

WELDON MARTINS DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DA NUVEM DE PONTOS GERADA POR
PROCESSAMENTO FOTOGRAMÉTRICO DE IMAGENS
ADQUIRIDAS POR SENSORES EMBARCADOS EM ARP PARA
LEVANTAMENTOS TOPOGRÁFICOS DE ALTA PRECISÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Agricultura e Informações Geoespaciais – PPGAIG da
Universidade Federal de Uberlândia – UFU, *Campus*
Monte Carmelo, como parte das exigências para obtenção
do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Vinícius Francisco Rofatto

Coorientador

Prof. Dr. Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis

MONTE CARMELO
MINAS GERAIS – BRASIL
2025

**Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

S237 Santos, Weldon Martins dos, 1976-
2025 Avaliação da Acurácia da Nuvem de Pontos Gerada por
Processamento Fotogramétrico de Imagens Adquiridas por
Sensores Embarcados em ARP para Levantamentos Topográficos
de Alta Precisão [recurso eletrônico] / Weldon Martins dos Santos. -
2025.

Orientador: Vinícius Francisco Rofatto.
Coorientador: Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais.
Modo de acesso: Internet.
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.683>
Inclui bibliografia.

1. Agronomia. I. Rofatto, Vinícius Francisco, 1986-, (Orient.). II.
Gallis, Rodrigo Bezerra de Araújo, 1977-, (Coorient.). III.
Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Agricultura
e Informações Geoespaciais. IV. Título.

CDU: 631

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

WELDON MARTINS DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DA NUVEM DE PONTOS GERADA POR
PROCESSAMENTO FOTOGRAMÉTRICO DE IMAGENS
ADQUIRIDAS POR SENSORES EMBARCADOS EM ARP PARA
LEVANTAMENTOS TOPOGRÁFICOS DE ALTA PRECISÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Agricultura e Informações Geoespaciais – PPGAIG da
Universidade Federal de Uberlândia – UFU, *Campus*
Monte Carmelo, como parte das exigências para obtenção
do título de “Mestre”.

APROVADA em 28 de novembro de 2025.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Vinícius Francisco Rofatto – (IGESC/UFU) – Presidente

Prof. Dr. Marcelo Tomio Matsuoka – (IGESC/UFU)

Prof. Dr. Francisco de Deus Fonseca Neto – Instituto Federal do Espírito Santo (CTG/IFES)

Prof. Dr. Vinícius Francisco Rofatto

Instituto de Geografia, Geociências e Saúde Coletiva (IGESC/UFU)
(Orientador)

MONTE CARMELO
MINAS GERAIS – BRASIL
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Informações
Geoespaciais
 Rodovia LMG 746, Km 01, s/nº, Bloco 1AMC, Sala 1A202 , Monte Carmelo-MG, CEP 38.500-000
 Telefone: (34) 3810-1033 - ppgaig@iciag.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agricultura e Informações Geoespaciais				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico				
Data:	28/11/2025	Hora de início:	14:00h	Hora de encerramento:	16:00h
Matrícula do Discente:	32222AIG010				
Nome do Discente:	Weldon Martins dos Santos				
Título do Trabalho:	Avaliação da Acurácia da Nuvem de Pontos Gerada por Processamento Fotogramétrico de Imagens Adquiridas por Sensores Embarcados em ARP para Levantamentos Topográficos de Alta Precisão				
Área de concentração:	Informações geoespaciais e tecnologias aplicadas à produção agrícola				
Linha de pesquisa:	Desenvolvimento e Aplicações de Métodos em Informações Geoespaciais				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Novas abordagens de medição e modelagem espacial para a agricultura				

Reuniu-se em sala virtual a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais, composta pelo prof. Dr. Vinicius Francisco Rofatto (Universidade Federal de Uberlândia-UFU), orientador do candidato, prof. Dr. Marcelo Tomio Matsuoka (Universidade Federal de Uberlândia-UFU), e prof. Dr. Francisco de Deus Fonseca Neto (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, IFES).

Iniciados os trabalhos, o presidente da mesa, Dr. Vinicius Francisco Rofatto, apresentou a Comissão Examinadora e o discente, agradeceu a presença do público e concedeu-lhe a palavra para a exposição de seu trabalho. A duração da apresentação e o tempo destinado à arguição e às respostas ocorreram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidato:

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Vinicius Francisco Rofatto, Professor(a) do Magistério Superior**, em 02/12/2025, às 10:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Francisco de Deus Fonseca Neto, Usuário Externo**, em 02/12/2025, às 12:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Tomio Matsuoka, Professor(a) do Magistério Superior**, em 03/12/2025, às 09:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6898910** e o código CRC **4508617E**.

DEDICATÓRIA

“Dedico este trabalho àqueles que não desistem diante dos caminhos difíceis, que compreendem que o esforço, a disciplina e a coragem são partes essenciais de qualquer conquista verdadeira. Que a fé sustente, o conhecimento ilumina e o amor pelo que se faz seja sempre maior que o cansaço. Porque persistir, mesmo em silêncio, é uma forma profunda de vencer, porque o que vem de Deus... não atrasa, não falha e nunca erra o destino.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus (essência da vida em tudo), toda honra e glória a Ele, por ter me proporcionado saúde, fé, perseverança e resiliência para superar todos os desafios até aqui! Obrigado Deus pela tenacidade adquirida ao longo da vida.

À Suelem Farias Soares Martins, minha amada esposa, namorada, companheira, amiga... Todos os predicados posso atribuí-la, pois sempre esteve comigo, dedicando todo seu amor e apoio, carinho, dedicação, paciência e cuidado. Você é um exemplo de leveza na sua maneira de viver. Sou grato a Deus pela sua presença em minha vida. Essa conquista é apenas mais um degrau dos muitos que estamos construindo juntos nessa jornada. Muitíssimo obrigado!

Ao Weldon Ravi, nosso amado filho, pela sua inocência — característica tão própria de uma criança —, pela pureza no coração, pela alegria, paciência, sinceridade e energia que nos fazem sentir a presença de Deus em nosso caminho. Dedico este trabalho com a esperança de que, um dia, ele compreenda o verdadeiro significado deste gesto para nossa família. Há 11 anos, quando Ravi chegou às nossas vidas, entendi o verdadeiro motivo da minha existência. Foi aí que percebi que um abraço sonolento pode ser o melhor momento do dia, que um sorriso pode ser a coisa mais linda do mundo e que, longe de ser eu quem o ensina a ser criança, é ele quem me ensina a ser adulto.

À minha amada mãe, Edite Santos (Dona Nininha), por suas preciosas orações intercessoras a Deus por mim e por nossa família. A meu Pai, Pedro Martins dos Santos (*in memoriam*), pelos bons exemplos de vida que me ajudaram a me tornar uma pessoa do bem — e a todos os meus familiares, com gratidão.

À minha madrinha Marilda, ao meu padrinho José Humberto Martins, à Ericka e a toda a família. Vocês foram meu alicerce nessa caminhada. Obrigado por tudo, principalmente pelo acolhimento à Suelem e ao Weldon Ravi durante o um ano e meio em que eles passaram em Itabuna sem a minha presença. Um grande abraço fraternal, e que o Arquiteto da Vida os proporcione tudo de bom — vocês merecem!

Ao meu “velho” professor da Escola Técnica em Edificações — amigo, exemplo de ser humano e profissional —, você sempre foi uma fonte inesgotável de inspiração para mim. Obrigado por ter existido na minha vida, obrigado por compartilhar seu conhecimento comigo por longo anos. Alfredo José de Oliveira Coelho (*in memoriam*) — Arquiteto e Engenheiro.

Aos amigos Januário, Douglas e em especial ao Técnico Engenheiro Mestre e Doutor Valdiney, José da Silva do LTGeo (Laboratório de Topografia e Geodésia), agradeço pelos anos de companheirismo e pelas alegrias compartilhadas — vocês foram pilares estruturais deste trabalho e de muitos outros na UFU, tornando esse caminho mais leve e possível. Ao Jhonatan Miatto, Serginho, ambos Engenheiros EACs que se dedicaram alguns dias de campo nesse trabalho. Ao amigo Carlinhos (*in memoriam*), do LASER (Laboratório de Sensoriamento Remoto e Fotogrametria), minha gratidão eterna — e a todos. Vocês ocupam um lugar especial no meu coração. Ao amigo Cleverson, Professor Doutor da UESC e parceiro de longa data na UFV, minha sincera gratidão pela amizade e pela caminhada conjunta. Ao Robertaurus (José Roberto) — amigo, padrinho de casamento e parceiro da Engenharia de Agrimensura na UFV e tantos outros lugares —, você é uma verdadeira fonte de inspiração em fé, persistência e resiliência. Cabra de garra! Ao amigo Edinho (Cabojhow), meu muito obrigado pelas orações e pela torcida constante ao longo dessa jornada, desde épocas remotas.

Ao Túlio Alves Santana e ao José Humberto do Nascimento, grandes amigos e colegas de trabalho que acompanharam as fases do desenrolar deste desafio, minhas sinceras palavras de gratidão: suas sugestões sempre foram de grande relevância, nossas conversas enriqueceram a caminhada, e seus conselhos foram devidamente “processados” com muita admiração.

A todos os colegas da UFU — especialmente os técnicos administrativos, alunos, terceirizados e docentes —, meu sincero agradecimento pelo apoio e convivência ao longo dessa jornada. Aos todos que ocupam a Sala de Engenharia. Ao Instituto de Geografia, Geociências e Saúde Coletiva (IGESC) da UFU, sob a direção do Professor Boscolli, pelas ajudas e apoio, aos colegas da Prefeitura Universitária e do Gabinete da Reitoria da UFU — assessorado pelo Professor Clésio e pelo Reitor, Professor Valder Steffen Jr. —, registro meu agradecimento pelo apoio institucional e pela amizade.

À Universidade Federal de Uberlândia – UFU, pelo apoio institucional, ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais – PPGAIG/ICIAG, e ao Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica – EAC/IGESC, no *campus* de Monte Carmelo – MG, pelos recursos e suporte técnico durante o desenvolvimento desta pesquisa pelo uso dos laboratórios (LTGeo – Laboratório de Topografia e Geodésica, LASER – Laboratório de Sensoriamento Remoto e Fotogrametria, SIGEO – Laboratório de SIG e Geoprocessamento). Agradeço, também, ao Senhor Romildo Rosa Cardoso pela autorização de acesso e permanência na propriedade de sua posse, a qual é seccionada pela rodovia estudada, permitindo a montagem da instrumentação necessária à realização dos levantamentos de campo.

