	EP
Planimetria	A	-	0,14	0,085	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70
	B	A	0,25	0,15	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00

	C	B	0,40	0,25	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00
	D	C	0,50	0,30	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00
Altimetria	A	-	0,135	0,085	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84
	B	A	0,25	0,165	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,67	2,50	1,67
	C	B	0,30	0,20	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00
	D	C	0,375	0,25	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50

Fonte: Adaptado da ET-CQDG (BRASIL, 2016, p. 4-9).

3. Resultados e discussão

Para a avaliação da acurácia posicional foram utilizados 26 pontos de checagem independentes. As fotografias dos UAS DJI Mini 3 e DJI Mavic 3E (M3E) foram processadas com *geotags* corrigidas por PPK, sem uso de GCPs, tanto no WebODM/OpenDroneMap quanto no Agisoft Metashape, adotando parâmetros de processamento equivalentes, conforme exposto no tópico 2.

Avaliação da acurácia posicional planimétrica XY

A Tabela 2 apresenta, as estatísticas das discrepâncias *dX*, *dY* e *dXY* considerando os resultados do processamento obtidos nos softwares testados para os dois UAS.

Para facilitar a interpretação espacial das incertezas planimétricas, a Figura 2 apresenta as elipses de erro derivadas da Matriz Variância-Covariância (MVC) no intervalo de confiança de 68%, correspondente à dispersão dentro de 1 desvio padrão, permitindo uma visualização coerente da distribuição planimétrica das discrepâncias *dX* e *dY* entre os pontos de teste e suas respectivas coordenadas de referência.

O tamanho e a orientação das elipses expressam simultaneamente a magnitude e a anisotropia da incerteza: elipses maiores indicam maior variância e, conseqüentemente, menor precisão, enquanto o eixo principal evidencia a direção de maior dispersão (CARVALHO *et al.*, 2024, p. 494). A tendência é interpretada a partir do deslocamento do centro da elipse em relação à origem (*dX* = 0, *dY* = 0); quanto menor esse deslocamento, menor o efeito sistemático, ao passo que deslocamentos expressivos revelam possíveis tendências residuais.

Tabela 2 – Estatísticas das discrepâncias nas componentes *dX*, *dY* e *dXY* para os produtos gerados pelo WebODM e Agisoft Metashape, utilizando o UAS Mini 3 e M3E.

Componente	Estatísticas das discrepâncias	WebODM / OpenDroneMap		Agisoft Metashape	
		Mini 3	Mavic 3E	Mini 3	Mavic 3E
dX	Máx. (m)	0.154	0.055	0.121	0.058
	Mín. (m)	-0.229	-0.110	-0.104	-0.170
	Média (m)	-0.015	-0.027	0.004	-0.015
	Desvio-padrão (m)	0.071	0.040	0.051	0.042
	RMS (m)	0.072	0.048	0.052	0.045
dY	Máx. (m)	0.309	0.130	0.229	0.128
	Mín. (m)	-0.223	-0.089	-0.145	-0.023
	Média (m)	0.020	0.003	0.009	0.010
	Desvio-padrão (m)	0.107	0.043	0.077	0.031
	RMS (m)	0.109	0.044	0.079	0.033
dXY	Máx. (m)	0.385	0.170	0.252	0.213
	Mín. (m)	0.021	0.007	0.029	0.007
	Média (m)	0.105	0.056	0.078	0.039
	Desvio-padrão (m)	0.079	0.032	0.051	0.040
	RMS (m)	0.131	0.064	0.093	0.055

Fonte: Autores (2025).

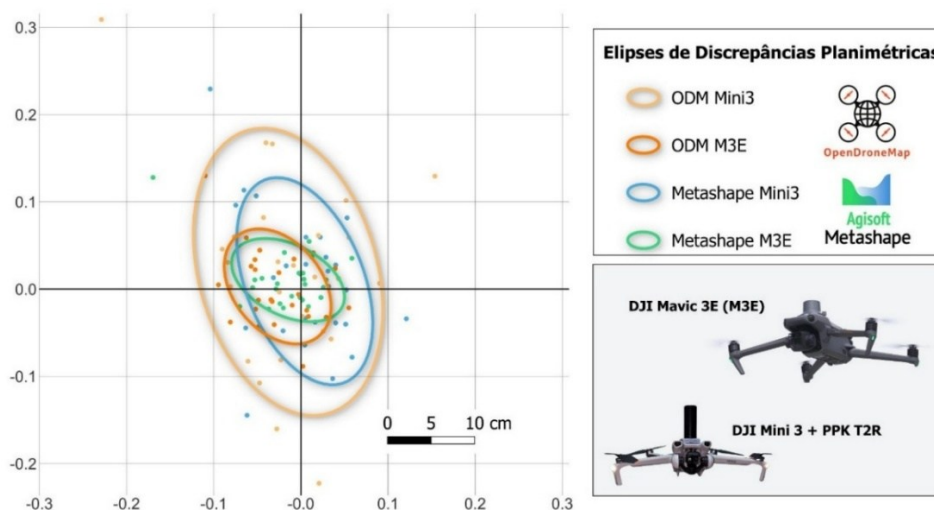


Figura 2 – Elipses das discrepâncias planimétricas dos processamentos.
 Fonte: Autores (2025).

As duas maiores elipses representam a distribuição das incertezas do DJI Mini 3, evidenciando discrepâncias mais amplas; onde os resultados do Metashape apresentaram melhor concentração dos resíduos em torno do (0,0) quando comparado ao WebODM. As duas menores elipses correspondem aos resultados do DJI Mavic 3E (M3E), que apresentou, em ambos os softwares, resultados precisos e acurados, com $RMS_{XY} < 6,4$ cm (Tabela 4).

O M3E combina sensor CMOS 4/3" e obturador mecânico (1/2000 s), reduzindo significativamente desfoque de movimento e efeitos de rolling shutter, o que tende a otimizar a precisão do mapeamento. Já o Mini 3 possui sensor CMOS 1/1,3" e obturador eletrônico (*rolling shutter*), demandando correção específica no processamento e permanecendo mais suscetível a pequenos desfoques. Além disso, as resoluções espaciais estimadas a 100 m foram de 3,48 cm (Mini 3) e 2,67 cm (M3E), o que pode ter favorecido a identificação mais precisa do centro dos alvos e o fortalecimento geométrico do bloco no M3E. Em síntese, características de câmera e GSD influenciam diretamente a acurácia posicional global.

Conforme a Tabela 6, o M3E alcançou RMS_{XY} aproximadamente duas vezes menor que o do Mini 3. Ainda assim, o Mini 3 com PPK (sem GCPs) atingiu 9 cm no Metashape e 13 cm no WebODM, demonstrando viabilidade para projetos de engenharia que não requerem altíssima acurácia posicional.

3.1 Avaliação da acurácia posicional altimétrica Z

A qualidade da componente vertical (Z) é indispensável em estudo de áreas íngremes e no monitoramento de encostas. A acurácia altimétrica dos MDE foi verificada a partir das discrepâncias dZ entre as cotas extraídas dos produtos testados e as coordenadas GNSS de alta precisão de referência.

Na Tabela 3 foram adotadas as métricas: média (tendência), desvio-padrão (precisão) e RMS_z (indicador global de acurácia altimétrica), distinguindo-se, assim, tendência, dispersão e acurácia. Essa avaliação é especialmente relevante porque as incertezas em Z tendem a se amplificar em terrenos acidentados, podendo comprometer análises geomorfológicas, cálculos de volume e estudos de estabilidade.

Tabela 3 – Estatísticas das discrepâncias altimétricas e RMS_z

Software	UAS	Discrepâncias Altimétricas (em metros)					RMS_z
		Máx	Mín	Média	Desvio Padrão		
WebODM / OpenDroneMap	Mini 3	0.427	0.021	0.159	0.088	0.182	
	Mavic 3E	0.042	-0.114	-0.032	0.037	0.048	
Agisoft Metashape	Mini 3	0.214	-0.043	0.100	0.058	0.115	
	Mavic 3E	0.085	-0.054	0.027	0.036	0.045	

Fonte: Autores (2025).