Aos Professores, Vinícius Rofatto pelas ajuda na Orientação. Aos Professores da banca, Marcelo Tomio Matsuoka e Francisco de Deus Fonseca Neto pelas suas disponibilidade e rica contribuição como membros da banca e sugestões que vieram contribuir com essa pesquisa. ao Professor Ricardo Barbosa por sanar várias dúvidas e ao Rodrigo, pelo apoio. Ao Prof. Fabiano Mota da Silva (Minha Jóia) pelo apoio e momentos de descontração. A Profª Luziane, e Profº Santil pelo olhar atento, pelas reflexões que ampliaram minha compreensão institucional e pelo apoio ao longo dessa jornada.

Um agradecimento especial ao povo brasileiro, por ter financiado meus estudos desde sempre, por meio dos impostos que sustentam as escolas, colégios e universidades públicas e de qualidade deste país — em especial, aquelas em que tive o privilégio de estudar. Acredito que o mercantilismo da educação representa uma forma de inanição de uma sociedade livre e consciente, pois transforma a educação em uma mercadoria, onde interesses comerciais são priorizados em detrimento dos objetivos educacionais.

Aos amigos e colegas da UFV – Universidade Federal de Viçosa, que tanto contribuíram para minha trajetória em Viçosa, proporcionando momentos de intenso aprendizado conjunto e troca de conhecimentos técnicos e de vida — saibam que esta conquista aqui é fruto direto daquele passado vivido com vocês, com direito a cada perrengue, risada e caos criativo que compartilhamos, principalmente aos que residiram e passaram pelo 38tão (Alojamento Posinho 1712 na UFV).

Antecipadamente, peço desculpas a todos aqueles que, porventura, não tenham sido mencionados neste rol de agradecimentos. Expresso, ainda assim, minha eterna gratidão.

“Agradecer é admitir que houve um momento em que se precisou de alguém; é reconhecer que o ser humano jamais poderá alcançar, por si só, o dom da autossuficiência. Ninguém — e nada — cresce sozinho; é sempre um olhar de apoio, uma palavra de incentivo, um gesto de compreensão, uma atitude de amor.”

Por fim: “**ESTUDAR, SABER, AGIR e VENCER.**” Levo comigo, no mais íntimo do meu ser, o lema, encravado nas 4 pilares, símbolo, na entrada da Universidade Federal de Viçosa — não apenas como um conjunto de palavras, mas como um verdadeiro princípio orientador azimutal que sempre me apontou em boas direções. Jamais almejei qualquer conquista que não fosse fruto do estudo disciplinado e do esforço contínuo. Minha caminhada acadêmica ultrapassa, em muito, os limites temporais dos últimos anos: ela representa uma jornada de dedicação incansável, de enfrentamento de desafios e de profundo comprometimento com o conhecimento e a transformação pessoal. Obrigado grandiosa UFV!

BIOGRAFIA

“Entre linhas, pontos e coordenadas: fragmentos de uma jornada em construção.” Assim começa minha história — Weldon Martins dos Santos nascido em 29 de agosto, sob o céu quente da cidade de Itabuna, no sul da Bahia. Meu primeiro contato com o mundo das letras aconteceu ainda pequeno, entre os corredores simples, mas acolhedores, da Escolinha São Paulo da Cruz — carinhosamente chamada de Convento Passionista da Paróquia Santa Maria Goretti, um nome que ainda hoje me soa quase místico. Foi ali que tracei meus primeiros rabiscos no papel, os primeiros desenhos e pinturas de um percurso que mais tarde se revelaria feito de linhas — algumas retas, outras sinuosas — como os contornos de um mapa topográfico.

A infância e adolescência seguiram seu curso entre escolas públicas da cidade: a Estadual Antônio Carlos Magalhães e o Colégio Estadual de Itabuna. Mas foi no ensino médio que a bússola interna começou a apontar para algo maior. Fascinado pelo ambiente técnico e pelas promessas que ele trazia — de um futuro concreto, de possibilidades reais, embora ainda incerto para o jovem Weldon —, decidi me lançar em diversos processos seletivos: Agrimensura na EMARC, Edificações no CEFET em Salvador, e até o Colégio Naval em Angra dos Reis – RJ, sonhando com a farda de oficial da Escola Naval da Marinha. Fui aprovado em todos. Mas escolhi permanecer em Itabuna, talvez por instinto ou por reconhecer que o que eu buscava poderia ser construído ali mesmo, pedra sobre pedra. Ingressei no curso Técnico em Edificações do Colégio Estadual Democrático Professor Josué Brandão, também conhecido, com reverência local, como “a Escola Técnica”.

Foi durante esse período que comecei a tocar o mundo real da engenharia. Estagiei na UESC – Universidade Estadual de Santa Cruz, no setor de Obras e Reparos — lugar que, embora técnico, me revelou como o conhecimento se transforma em infraestrutura, e como os traços no papel se tornam vigas e paredes. Sob a mentoria do Professor Alfredo José de Oliveira Coelho, arquiteto e engenheiro, aprendi mais do que técnicas: aprendi a enxergar o espaço com precisão em escala maiores grafadas em um escalímetro. Trabalhei em seu escritório de arquitetura e engenharia, desenhando projetos que não eram apenas estruturas — eram ideias convertidas em concreto.

Meu envolvimento em projetos como o da fábrica Bahiatech, em Ilhéus, foi um divisor de águas. Aprendi a usar o AutoCAD R14, domínio técnico essencial que, na época, me abriu caminhos e me permitiu empreender ainda jovem, abrindo um próprio negócio e prestando serviços para empresas e profissionais de engenharia entre Itabuna e Ilhéus. Mas não bastava. As linhas traçadas pediam mais profundidade. Com o desejo de assinar meus próprios projetos, deixei para trás o curso de Matemática na UESC, os clientes, a cidade e os afetos (família e amigos) — tudo por um sonho maior.

Mudei-me para Viçosa, Minas Gerais, e ingressei na Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde concluí o curso de Engenharia de Agrimensura, logo após, Cartográfica. A decisão exigiu renúncias, mas me abriu várias oportunidades, antes impossíveis. Com a graduação, vieram projetos em várias regiões do país: mapeamentos de precisão, coordenação de campo e a responsabilidade por grandes obras. Participei do nivelamento geométrico das cotas de inundação da Hidrelétrica de Belo Monte, em Altamira (PA), Jiral e Santo Antônio, em Porto Velho (RO), Teles Pires, em Paranaíta (MT) e Jacareacanga (PA). Da locação de linhas sísmicas para a exploração de hidrocarbonetos — petróleo e gás natural na Bacia do Parnaíba e na Amazônia. Atuei no gerenciamento na dragagem e monitoramento de barragens de rejeitos da Vale, em cidades como Mariana, Itabira e Belo Horizonte, além de fiscalizar trabalhos em ferrovias norte/sul no Norte e Centro-Oeste e rodovias espalhadas pelo país. Cada trabalho era um novo território, uma nova coordenada a ser decifrada.

Em 2021, busquei aprofundar meus conhecimentos e me tornei especialista em Geoprocessamento pela Faculdade Única de Ipatinga. O curso ampliou minha visão sobre o

potencial dos dados geoespaciais para análise de fenômenos urbanos, rurais e ambientais. Mapas, cartas topográficas e plantas se tornaram não apenas ferramentas de trabalho, mas também expressões de interpretação do mundo.

Hoje, estou como Engenheiro no curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), no campus de Monte Carmelo. Desde agosto de 2022, mergulhei ainda mais fundo na pesquisa, ingressando no mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais (PPGAIG). Minha pesquisa é uma interseção entre precisão e inovação: analiso a qualidade posicional de modelos 3D gerados por fotogrametria com ARPs (drones), tendo como base um trecho de rodovia referenciada com GNSS. A meta? Garantir que a nuvem de pontos — essas pequenas partículas digitais que formam o nosso entendimento do espaço — seja precisa, confiável e útil para levantamentos topográficos de alta resolução.

Entre medições e mapas, aprendi que a vida, assim como a engenharia, se constrói sobre fundamentos sólidos, mas também exige adaptação constante. Meu percurso é feito de escolhas — algumas certeiras, outras arriscadas —, todas guiadas por DEUS em um desejo permanente de entender melhor o espaço, o tempo e, por que não, a mim mesmo.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	6
2.1.	Modelagem de nuvem de pontos associadas aos pontos de apoio geodésico (controle/checagem) e utilização de técnicas de posicionamento associados a algoritmos computacionais atuais.....	9
3.	MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1.	Localização da área.....	13
3.2.	Implantação dos pontos de apoio (controles GCPs e checagem CKPs).....	14
3.3.	Levantamento do eixo da rodovia com o uso de receptor GNSS em modo RTK no trecho de interesse	22
3.4.	Plano de voo.....	23
3.5.	Geração da nuvem de pontos	25
3.6.	Georreferenciamento da nuvem de pontos	26
3.7.	Extração da feição de interesse (rodovia)	28
3.8.	Registro dos pontos coletados pelo receptor GNSS com a nuvem gerada pelo processamento aerofotogramétrico utilizando ARP	29
3.9.	Validação externa	31
3.10.	Distribuição espacial do desvio padrão E N h	32
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1.	Distribuição espacial dos erros E, N, h	34
4.2.	Erros na componente Este (X)	36
4.3.	Erros na componente Norte (Y)	36
4.4.	Erros na componente (Z)	37
4.5.	Métricas RMSE, MAE, Máximo e Mínimo	37
4.6.	Interpretação	39
4.6.1.	Acurácia Horizontal:	40
4.6.2.	Acurácia Vertical:	41
5.	CONCLUSÕES	41
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

SANTOS, WELDON MARTINS DOS. **Avaliação da Acurácia da Nuvem de Pontos Gerada por Processamento Fotogramétrico de Imagens Adquiridas por Sensores Embarcados em ARP para Levantamentos Topográficos de Alta Precisão.** 2025. 67 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Informações Geoespaciais) – Universidade Federal de Uberlândia, *Campus Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil*¹. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.683>.

RESUMO

O avanço das geotecnologias e a consolidação das Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) têm ampliado significativamente o uso da fotogrametria digital na geração de produtos cartográficos de alta resolução, especialmente para levantamentos topográficos e aplicações agrícolas. Nesse contexto, esta dissertação teve como objetivo avaliar a acurácia tridimensional da nuvem de pontos gerada por processamento fotogramétrico de imagens adquiridas por sensores embarcados em RPA, tomando como referência observações obtidas por receptor GNSS em modo *Real Time Kinematic* (RTK). A área de estudo corresponde a um trecho da Rodovia MG-223, entre os quilômetros 36 à 39, no município de Estrela do Sul, Minas Gerais, caracterizado por relevo acidentado e expressiva variação altimétrica, totalizando aproximadamente 60 hectares. Foram implantados 44 pontos de apoio, sendo 26 Pontos de Controle (GCPs) e 18 Pontos de Checagem (CKPs), cujas coordenadas foram determinadas com receptor GNSS de dupla frequência, referenciadas à estação RBMC MGMT em Monte Carmelo – MG. O levantamento aerofotogramétrico foi realizado com planejamento de voo adequado, e as imagens foram processadas por meio dos algoritmos *Structure from Motion* (SfM) e *Multi-View Stereo* (MVS), do Agisoft Metashape, resultando na geração de uma nuvem de pontos densa e georreferenciada. A validação externa do modelo foi conduzida pela comparação entre 2.350 pontos GNSS-RTK e as coordenadas correspondentes extraídas da nuvem de pontos, analisando-se as discrepâncias nas componentes Leste E(X), Norte N(Y) e Altura h(Z), bem como métricas estatísticas como RMSE, MAE e erros máximos e mínimos. Os resultados indicaram valores de RMSE inferiores a 5 cm nas componentes horizontais e a 10 cm na componente vertical, enquadrando o produto gerado na Classe A do Padrão de Exatidão Cartográfica Brasileiro (PEC/EP) e no Nível 1 de máxima acurácia segundo a ASPRS (2014). Conclui-se que a fotogrametria com ARP, quando associada a um rigoroso controle geodésico e a procedimentos metodológicos adequados, é capaz de produzir nuvens de pontos com elevada confiabilidade métrica, mostrando-se uma alternativa tecnicamente viável e eficiente para levantamentos topográficos de alta precisão e aplicações em agricultura e infraestrutura viária.

Palavras-chave: acurácia posicional, ARP, fotogrametria, GNSS-RTK, nuvem de pontos, topografia.

¹ Orientador: Prof. Dr. Vinícius Francisco Rofatto – UFU

SANTOS, WELDON MARTINS DOS. **Accuracy Assessment of the Point Cloud Generated by Photogrammetric Processing of Images Acquired by Sensors Onboard RPA for High-Precision Topographic Surveys.** 2025. 67 f. Dissertation (Master in Agriculture and Geospatial Information) – Federal University of Uberlândia, *Campus Monte Carmelo*, Minas Gerais, Brazil². Available at: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.683>.

ABSTRACT

The advancement of geotechnologies and the consolidation of Remotely Piloted Aircraft (RPA) have significantly expanded the use of digital photogrammetry in the generation of high-resolution cartographic products, especially for topographic surveys and agricultural applications. In this context, this dissertation aimed to evaluate the three-dimensional accuracy of the point cloud generated through photogrammetric processing of images acquired by sensors onboard an RPA, using observations obtained with a Global Navigation Satellite System (GNSS) receiver operating in Real Time Kinematic (RTK) mode as reference. The study area corresponds to a section of Highway MG-223, between kilometers 36 and 39, in the municipality of Estrela do Sul, Minas Gerais, Brazil, characterized by rugged terrain and significant altimetric variation, totaling approximately 60 hectares. A total of 44 ground control points were established, including 26 Ground Control Points (GCPs) and 18 Check Points (CKPs), whose coordinates were determined using a dual-frequency GNSS receiver and referenced to the RBMC MGMT station in Monte Carmelo, Minas Gerais. The aerial photogrammetric survey was conducted following an appropriate flight plan, and the images were processed using the Structure from Motion (SfM) and Multi-View Stereo (MVS) algorithms in Agisoft Metashape, resulting in a dense and georeferenced point cloud. External validation of the model was performed by comparing 2,350 GNSS-RTK points with the corresponding coordinates extracted from the point cloud, analyzing discrepancies in the East E(X), North N(Y), and Height h(Z) components, as well as statistical metrics such as RMSE, MAE, and maximum and minimum errors. The results indicated RMSE values below 5 cm for the horizontal components and below 10 cm for the vertical component, classifying the generated product as Class A according to the Brazilian Positional Accuracy Standard (PEC/EP) and Level 1 (highest accuracy) according to ASPRS (2014). It is concluded that RPA-based photogrammetry, when combined with rigorous geodetic control and appropriate methodological procedures, is capable of producing point clouds with high metric reliability, proving to be a technically viable and efficient alternative for high-precision topographic surveys and applications in agriculture and roadway infrastructure.

Keywords: positional accuracy, RPA, photogrammetry, GNSS-RTK, point cloud, topography.

² Advisor: Prof. Dr. Vinícius Francisco Rofatto – UFU

1. INTRODUÇÃO

O avanço acelerado das geotecnologias tem transformado profundamente a forma como informações geoespaciais são adquiridas, processadas e integradas em aplicações de engenharia, planejamento territorial, monitoramento ambiental e, especialmente, agricultura. Nas últimas décadas, tecnologias como o Sistema Global de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System – GNSS*) e as (*Remotely Piloted Aircraft – RPAs*), aqui, nesta pesquisa tratadas como Aeronaves Remotamente Pilotadas – ARP, consolidaram-se como pilares da produção de dados geoespaciais de alta densidade e resolução, permitindo a construção de Modelos Digitais do Terreno (MDTs) cada vez mais precisos e compatíveis com a complexidade das demandas contemporâneas (Nex & Remondino, 2014; Cao et al., 2024). Esse cenário tem sido impulsionado pela crescente necessidade de informações confiáveis em áreas como agricultura de precisão, projetos geométricos de estradas, rodovias e infraestrutura viária, mineração, manejo de recursos naturais, avaliação ambiental, e na área civil das engenharias, conforme ressaltado por Aibin et al. (2021); Ali et al. (2021); Jiménez et al. (2021) e Yasyukevich et al. (2024).

A fotogrametria aérea realizada com ARPs — popularmente conhecidos como drones — tem sido um dos motores dessa transformação. A capacidade de gerar milhares de pontos em uma única missão de voo, dando origem a nuvens densas de pontos (em inglês, *Point Clouds*), revolucionou os levantamentos topográficos e redefiniu os parâmetros de custo, tempo e qualidade na geração de produtos cartográficos (Smith et al., 2016; Guimarães et al., 2023; Gomes et al., 2024). Essas nuvens de pontos tridimensionais constituem a base para elaboração de Modelos Digitais do Terreno (MDTs), Modelos Digitais de Superfície (MDSs), ortomosaicos, análises volumétricas e inspeções estruturais, ampliando sobremaneira o potencial de uso dessa tecnologia em diferentes setores da economia contemporânea.

A modelagem digital do terreno tornou-se elemento estratégico também para aplicações agrícolas. A agricultura de precisão, uma das áreas centrais do PPGAIG, depende diretamente de produtos cartográficos de alta resolução para o gerenciamento agrícola que utiliza tecnologia avançada para monitorar, medir e responder à variabilidade dentro de uma lavoura, em apoio a identificação de zonas de manejo, linhas de plantio, planejamento de terraceamento, estimativas de erosão, delimitação de talhões, análises geomorfométricas e modelagem hidrológica de áreas produtivas. Um MDT detalhado permite interpretar como a topografia influencia a distribuição de água no solo, a dinâmica de insumos, a produtividade das culturas e a vulnerabilidade a

processos erosivos — fatores fundamentais para a tomada de decisão em sistemas agrícolas modernos. Assim, o aprimoramento das metodologias de aquisição e validação de dados tridimensionais tem impacto direto na sustentabilidade, eficiência e competitividade da agricultura brasileira (Florin et al., 2024; Silva; Rangel; Campos, 2020).

Nesse contexto, um MDT é definido como uma representação tridimensional da superfície terrestre, que incorpora informações espacialmente referenciadas e, preferencialmente, acuradas (Gripp Júnior, 2009). Sua obtenção tem sido historicamente associada a levantamentos topográficos tradicionais, realizados com Estações Totais e/ou GNSS geodésico (Guth et al., 2021). Entretanto, o advento da fotogrametria digital baseada em (*Structure-from-Motion* – SfM) e (*Multi-View Stereo* – MVS) possibilitou novos caminhos para reconstruir superfícies com alta densidade de pontos e grande detalhamento geométrico (Carrivick et al., 2016; Bento et al., 2022). Ferramentas computacionais robustas, como algoritmos (*Scale-Invariant Feature Transform* – SIFT), técnicas de ajustamento por feixe (em inglês, *bundle adjustment*) e métodos automáticos de correspondência de feições (em inglês, *feature matching*), tornaram-se amplamente disponíveis, impulsionando a adoção massiva de ARPs em ambientes agrícolas, urbanizados e florestais.

Paralelamente, os avanços no GNSS — especialmente no modo (*Real Time Kinematic* – RTK) — reforçaram o papel desse sistema como referência de alta precisão para levantamentos topográficos e geodésicos. O GNSS-RTK possibilita o cálculo de coordenadas corrigidas em tempo real, alcançando precisões centimétricas ou milimétricas, a depender do casos, o que garante confiabilidade para obras de infraestrutura, planejamento rural, calibração de máquinas agrícolas e validação de produtos fotogramétricos (Benjamin et al., 2019; Nordin et al., 2021; Ahmed et al., 2024). No Brasil, normas como o Decreto-Lei 89.817/1984 e a Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) e Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG) estabelecem critérios para aquisições e controle de dados posicionais para produtos cartográficos, reforçando a necessidade de avaliações sistemáticas para garantir conformidade com os padrões nacionais (BRASIL, 2016a; BRASIL, 2016b).