A Figura 3 apresenta boxplots das discrepâncias altimétricas (dZ) calculadas entre pontos homólogos (teste e referência), com as cotas extraídas do MDS e a identificação planimétrica realizada no ortomosaico, reunindo os resultados dos dois softwares (WebODM e Metashape) e dos dois drones analisados (DJI Mini 3 e Mavic 3E).

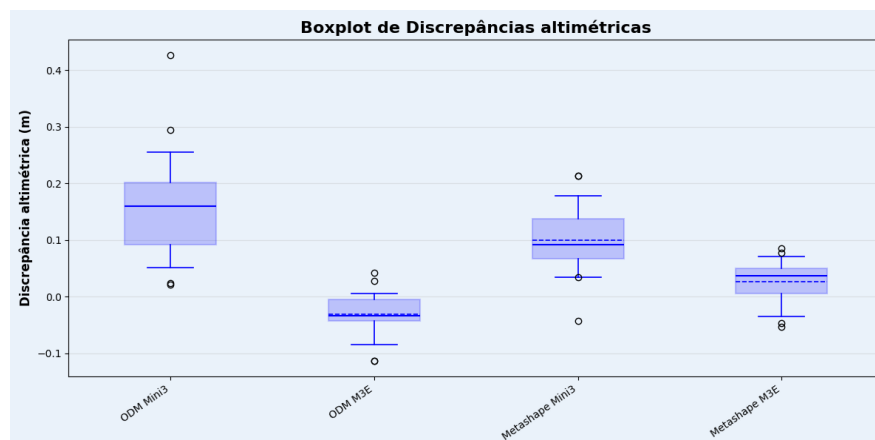


Figura 3 – Gráfico boxplot das discrepâncias altimétricas analisadas. Fonte: Autores (2025).

Da Figura 3, observa-se que as maiores discrepâncias altimétricas ocorrem no processamento do Mini 3 no WebODM, com maior número de outliers. Nos demais casos, as discrepâncias concentram-se próximas de zero, destacando-se o Mavic 3E, cuja tendência (média) é inferior a 3,2 cm, conforme Tabela 3.

3.2 Classificação em relação ao Decreto 89.817 / ET-CQDG

Quanto ao Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), Tabelas 4 e 5 apresentam a classificação de qualidade (planimétrica e altimétrica) para as principais escalas de mapeamento cadastral. Em ambos os drones e softwares, os resultados mostraram-se compatíveis com as exigências brasileiras de acurácia posicional estabelecidas nas especificações técnicas nacionais.

Tabela 4 – PEC-PCD Planimétrico.

Software	UAS	Padrão de Exatidão Cartográfica Planimétrico				
		1:500	1:1.000	1:2.000	1:5.000	1:10.000
WebODM / OpenDroneMap	Mini 3	B	A	A	A	A
	Mavic 3E	A	A	A	A	A
Agisoft Metashape	Mini 3	B	A	A	A	A
	Mavic 3E	A	A	A	A	A

Fonte: Autores (2025).

Tabela 5 – PEC-PCD Altimétrico.

Software	UAS	Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrico				
		1:500	1:1.000	1:2.000	1:5.000	1:10.000
WebODM / OpenDroneMap	Mini 3	C	B	B	A	A
	Mavic 3E	A	A	A	A	A
Agisoft Metashape	Mini 3	B	A	A	A	A
	Mavic 3E	A	A	A	A	A

Fonte: Autores (2025).

4. Considerações finais

A comparação entre plataformas e ambientes de processamento mostrou que o Mavic 3E (sensor maior e obturador mecânico) apresentou RMS menores e classificações PEC-PCD mais estáveis, sobretudo pela menor variabilidade vertical. Ainda assim, o

Mini 3 em PPK alcançou padrões compatíveis para uso técnico, por exemplo, PEC-PCD classe A até 1:1.000 (XY) e classe A até 1:2.000 (Z), confirmando sua viabilidade como solução de baixo custo para monitoramento frequente de encostas, infraestrutura e processos ambientais. Em cenários de calamidade e resposta humanitária, a cadeia aberta e acessível (RTKLib + Geotagger T2R + WebODM/QGIS) favorece mobilização rápida, colaboração local e redução de custos, ampliando a capacidade de atualização temporal e a tomada de decisão.