Apesar dos significativos avanços tecnológicos, por exemplo ARPs com módulo RTK, desafios importantes persistem na avaliação da acurácia e precisão dos dados produzidos, principalmente em locais com topografia accidentadas de difícil acesso (Valente et al., 2020; Hupy; Chandrasekaran, 2024). A qualidade das nuvens de pontos depende de fatores como calibração dos sensores, distribuição adequada de Pontos de Controle em Solo (*Ground Control Points* — GCPs), qualidade dos Pontos de Checagem (*Check Points* — CKPs), capacidade dos

algoritmos de reconstrução tridimensional e condições de coleta, incluindo iluminação, relevo e cobertura vegetal (Jiménez et al., 2021). Estudos como os de Mills; Buckley; Mitchell (2003), Buckley et al. (2006; 2008); Dos Santos et al. (2015; 2016); Fonseca et al. (2017); Lin et al. (2019) e Eltner; Sofia (2020), demonstram que erros sistemáticos podem comprometer significativamente o MDT, exigindo padronização de fluxos de trabalho, inclusive na coleta dos dados em campo, familiaridade com algoritmos e aplicação de metodologias adequadas de filtragem, interpolação e análise estatística.

A popularização dos sensores digitais, dos algoritmos de reconhecimento de feições e dos ambientes de processamento baseados em (*Structure from Motion* – SfM) e (*Multi-View Stereo* – MVS) exerceu papel determinante na consolidação da fotogrametria digital como uma alternativa moderna e eficiente aos métodos tradicionais. A técnica SfM, conforme Carrivick et al. (2016) e Bento et al. (2022), reconstrói, a partir de um conjunto extenso de imagens, a geometria tridimensional de uma cena, produzindo um modelo espacial denso e bem estruturado. Esse processo é complementado pelos métodos MVS, responsáveis por densificar a nuvem de pontos com alta fidelidade geométrica.

Entretanto, a democratização dessa tecnologia traz consigo desafios importantes. Como apontado por (Carrivick; Smith; Quincey, 2016), embora softwares modernos automatizem grande parte das etapas do processamento, a aplicação correta das técnicas ainda depende de conhecimento especializado. A ausência de critérios rigorosos de calibração, seleção de pontos de controle, planejamento de voo e configuração de parâmetros fotogramétricos pode comprometer severamente a qualidade final do modelo, produzindo distorções altimétricas e erros sistemáticos que reduzem a acurácia tridimensional do produto. Assim, torna-se imprescindível que profissionais que atuam na área dominem os fundamentos teóricos e compreendam as limitações operacionais desses sistemas (Lin et al., 2019; Garcia; Oliveira, 2022).

O uso de métricas estatísticas como (*Root Mean Square Error* – RMSE), (*Mean Absolute Error* – MAE), erros máximos, mínimos e residuais é essencial para verificar a concordância entre as coordenadas derivadas da fotogrametria e aquelas obtidas com GNSS-RTK, que servem como referência posicional. Conforme apontado por Wang et al. (2017), a análise de discrepâncias ponto a ponto, aliada à estatística espacial e a métodos de interpolação como Krigagem e (*Inverse Distance Weighting* – IDW), contribui significativamente para validar, compreender e aperfeiçoar modelos tridimensionais do terreno, especialmente em contextos de difícil acesso (Aguilar et al., 2005).

Nesse sentido, a avaliação da acurácia da nuvem de pontos gerada por ARPs em terrenos com grande variabilidade topográfica torna-se especialmente relevante. Regiões agrícolas localizadas em áreas montanhosas — bastante comum, em regiões do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro — apresentam desafios adicionais à reconstrução da superfície, devido à presença de pontos inacessíveis, taludes, encostas, áreas sombreadas e desníveis acentuados. Estudos como de Silva et al. (2020) e Borowski et al. (2022) demonstram que, nesses ambientes, a acurácia de modelos tridimensionais pode sofrer influências diretas de fatores ambientais e operacionais, exigindo verificações detalhadas. Essas condições reforçam a importância de produtos cartográficos de grande escala — caracterizados por elevados níveis de detalhe e alta resolução espacial — uma vez que apenas levantamentos com esse grau de precisão são capazes de representar adequadamente o “micorelevo” e as variações altimétricas típicas desses cenários complexos.

Dessa forma, este estudo tem como objetivo avaliar a acurácia tridimensional da nuvem de pontos gerada por fotogrametria com ARP, tomando como referência um conjunto de 2.350 pontos obtidos por GNSS em modo RTK, distribuídos ao longo do eixo e dos bordos (direito e esquerdo) do trecho da Rodovia MG-223 nos quilômetros 36 à 39, localizado no município de Estrela do Sul, na mesorregião do Alto Paranaíba, Minas Gerais. Essa área apresenta elevada variação altimétrica, o que a torna adequada para testar a eficiência das metodologias de aquisição e processamento fotogramétrico em ambientes com relevo irregular. Além disso, a região possui forte relação com atividades agropecuárias, o que reforça a relevância do estudo para a agricultura e para a produção de informações geoespaciais aplicáveis ao meio rural.

Tomando como referência o levantamento executado com GNSS em modo RTK e atendendo às diretrizes estabelecidas pelo padrão nacional de acurácia posicional (Decreto-Lei 89.817/1984, ET-ADGV e ET-CQDG), este estudo tem como objetivos específicos **(i)** *avaliar a acurácia planialtimétrica das observações GNSS obtidas em modo RTK*, verificando sua adequação como conjunto de referência independente para a validação externa da nuvem de pontos gerada por ARP; **(ii)** *verificar a eficiência do uso de pontos de controle e checagem (GCPs e CKPs)* no asseguramento do georreferenciamento absoluto e na calibração espacial do modelo fotogramétrico; **(iii)** *analisar o desempenho fotogramétrico do voo com ARP*, considerando a influência dos parâmetros de planejamento — altura de voo, GSD, sobreposições e trajetória — sobre a qualidade e consistência geométrica da nuvem de pontos; **(iv)** *avaliar a qualidade geométrica da nuvem de pontos gerada pelo processamento fotogramétrico*, observando a capacidade dos algoritmos SIFT, SfM-MVS e do ajustamento por feixe (*Bundle Adjustment*) em representar com fidelidade a morfologia real do terreno; **(v)**

*mensurar as discrepâncias internas e externas da nuvem de pontos em relação ao referencial GNSS, utilizando métricas estatísticas consolidadas como RMSE, MAE e erro máximo, de forma a quantificar desvios sistemáticos e aleatórios; (vi) comparar os valores GNSS às estimativas obtidas na nuvem de pontos, examinando o desempenho da correspondência espacial por vizinhança (*nearest-neighbor*) e sua confiabilidade enquanto método de validação posicional; (vii) examinar a acurácia final do modelo fotogramétrico nas componentes E, N e h, identificando padrões de erro, dispersões, tendências sistemáticas e possíveis vieses altimétricos associados ao relevo e ao processo de reconstrução tridimensional; (viii) investigar a distribuição espacial dos erros, detectando zonas de maior e menor desempenho por meio de mapas temáticos, histogramas e análises exploratórias voltadas à variabilidade dos resíduos; (ix) classificar o modelo fotogramétrico segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica Brasileiro, verificando sua conformidade com os requisitos normativos das ET-ADGV, ET-CQDG e do Decreto-Lei 89.817/1984; e, por fim, (x) interpretar a influência das condições topográficas locais, tais como encostas, taludes, rugosidade e amplitude altimétrica, sobre o comportamento da acurácia e a fidelidade geométrica do modelo tridimensional gerado.*

A adoção do termo Modelo Digital do Terreno (MDT) como referência genérica para representações altimétricas segue as recomendações de Mesa-Mingorance; Ariza-López (2020), que destacam a necessidade de uniformização conceitual em pesquisas dessa natureza. O estudo também se apoia nas contribuições de El-Sheemy; Valeo; Habib, (2005), que discutem a multiplicidade de modelos digitais utilizados na literatura e suas implicações para aplicações práticas.

A relevância desta pesquisa se estende, ainda, ao campo da inovação metodológica. Avanços recentes no registro e processamento de dados geoespaciais, como apontam Prasad et al. (2022) e Alamri et al. (2024), têm permitido a obtenção de modelos tridimensionais com maiores densidades de coordenadas, resolução espacial e redução significativa no tempo de processamento. Ao testar a eficácia desses métodos em ambiente real, o presente estudo contribui para o desenvolvimento de práticas mais eficientes e acessíveis, capazes de apoiar tanto profissionais quanto gestores públicos e privados envolvidos com levantamentos topográficos, planejamento agrícola e gestão territorial.

Por fim, a introdução se encerra apresentando a organização da dissertação, em conformidade com as diretrizes do PPGAIG:

(i) na seção de Materiais e Métodos, são apresentados os equipamentos utilizados, a área de estudo, os métodos de coleta de dados GNSS-RTK, o planejamento e execução do

aerolevantamento com ARP, os critérios de processamento da nuvem de pontos e as técnicas estatísticas adotadas;

(ii) na seção de Resultados e Discussão, são analisados os valores de acurácia tridimensional, as discrepâncias planialtimétricas, a distribuição espacial dos erros e a classificação final segundo o padrão brasileiro de acurácia posicional;

(iii) por fim, a seção de Conclusões sintetiza os principais achados, destaca as implicações para agricultura e informações geoespaciais, e propõe direções para pesquisas futuras no âmbito do PPGAIG.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A representação precisa e eficaz da superfície terrestre sempre representou um desafio para pesquisadores e profissionais das geociências. Ao longo da história, os métodos de levantamento topográfico evoluíram significativamente, passando de práticas rudimentares para tecnologias altamente precisas e automatizadas. Embora haja registros de medições topográficas realizadas há mais de três mil anos, foi com os avanços da eletrônica e da informática que surgiram dispositivos capazes de medir distâncias e ângulos com elevada acurácia, impulsionando consideravelmente as técnicas de obtenção e processamento de dados espaciais (Gripp Júnior, 2009).

Um marco importante nessa trajetória foi a introdução das estações totais, equipamentos que combinam medição eletrônica de distâncias e ângulos com microprocessadores e sistemas de armazenamento de dados. Esse avanço possibilitou a automação de diversas etapas da topografia, desde a coleta de dados até sua representação gráfica digital, consolidando o conceito de topografia digital e reduzindo significativamente os erros grosseiros nas operações (Souza, 2001).

A partir da década de 1990, a popularização dos sistemas, Americano, de posicionamento por satélite, como o (*Global Positioning System – GPS*), posteriormente incorporado ao conceito mais amplo de (*Global Navigation Satellite System – GNSS*), expandiu ainda mais as possibilidades de levantamentos geoespaciais. Tais sistemas permitem a determinação de coordenadas tridimensionais em tempo real e com alta precisão, sem a necessidade de intervisibilidade entre pontos, mesmo em condições climáticas adversas (Monico, 2008; IBGE, 2017). Além disso, sua aplicação se estende a diversas áreas, como geodésia, navegação, engenharia de infraestrutura, monitoramento ambiental e mapeamento topográfico de larga escala (Krueger et al., 2020).