Como delimitação metodológica e oportunidade de aprofundamento, este estudo concentrou-se em uma única área de encosta íngreme, com parâmetros de voo fixos (altura/sobreposição/velocidade) e *presets* de alta resolução no WebODM. Tais escolhas privilegiam a reprodutibilidade em campo e no processamento, mas restringem a generalização, demandando investigação em outras áreas e condições de processamento. Propõem-se, portanto, como trabalhos futuros: (i) análise de sensibilidade do *gps-accuracy* (incluindo voos cruzados e pesos alternativos para observações GNSS); (ii) estratificação por declividade, uso do solo e cobertura vegetal para investigar padrões espaciais de erro; (iii) ensaios com diferentes alturas, ângulos da câmera, velocidades e sobreposições, avaliando explicitamente o impacto do *rolling shutter*; (iv) exploração de parâmetros avançados do ODM/Metashape visando reduzir vieses altimétricos; (v) interpretação e análise espacial das discrepâncias (anisotropias, *doming/tilting*) e sua relação com a geometria do bloco e o relevo; e (vi) avaliação do *terrain-following* frente a diferentes fontes de MDE. Esses procedimentos tendem a minimizar a dependência de GCPs e maximizar a acurácia no uso de PPK em UAS mais acessíveis, reforçando o potencial do método em áreas de risco e gestão de desastres.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa T2R pelo fornecimento do drone Mini 3 PPK utilizado nesta pesquisa. Agradecem também ao Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) pelo empréstimo do drone Mavic 3E. Registra-se ainda o apoio de campo prestado pelos estudantes da UFPE do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação (PPGCGTG) e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC). Por fim, os autores agradecem aos revisores por seus valiosos comentários e contribuições, que possibilitaram o aprimoramento deste trabalho.

Referências

AGISOFT. *Aerial data processing (without GCPs)*. 2025. Disponível em: <https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000157908-aerial-data-processing-without-gcps->. Acesso em: 18 ago. 2025.

AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ASPRS). *ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*. Edition 2, Version 2. 2024. <https://doi.org/10.14358/ASPRS.PAS.2024>.

ANAC. *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial – RBAC-E nº 94: Regras gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil*. Agência Nacional de Aviação Civil, 2017. Disponível em: https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/ajuste-01/cartografia/divcar/2020/05-rbac-e-94_anac_rpa-vant_02_05_2017.pdf. Acesso em: 11 ago. 2025.

ARAÚJO SILVA, Emanuel et al. Uso de Aeronave Remotamente Pilotada para Extração de Variáveis Dendrométricas de uma Floresta Tropical Seca. *Revista Brasileira de Geografia Física, [S. l.]*, v. 18, n. 3, p. 2054–2068, 2025. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.3.p2054-2068>.

ARKALI, Mehmet; ATIK, Muhammed Enes. Accuracy Assessment of RTK, PPK, and PPP-AR Techniques for Direct Georeferencing in UAV-Based Photogrammetric Mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 48, p. 325-330, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-6-2025-325-2025>.

BRASIL. Exército Brasileiro. Diretoria de Serviço Geográfico. *Norma da Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG)*. EB80-N-72.004. 1. ed. Brasília, 2016.

BRITO, Edmundo Rodrigues de; BASTOS, Frederico de Holanda; CORDEIRO, Abner Monteiro Nunes; SILVA, Ícaro Breno da; PAULA, Davis Pereira de; CARVALHO, Rodrigo Guimarães de; SOARES, Hildebrando dos Santos. Modelagem hidráulica aplicada à análise de riscos de inundação em áreas urbanas brasileiras: o caso da Zona Especial de Interesse Social

(ZEIS) do Lagamar, Fortaleza (Nordeste do Brasil). *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, v. 26, n. 103, p. 320–340, 2025. DOI: [10.14393/RCG2610375334](https://doi.org/10.14393/RCG2610375334).

BRUNO, Nazarena; FORLANI, Gianfranco. Experimental tests and simulations on correction models for the rolling shutter effect in UAV photogrammetry. *Remote Sensing*, v. 15, n. 9, p. 2391, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15092391>.