Mais recentemente, o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), também chamados de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs), em conjunto com câmeras digitais e algoritmos de reconstrução tridimensional como o (*Structure from Motion* – SfM), tem se consolidado como uma alternativa eficiente e precisa para a geração de produtos cartográficos de alta resolução. A aerofotogrametria com drones viabiliza a obtenção de ortofotos, nuvens densas de pontos, Modelos Digitais de Superfície (MDS) e Modelos Digitais do Terreno (MDT), com custos relativamente baixos e grande flexibilidade operacional (Colomina; Molina, 2014; Gonzalo, 2015; Yao; Qin; Chen, 2019).

Nesse contexto, a Modelagem Digital do Terreno se consolida como uma ferramenta indispensável para a representação do relevo terrestre em diversas aplicações técnico-científicas. O conceito foi originalmente proposto por Miller e LaFlamme na década de 1950, sendo definido como uma representação estatística da superfície do solo com base em um conjunto de pontos amostrados com coordenadas tridimensionais conhecidas (El-Sheemy; Valeo; Habib, 2005).

Atualmente, os MDTs são considerados uma subcategoria especializada dos modelos digitais tridimensionais (3D), representando a superfície exposta da Terra por meio de coordenadas (X, Y, Z), com alta acurácia espacial. Diferentemente de Modelos Digitais de Superfície (MDS), os MDTs excluem elementos como vegetação, edificações e objetos acima do solo, oferecendo uma visão contínua e suavizada da morfologia terrestre (Jensen 1995; BRASIL, 2016a; Mesa-Mingorance; Ariza-López, 2020; Guth et al., 2021).

A aplicação dos Modelos Digitais do Terreno (MDTs) é essencial para uma série de análises geoespaciais avançadas, como a caracterização topográfica de áreas, a modelagem hidrológica de bacias, a avaliação de riscos geotécnicos, o planejamento de infraestrutura viária e a gestão territorial. Sua integração com Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permite análises tridimensionais, simulações realistas e cruzamentos complexos de dados espaciais, otimizando processos decisórios em engenharia e meio ambiente (Marra Júnior, 2005).

Nesse contexto, torna-se imprescindível a compreensão de conceitos metrológicos fundamentais para a avaliação da qualidade dos dados espaciais, em especial a precisão — relacionada à consistência interna das medições, isto é, à proximidade entre valores obtidos em repetições independentes sob condições semelhantes; a veracidade — associada à proximidade da média das observações em relação ao valor verdadeiro da grandeza de interesse; e a acurácia — resultante da combinação de ambos, representando a fidelidade global do levantamento em relação à realidade (Rofatto; Matsuoka; Klein, 2024).

Com isso, aspectos como a precisão dos sensores empregados, a densidade dos pontos amostrados e os algoritmos de interpolação tornam-se determinantes para a confiabilidade e a acurácia geométrica dos MDTs (Li; Zhu; Gold, 2005). A escolha adequada desses parâmetros influencia diretamente a qualidade final dos modelos e, consequentemente, os resultados obtidos em estudos técnicos e científicos.

A produção de modelos tridimensionais confiáveis demanda não apenas o uso de sensores apropriados, mas também a adoção de critérios rigorosos para a avaliação da precisão posicional. De acordo com Mandlburger et al. (2020), a acurácia de Modelos Digitais de Elevação (MDE) deve ser aferida com base em métodos estatísticos padronizados, como o uso de pontos de controle de apoio (controle GCPs e checagem CKPs) independentes, o cálculo do Erro Quadrático Médio (RMSE), da Média dos Erros Absolutos (MAE), bem como a análise da distribuição espacial dos erros, do viés sistemático e da influência da topografia. Em complemento, estudos como o de Mesa-Mingorance; Ariza-López (2020) destacam a importância de uma abordagem crítica e sistemática na avaliação da acurácia de dados altimétricos. No que se refere ao contexto normativo, diferentes países desenvolveram leis e padrões técnicos voltados à verificação da qualidade posicional de produtos cartográficos, sendo comum a comparação entre pontos homólogos em bases distintas como forma de aferição (Goodchild, 2010; Santos et al., 2015). No Brasil, esse processo está regulamentado pelo Decreto-lei nº 89.817/1984 e pode ser complementado pelas diretrizes da Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV), elaborada pela Divisão do Serviço Geográfico (DSG) do Exército Brasileiro (Lunardi; Penha; Cerqueira, 2012). Tais normativas se alinham às boas práticas internacionais ao estabelecer critérios quantitativos e metodológicos que asseguram a consistência e a confiabilidade dos dados geoespaciais (Galo; Camargo, 1994)

Segundo Li, Zhu e Gold (2005), os mapas digitais modernos são elaborados com rigorosas exigências de precisão e qualidade, permitindo a extração segura de informações espaciais essenciais, como coordenadas, distâncias, áreas e volumes. A construção de modelos tridimensionais confiáveis é, portanto, um objetivo central em diversas disciplinas da geotecnologia, da engenharia civil, geologia e áreas afins.

Diante disso, a comparação entre modelos 3D gerados por diferentes métodos de aquisição de dados — como a utilização de receptores GNSS e imagens capturadas por sensores embarcados em ARPs — é fundamental para avaliar o desempenho, a acurácia e a aplicabilidade de cada abordagem em cenários reais. No caso específico da Rodovia MG-223, entre os quilômetros 36 à 39, tal análise visa subsidiar decisões técnicas sobre qual método

oferece maior confiabilidade para a modelagem do relevo, sobretudo em contextos de projetos de infraestrutura rodoviária.

2.1. Modelagem de nuvem de pontos associadas aos pontos de apoio geodésico (controle/checagem) e utilização de técnicas de posicionamento associados a algoritmos computacionais atuais

A modelagem de nuvens de pontos constitui uma etapa essencial no contexto dos levantamentos topográficos de alta precisão, sendo amplamente empregada em aplicações que envolvem planejamento urbano, engenharia civil, geotecnologias e agricultura de precisão. Com o avanço das Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs), aliadas a câmeras de alta resolução e sensores GNSS embarcados, tornou-se possível a geração de modelos tridimensionais detalhados da superfície terrestre com custo e tempo operacional reduzidos (Kumar et al., 2021).

Para assegurar a precisão posicional dos produtos gerados — como ortomosaicos, Modelos Digitais de Superfície (MDS) e de Terreno (MDT) —, a utilização de pontos de controle obtidos com receptores GNSS de dupla frequência é prática consagrada. Esses pontos, denominados de controles (*Ground Control Points* – GCPs), são fundamentais tanto para o georreferenciamento inicial quanto para a validação independente da acurácia do modelo, por meio dos chamados pontos de verificação ou checagem (*Checkpoints* – CKPs), comentado no trabalho de Mesa-Mingorance; Ariza-López (2024). Quando inseridos no software de reconstrução fotogramétrica, os GCPs corrigem distorções espaciais e melhoram significativamente a acurácia global do modelo.

O processo de modelagem inicia-se com a aquisição de imagens sobrepostas durante o voo da ARP, com sobreposição frontal e lateral superior a 70%. O alinhamento dessas imagens se dá por meio de algoritmos de (*Structure from Motion* – SfM), que identificam pontos homologáveis entre as imagens e os utilizam para reconstruir a geometria da cena tridimensional (Westoby et al., 2012). Entre os algoritmos de correspondência mais utilizados estão o (*Scale-Invariant Feature Transform* – SIFT), (*Speeded-Up Robust Features* – SURF) e (*Oriented Fast and Rotated Brief* – ORB). Esses detectores permitem a extração de feições robustas, mesmo sob variações de escala, rotação ou iluminação.

Após a reconstrução da geometria, a geração da nuvem de pontos densa ocorre via algoritmos de correspondência estéreo em múltiplas visadas (Seitz et al., 2006). Esta etapa é comumente realizada em softwares como: *Agisoft Metashape*, *Pix4Dmapper*, *RealityCapture* ou ferramentas open-source como *MicMac*. Posteriormente, a nuvem de pontos bruta pode ser

processada com ferramentas como (*CloudCompare – CC*) e (*Point Data Abstraction Library – PDAL*), utilizando técnicas de:

- **Filtragem estatística** (ex: Statistical Outlier Removal – SOR), que remove ruídos com base na vizinhança e dispersão local;
- **Subamostragem volumétrica** (ex: Voxel Grid), que reduz a densidade da nuvem de forma uniforme;
- **Segmentação e classificação**, para identificar objetos como solo, vegetação e estruturas.

A integração e alinhamento entre múltiplas nuvens são realizados via algoritmos de registro, sendo o (*Iterative Closest Point – ICP*) o mais tradicional. O ICP busca minimizar a distância entre pares de pontos correspondentes, de forma iterativa, ajustando transformações rígidas (translação e rotação). Para casos com maiores níveis de ruído ou baixa sobreposição, métodos mais robustos como o (*Normal Distributions Transform – NDT*), o (*Coherent Point Drift – CPD*) e, mais recentemente, o *TEASER++*, têm demonstrado maior estabilidade e precisão (Yang et al., 2020; Chang et al., 2021).

Outra classe emergente de algoritmos baseia-se em aprendizado de máquina profundo (*machine learning*), como o *DeepICP*, que treina redes neurais para aprender relações entre nuvens de pontos e prever transformações com maior resiliência a dados incompletos ou corrompidos. Tais abordagens ainda estão em expansão, mas já demonstram resultados promissores em estudos de pesquisa aplicada (Lu et al., 2019; Huang et al., 2025).

Ao final do processo de modelagem, a validação da acurácia geométrica do produto é realizada por meio da comparação entre os pontos de checagem via receptor (GNSS) e os pontos correspondentes extraídos da nuvem modelada (Fonseca et al., 2017; Ijaware et al., 2025). Segundo Rofatto et al., (2025) as métricas mais empregadas incluem o erro médio absoluto (MAE), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e os desvios máximos e mínimos. Esses indicadores permitem quantificar o desempenho métrico da nuvem, revelando tendências sistemáticas ou erros localizados.

Portanto, a modelagem de nuvem de pontos por ARP, ancorada em pontos coletados com receptor GNSS de alta precisão, constitui uma abordagem consolidada e em constante aprimoramento, impulsionada por avanços em algoritmos de visão computacional, técnicas de aprendizado de máquina e plataformas de código aberto. O domínio dessas ferramentas é indispensável para profissionais e pesquisadores que atuam na fronteira da cartografia, fotogrametria e geotecnologias modernas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os critérios adotados para a definição da área de estudo, os materiais utilizados e o conjunto de procedimentos metodológicos empregados na pesquisa. A área analisada corresponde a uma única unidade territorial com aproximadamente 60 hectares, dentro da qual foram conduzidas todas as etapas de aquisição, processamento, integração e validação dos dados. A metodologia foi estruturada de forma integrada, contemplando tanto o levantamento geodésico, realizado com receptores GNSS em modo RTK, quanto o levantamento aerofotogramétrico, a partir de imagens obtidas por sensores embarcados em uma Aeronave Remotamente Pilotada (ARP). Essa integração metodológica permitiu a obtenção de um banco de dados robusto, capaz de sustentar a análise da acurácia geométrica do modelo fotogramétrico.

O processo metodológico seguiu a lógica apresentada no fluxograma, Figura 1, desta seção. Inicialmente, realizou-se a etapa de planejamento geral da pesquisa, que antecedeu a fase de aquisição dos dados. No levantamento geodésico, o fluxo teve início com a definição do marco de referência (RBMC/MGMT) na cidade de Monte Carmelo e na instalação da base GNSS no local a ser rastreado. Em seguida, procedeu-se à implantação dos Pontos de Apoio (GCPs e CKPs), ao rastreio de cada ponto e ao subsequente processamento das observações, que resultaram no conjunto de coordenadas de referência utilizado para a etapa de validação.

De maneira complementar, o levantamento fotogramétrico também iniciou pelo planejamento da missão aérea, definindo rotas, altitudes e recobrimentos adequados. Posteriormente, executou-se o voo e capturaram-se as imagens aéreas. As fotografias foram processadas pelo método de reconstrução tridimensional SfM–MVS, no software Metashape, resultando na geração e ajuste da nuvem de pontos. Tal processamento permitiu a criação de um modelo denso e coerente da superfície, fundamental para sua comparação com os dados GNSS.

A integração dos levantamentos ocorreu na etapa de registro entre os pontos GNSS e a nuvem de pontos fotogramétrica, assegurando alinhamento espacial e permitindo a comparação direta entre os dois conjuntos de dados. Em seguida, foram calculadas as métricas estatísticas de avaliação da acurácia — incluindo RMSE, MAE e valores máximos e mínimos —, possibilitando a análise quantitativa das discrepâncias observadas. Por fim, realizou-se a validação externa, garantindo a confiabilidade do produto final e corroborando a qualidade geométrica do modelo gerado.

A organização sequencial aqui descrita, sintetizada no fluxograma, que demonstra a coerência entre as etapas de planejamento, aquisição, processamento e análise, reforçando o rigor metodológico adotado neste estudo.

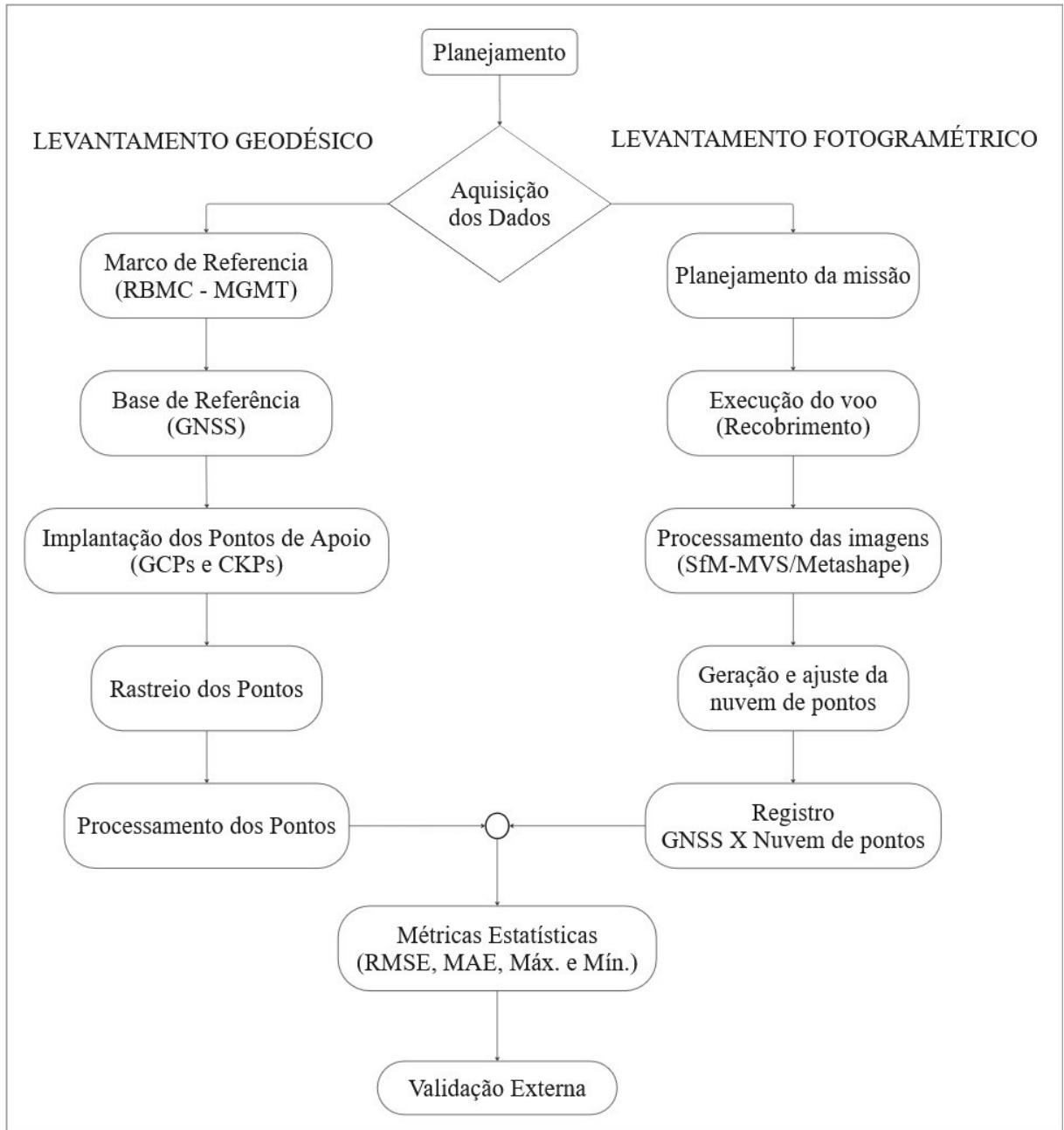


FIGURA 1 – Fluxograma geral da metodologia que sintetiza essas etapas.
Fonte: O autor (2025).

3.1. Localização da área

A pesquisa foi realizada no trecho da Rodovia MG-223, compreendido entre os quilômetros 36 à 39, que fornece acesso ao município de Estrela do Sul, localizado no Estado de Minas Gerais, na mesorregião do Alto Paranaíba, como mostra a Figura 2.

A MG-223 é uma rodovia estadual de aproximadamente 160 km que conecta importantes municípios do Alto Paranaíba e do Triângulo Mineiro, funcionando como variante da importante BR-365. Seu traçado facilita o acesso a rodovias federais estratégicas, como a BR-050, e desempenha um papel crucial na integração regional e no escoamento de mercadorias.

A escolha desse trecho baseou-se nas características geomorfológicas da região, marcada por relevo acidentado e expressiva variação altimétrica, com diferenças de nível variando entre 873,12 m e 740,76 m. De acordo com Silva et al., (2020) e Borowski at al., (2022), essas condições tornam o local propício para avaliar a qualidade de modelos tridimensionais gerados a partir de técnicas de levantamento por fotogrametria com uso de Aeronave Remotamente Pilotada (ARPs).

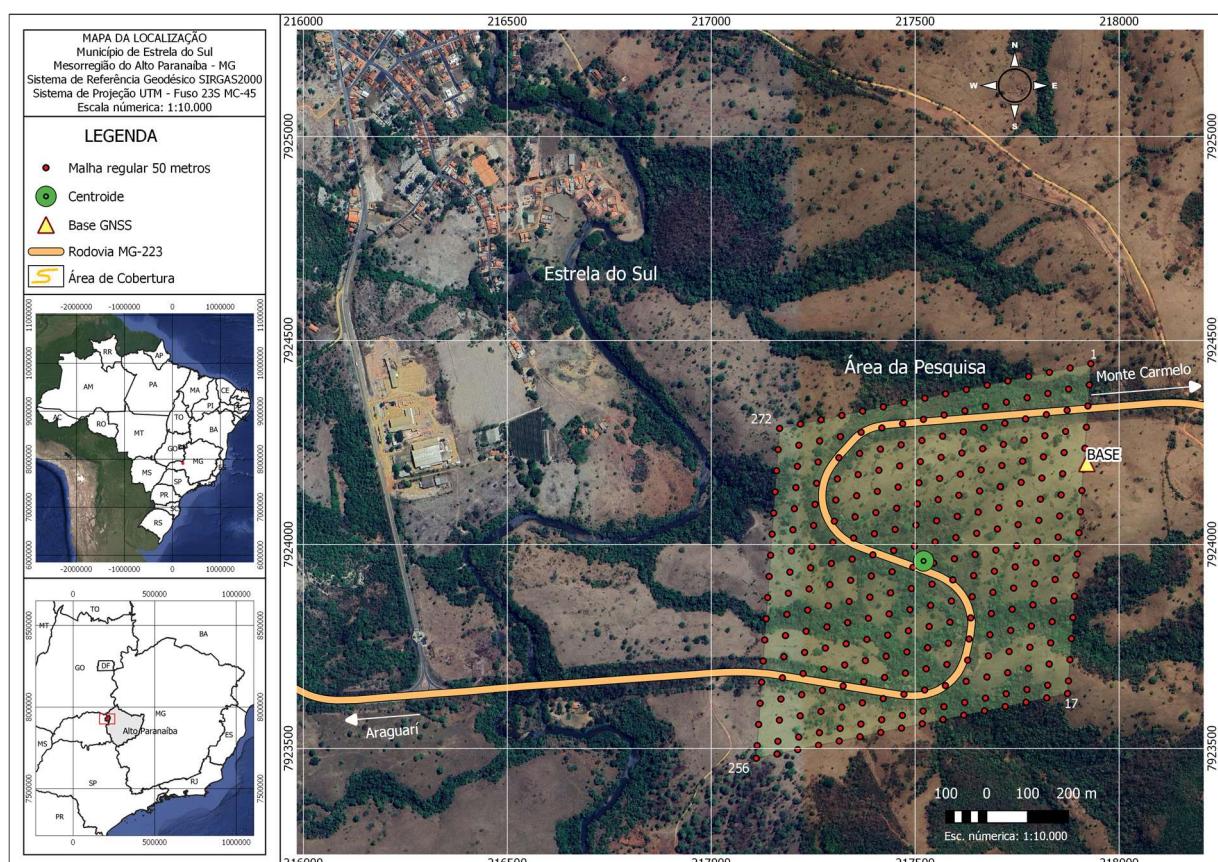


FIGURA 2 – Mapa de localização da área em estudo.
Fonte: O autor (2025).