CARVALHO, V. A.; SANTOS, A. de P. dos; CUNHA, M. M.; BARBOSA, L. da S.; DAL POZ, W. R.; MEDEIROS, N. das G.; OLIVEIRA, J. C. de. Aplicação da estatística direcional no controle de qualidade cartográfica. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 10, n. 2, p. 491–503, 2024. DOI: 10.21680/2447-3359.2024v10n2ID36253. Disponível em: <https://periodicos.ufm.br/revistadoregne/article/view/36253>. Acesso em: 6 fev. 2026.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 92, p. 79-97, jun. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>.

MEDEIROS, L. Í. B., GRAÇA, A. J. S., FAGGION, P. L., VEIGA, L. A. K. Análise comparativa da flexão de barra metálica sob cargas, por diferentes métodos geodésicos: nivelamento geométrico, nivelamento trigonométrico e fotogrametria a curtas distâncias. *Revista de Geociências do Nordeste*, v.11, n.1, p.299-313, 2025. DOI: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n1ID36387>.

DO VALE, Leonardo; CASADO, Alberto; FERNANDES, Bruno; COSTA, Glauber; HUMBERTO AQUINO ROCHA, Joaquin. Monitoramento de Pontes e Viadutos com Uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (Vant): Estudos de Caso. *Revista Brasileira de Geografia Física, [S. l.]*, v. 18, n. 4, p. 2864–2881, 2025. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.4.p2864-2881>.

ELHADARY, A.; RABAH, M.; GHANIM, E.; MOHIE, R.; TAHA, A. The influence of flight height and overlap on UAV imagery over featureless surfaces and constructing formulas predicting the geometrical accuracy. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, v. 11, n. 1, p. 210-223, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/20909977.2022.2057148>.

FRANÇA, L. L. S.; PENHA, A. L. T.; CARVALHO, J. A. B. Comparison between absolute and relative positional accuracy assessment—a case study applied to digital elevation models. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 25, p. e2019003, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702019000100003>.

FRANCO, Guilherme Gandra; NAIME, André Fonseca. Structure From Motion (SfM)—Uma breve revisão histórica, aplicações nas geociências e perspectivas futuras. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 44, 2021. DOI: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_40853.

GARGARI, A. M.; EBADI, H.; ESMAEILI, F.; LATIFZADEH, S. Dynamic 3D network design for UAV-based photogrammetry in mountainous terrain. *Environmental Earth Sciences*, v. 82, n. 7, p. 188, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10864-9>.

GBAGIR, Augustine-Moses Gaavwase; EK, Kylli; COLPAERT, Alfred. OpenDroneMap: multi-platform performance analysis. *Geographies*, v. 3, n. 3, p. 446-458, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/geographies3030023>.

GUIMARÃES, M. J. M., DA SILVA SANTOS, A. C., DA SILVA, A. S., RIBEIRO, D. P., BARROS, J. R. A., & LOPES, I. Mapeamento topográfico com aeronave remotamente pilotada para fins de georreferenciamento de propriedades rurais: Topographic mapping with remotely piloted aircraft for georeferencing rural properties. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 11, n. 1, p. 42-57, 2025. DOI: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n1ID34481>.

İNCEKARA, Abdullah Harun; SEKER, Dursun Zafer. Rolling shutter effect on the accuracy of photogrammetric product produced by low-cost UAV. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, v. 8, n. 4, p. 549-553, 2021. DOI: <https://doi.org/10.30897/ijgeo.948676>.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Geographic information — Data quality — Part 1: General requirements*. ISO 19157-1:2023. Geneva: ISO, 2023.

KANAI, S. A review of structure-from-motion and multi-view-stereo. *J. of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 60, n. 3, p. 95-99, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4287/jsprs.60.95>.

KOSTRZEWA, A., PŁATEK-ŻAK, A., BANAT, P., & WILK, Ł. Open-Source vs. Commercial Photogrammetry: Comparing Accuracy and Efficiency of OpenDroneMap and Agisoft Metashape. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 48, p. 65-72, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W4-2025-65-2025>.

LITCHI UTILITIES. *How Does Litchi's "Above Ground" Option Work.* s.d. Disponível em: <https://www.litchiutilities.com/docs/aboveGround.php>. Acesso em: 6 fev. 2026.