O centroide da área está georreferenciado na coordenada: 7.923.959,500 Norte; 217.520,000 Leste, abrangendo um polígono aproximado de 60 hectares, (750 x 780 metros).

A tabela 1 mostra a identificação, descrição e coordenadas dos pontos extremos nas bordas da área útil em estudo.

TABELA 1 – Identificação posicional nas extremidades da área.

Identificação do Ponto:	Descrição	Coordenadas UTM – FUSO 23S	
		NORTE	LESTE
1	Ponto topográfico	7.924.287,706	217.919.732
17	Ponto topográfico	7.924.225,297	217.865,187
256	Ponto topográfico	7.924.047,594	217.501,728
272	Ponto topográfico	7.923.943,930	217.494,388

Fonte: O autor (2025).

3.2. Implantação dos pontos de apoio (controles GCPs e checagem CKPs)

Ao todo, foram implantados e distribuídos 44 pontos de apoio no terreno, conforme mostrado na Figura 3. Esses pontos são compostos por 26 Pontos de Controle (GCPs) e 18 Pontos de Checagem (CKPs), essenciais para o georreferenciamento absoluto da nuvem de pontos. Seguiram critérios técnicos rigorosos, fundamentais para assegurar a fidelidade geométrica do modelo tridimensional gerado. Para referência posicional, foi utilizada a estação MGMT, integrante da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), localizada na Universidade Federal de Uberlândia – Unidade Araras, no *campus* de Monte Carmelo – MG. O comprimento da linha base entre esta estação e o ponto implantado na área de estudo foi de aproximadamente 16,3 km em linha reta, uma distância considerada tolerável para levantamentos relativos estáticos, desde que não haja obstruções e que as condições ionosféricas sejam favoráveis (Monico, 2008; IBGE, 2017; INCRA, 2018).

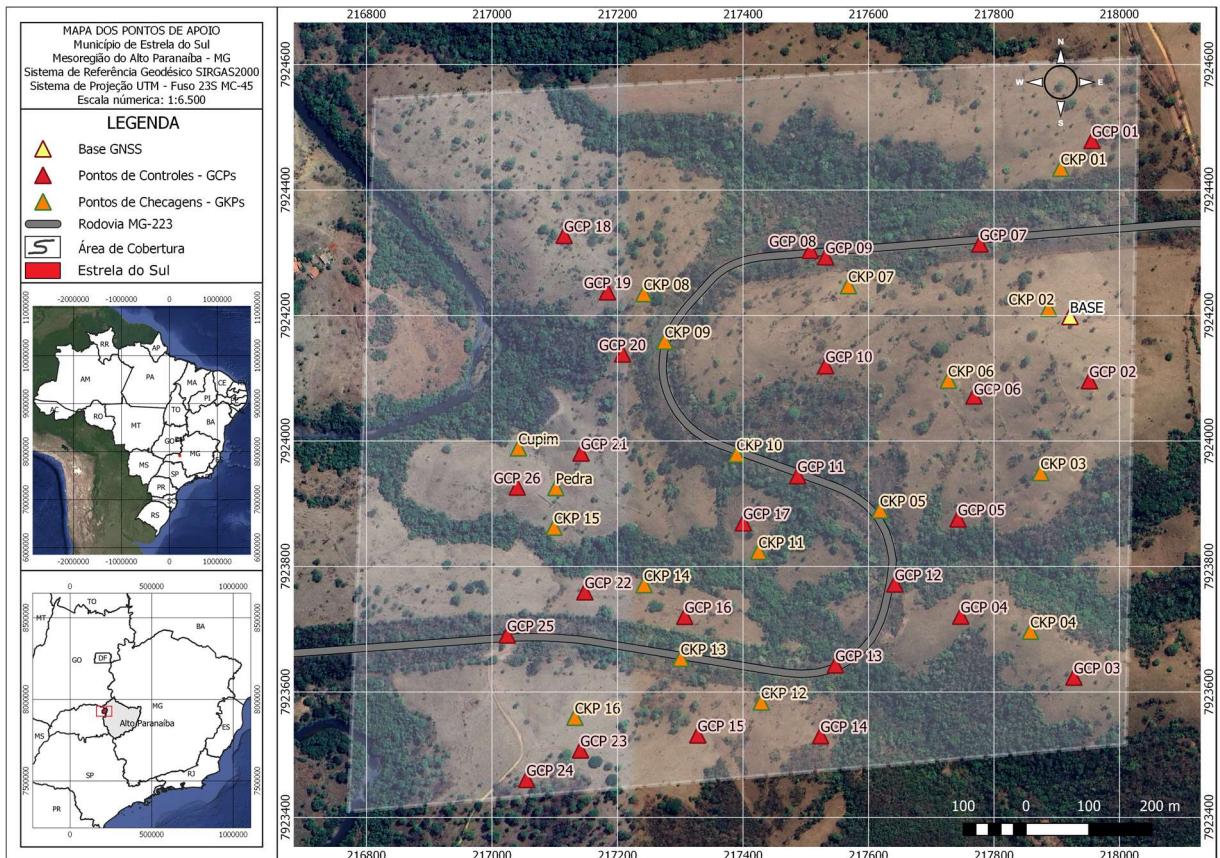


FIGURA 3 – Distribuição espacial dos Pontos de Controle e Pontos de Checagem.
Fonte: Autor (2025).

A base GNSS foi instalada no ponto mais elevado da área, situada em uma propriedade particular, próximo da rodovia, sobre um vértice com coordenadas geográficas de Latitude: $18^{\circ}45'16,81733''$ S, Longitude: $47^{\circ}40'31,48965''$ W e Altitude elipsoidal: 873,120 metros, realizado em 3 campanhas, totalizando 13 horas e 40 minutos, em tempo de rastreio. A escolha estratégica dessa localização, livre de obstruções físicas, proporcionou excelente visibilidade para os satélites e receptor *rover*, condição fundamental para o desempenho do sistema de posicionamento e, consequentemente, para o georreferenciamento preciso dos pontos de controle e de checagem foto identificáveis dentro da área de estudo. A confiabilidade da base foi confirmada pelos baixos desvios padrão observados nos componentes horizontais (0,002 m) e vertical (0,005 m), obtidos após o processamento relativo à estação RBMC MGMT. Essa qualidade posicional garantiu acurácia na ordem centimétrica na coleta dos pontos de apoio em campo, cujos erros variaram entre 0,0025 m e 0,0113 m no eixo X, 0,0031 m e 0,0139 m no eixo Y, e 0,0019 m a 0,0084 m no eixo Z, reforçando a qualidade geométrica dos dados adquiridos e a confiabilidade na coletas dos pontos foto identificáveis na área de estudo.

A linha base entre a estação MGMT, integrante da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), situada na Universidade Federal de Uberlândia – Unidade Araras, no

campus de Monte Carmelo – MG e, o ponto base definido como ponto de referência para as demais coletas dos pontos de checagem e controle na área de estudo foi de 16,3 km, dando condições ideais para a rastreamento.

Depois de planejar os pontos de apoio, aplicou-se a função K de Ripley para inferir o padrão de distribuição espacial desses conjuntos de pontos para garantir a máxima precisão no ajustamento da nuvem de pontos advinda do processamento fotogramétrico com a ARP. Para evitar distorções no modelo final, os pontos de controle foram distribuídos de forma estratégica ao longo das extremidades da imagem, abrangendo as áreas periféricas e centrais da cena fotogramétrica. Esta disposição tem o propósito de minimizar possíveis deformações geométricas que possam ocorrer devido a distorções radiais ou outras limitações típicas de sistemas fotogramétricos, como a curvatura da lente ou variações na altitude durante o voo. Além disso, a distribuição extensa e equilibrada dos pontos de apoio nas bordas da imagem, associada ao uso da captura do sinais de satélites para calcular as coordenadas precisa, assegura que a nuvem de pontos final tenha exatidão posicional em toda a área de estudo, sem perdas significativas de acuracidade em regiões mais afastadas do ponto central, o que é essencial para garantir uniformidade na extração da feição da rodovia, segundo estudos de Luther; Geist; Fluegge (2024) que será detalhada mais adiante. Esses GCPs foram inseridos no projeto fotogramétrico para um segundo ajustamento por feixe, com otimização conjunta das imagens capturadas pela câmera e dos parâmetros de calibração, para melhorar a orientação absoluta das imagens corrigindo erros sistemáticos, reduzindo distorções, resultando em um modelo tridimensional com fidelidade posicional garantindo que o produto final represente fielmente a realidade do terreno. Os CKPs não foram utilizados para o ajustamento no processamento, e sim para validar a acurácia do modelo. Os erros no ajustamento da nuvem de pontos foram avaliados por meio dos valores da raiz do erro quadrático médio (em inglês, *Root Mean Squared Error* – RMSE) obtidos para os pontos de controle e de checagem. Para verificar se a acurácia posicional dos produtos gerados atendia aos requisitos de levantamentos de alta precisão, os valores de (RMSE) obtidos para os pontos de controle (GCPs) e de checagem (CKPs) foram comparados com as tolerâncias estabelecidas pelo Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC/EP) da Classe A, conforme o Decreto-Lei nº 89.817/1984, bem como com os padrões internacionais definidos pela *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS, 2014).