MARTÍNEZ-CARRICONDO, Patricio; AGÜERA-VEGA, Francisco; CARVAJAL-RAMÍREZ, Fernando. Accuracy assessment of RTK/PPK UAV-photogrammetry projects using differential corrections from multiple GNSS fixed base stations. *Geocarto International*, v. 38, n. 1, p. 2197507, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2197507>.

MORA-FELIX, Zuriel Dathan et al. Effect of photogrammetric RPAS flight parameters on plani-altimetric accuracy of DTM. *Open Geosciences*, v. 12, n. 1, p. 1017-1035, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0189>.

NEX, F., ARMENAKIS, C., CRAMER, M., CUCCI, D. A., GERKE, M., HONKAVAARA, E. & SKALOUD, J. UAV in the advent of the twenties: Where we stand and what is next. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 184, p. 215–242, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.12.006>.

OPENDRONEMAP COMMUNITY. OpenDroneMap (ODM) v3.5.5: *Open Source Toolkit for Processing Aerial Imagery* [software]. 2025. Disponível em: <https://github.com/OpenDroneMap/ODM> e <https://www.opendronemap.org>. Acesso em: 11 ago. 2025.

PESSOA NETO, A. G.; LAFAYETTE, K. P. V.; CORREA, M. M. Mapeamento de suscetibilidade a processos erosivos na bacia hidrográfica do rio Tejipió/PE. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, v. 26, n. 103, p. 13–28, 2025. DOI: [10.14393/RCG2610372785](https://doi.org/10.14393/RCG2610372785).

RAUHALA, A. Accuracy assessment of UAS photogrammetry with GCP and PPK-assisted georeferencing. In: *International conference on FinDrones*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 57-73. DOI: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-44607-8_4.

SIMÕES, D. P., DE OLIVEIRA, H. C., JÚNIOR, O. F. L., & COSTA, D. C. Métodos de Planejamento de Rotas para RPAs: uma Revisão da Literatura. *Rev. Bras. Cartogr.*, v. 74, n. 2, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv74n2-60138>.

SILVA, M. A. S.; RODRIGUES, M. M.; ARNAUT, L. R.; LACERDA, H. C.; SILVA, M. G. C.; SOARES, W. O.; FARIA, A. L. L. Análise de áreas de preservação permanente de curso hídrico em Viçosa (MG) por meio de imagens de aeronave remotamente pilotada. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, v. 26, n. 105, p. 111–129, 2025. DOI: [10.14393/RCG2610575643](https://doi.org/10.14393/RCG2610575643).

SINGH, Chandra Has; MISHRA, Vishal; JAIN, Kamal. High-resolution mapping of forested hills using real-time UAV terrain following. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 10, p. 665-671, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-1-W1-2023-665-2023>.

TASCA, B. F. C.; FRANCO, F. M.; SIQUEIRA, A. J. B. Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS): a fast and accurate way for monitoring landfills: Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS): a fast and accurate way for monitoring landfills. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 11, n. 1, p. 955-969, 2025. DOI: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n1ID39327>.

TKÁČ, Matúš; MÉSÁROŠ, Peter. Utilizing drone technology in the civil engineering. *Journal of Civil Engineering*, v. 14, n. 1, p. 27-37, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1515/sspjce-2019-0003>.

TOFFANIN, Piero. *OpenDroneMap: The Missing Guide: A Practical Guide to Drone Mapping Using Free and Open Source Software*. 2. ed. UAV4GEO, 2023.

TÜRK, Tark et al. Accuracy assessment of UAV-post-processing kinematic (PPK) and UAV-traditional (with ground control points) georeferencing methods. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 194, n. 7, p. 476, 2022. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-022-10170-0>.

WANG, Tao; GAN, Vincent JL. Enhancing 3D reconstruction of textureless indoor scenes with IndoReal multi-view stereo (MVS). *Automation in Construction*, v. 166, p. 105600, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105600>.

ŽABOTA, B.; KOBAL, M. Accuracy assessment of uav-photogrammetric-derived products using PPK and GCPs in challenging terrains: In search of optimized rockfall mapping. *Remote Sensing*, v. 13, n. 19, p. 3812, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13193812>.

ZHOU, Yilin et al. A two-step approach for the correction of rolling shutter distortion in UAV photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 160, p. 51–66, fev. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.020>.