Embora os resultados quantitativos estejam detalhados em seção posterior, ressalta-se que o ajustamento geométrico seguiu critérios de controle de qualidade posicional, conforme metodologia proposta por Dos Santos et al. (2016); Zanetti et al. (2017) e Oniga; Breaban e Statescu (2018), incorporando a análise da distribuição espacial dos pontos de checagem (por

meio do Vizinho Mais Próximo e da Função K de Ripley) e a detecção de tendências (Média Direcional e Variância Circular). Essa abordagem garante que, além de atender às tolerâncias métricas, o produto esteja livre de efeitos sistemáticos, assegurando sua aplicabilidade em projetos que demandam confiabilidade métrica, como mostra a Tabela 2.

TABELA 2 – Quadro comparativo entre padrões nacionais e internacionais de acurácia posicional.

Norma / Padrão	Classe / Nível	Tolerância Horizontal (RMSE_XY)	Tolerância Vertical (RMSE_Z)	Aplicação Típica
Brasil – PEC/EP (Classe A)	Escala 1:1.000	0,28 m	0,14 m (eq. curva de nível 0,25 m)	Levantamentos cadastrais e obras de engenharia
Brasil – PEC/EP (Classe A)	Escala 1:5.000	1,40 m	0,70 m (eq. curva de nível 1,25 m)	Mapeamento urbano e rural de alta precisão
Brasil – PEC/EP (Classe A)	Escala 1:25.000	7,00 m	3,50 m (eq. curva de nível 5,00 m)	Mapeamento sistemático e regional
ASPRS 2014 – Nível 1 (Highest Accuracy)	Escala 1:1.000	$\leq 5 \text{ cm (0,05 m)}$	$\leq 10 \text{ cm (0,10 m)}$	Engenharia de alta precisão, BIM, monitoramento de estruturas
ASPRS 2014 – Nível 2 (Standard Mapping)	Escala 1:5.000	$\leq 1,0 \times \text{GSD}^*$	$\leq 2,0 \times \text{GSD}^*$	Cartografia padrão e integração em SIG
ASPRS 2014 – Nível 3 (Visualization)	Escala 1:25.000	$\leq 1,5 \times \text{GSD}^*$	$\leq 3,0 \times \text{GSD}^*$	Visualização, análise temática e planejamento geral

* GSD (*Ground Sample Distance*) refere-se ao tamanho do pixel no terreno.

Fonte: Adaptado de: “ASPRS – Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data (2014); FGDC / NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy, EUA); Guide for the Positional Accuracy Assessment of Geospatial Data; Spatial Queensland / Queensland Government – Guia Prático; ET-ADGV, 2015-2016 / PEC-PCD – Tolerâncias segundo escala, Classes A, B, C, etc.; Decreto-Lei 89.817/84 – Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) para Escalas Médias e Grandes; Estudo com ortofotos / GeoPEC – Escala 1:1.000, Classe A.”

De acordo com a classificação nacional PEC/EP (Classe A), para a escala 1:1.000, são admitidos valores máximos de RMSE horizontais em E(X) e N(Y) de 28 cm e verticais h(Z) de 14 cm, equidistantes entre curvas de nível de 25cm. Já na ASPRS 2014, o Nível 1 — destinado a aplicações de máxima acurácia — estabelece limites menores ou iguais a 5 cm nas horizontais e 10 cm para as verticais nos RMSE.

Os resultados, aproximados, obtidos nesta pesquisa (GCPs: 2,8 cm em E(X), 2,2 cm em N(Y) e 7,4 cm em h(Z); CKPs: 4,3 cm em E(X), 4,6 cm em N(Y) e 5,4 cm em h(Z) situaram-se amplamente abaixo das tolerâncias definidas em ambas as normativas, garantindo

enquadramento na Classe A para classificação Brasileira e no Nível 1 de máxima precisão da ASPRS 2014.

A Figura 4 ilustra essa comparação, evidenciando a margem de segurança obtida. Essa verificação consolida a confiabilidade métrica dos dados para aplicações que demandam elevada precisão, reforçando a robustez do processo de ajustamento adotado.

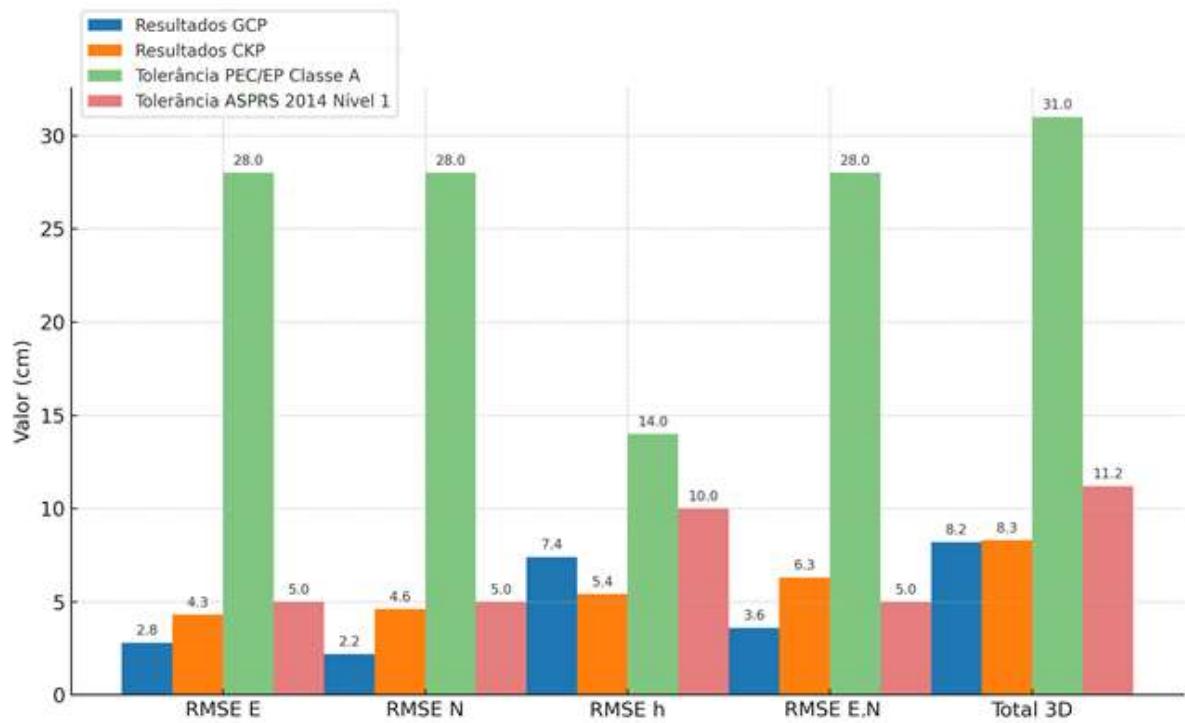


FIGURA 4 – Comparativo: Resultados vs Tolerância: Normativas (PEC/EP Classe A e ASPRS 2014 Nível 1).

Fonte: Autor (2025).

O gráfico ilustra o comparativo entre os valores de RMSE obtidos para pontos de controle (GCP) e checagem (CKP) e as tolerâncias definidas pelo PEC/EP Classe A (escala 1:1.000) e ASPRS 2014 Nível 1. Observa-se que todos os valores medidos situam-se abaixo dos limites estabelecidos pelas normativas, confirmando o enquadramento do levantamento como de alta precisão.

A análise da Tabela 3, abaixo, fundamentou-se na avaliação das discrepâncias posicionais entre as coordenadas obtidas por receptor GNSS em modo RTK (consideradas referência) e aquelas estimadas a partir da nuvem de pontos fotogramétrica gerada pela ARP. Para cada ponto de controle (GCP) e de checagem (CKP), foram calculadas as diferenças nas três componentes cartesianas — Leste (E), Norte (N) e Altura (h) —, além da discrepancia espacial total em 3D, obtida pela norma euclidiana das diferenças. Esse procedimento metodológico permitiu quantificar, de forma objetiva, a precisão geométrica do modelo em

escala local e global, identificando tanto os desvios sistemáticos quanto os aleatórios. A distinção entre GCPs e CKPs foi essencial, uma vez que os primeiros foram empregados no ajustamento do modelo fotogramétrico, enquanto os segundos serviram exclusivamente para a validação independente da acurácia. Assim, a estrutura da tabela permitiu mensurar a distribuição e a magnitude dos resíduos, fornecendo subsídios consistentes para a avaliação estatística posterior (RMSE, MAE e valores extremos), além de indicar eventuais padrões de erro relacionados a feições topográficas específicas ou às condições de aquisição das imagens.

TABELA 3 – Análise das discrepância posicional das componentes.

PONTOS DE APOIO											
PONTOS	Coordenadas GNSS-RTK			Coordenadas nas imagens			Estimativas dos Erros				
	E(X) m	N(Y) m	h(Z) m	E(X) m	N(Y) m	h(Z) m	E(X) m	N(Y) m	h(Z) m	Total (3D)	
BASE	217921,018	7924198,712	873,120								
GCP 01	217956,168	7924479,261	869,883	217956,170	7924479,263	869,887	-0,0025	-0,0016	-0,0041	0,0050	
GCP 02	217952,088	7924096,431	885,480	217952,105	7924096,459	885,489	-0,0171	-0,0277	-0,0093	0,0339	
GCP 03	217927,272	7923623,974	852,149	217927,243	7923623,987	852,132	0,0286	-0,0126	0,0165	0,0353	
GCP 04	217746,946	7923721,126	823,960	217746,882	7923721,151	823,891	0,0636	-0,0246	0,0687	0,0968	
GCP 05	217742,595	7923875,985	806,391	217742,603	7923875,997	806,477	-0,0072	-0,0123	-0,0864	0,0876	
GCP 06	217768,133	7924072,045	845,180	217768,146	7924072,065	845,208	-0,0136	-0,0200	-0,0276	0,0367	
GCP 07	217777,496	7924314,257	844,429	217777,496	7924314,265	844,450	-0,0006	-0,0082	-0,0212	0,0227	
GCP 08	217507,261	7924304,202	826,591	217507,258	7924304,216	826,576	0,0030	-0,0144	0,0153	0,0213	
GCP 09	217531,575	7924293,813	829,618	217531,575	7924293,817	829,696	-0,0006	-0,0042	-0,0786	0,0788	
GCP 10	217531,643	7924120,170	841,246	217531,637	7924120,169	841,301	0,0060	0,0006	-0,0548	0,0552	
GCP 11	217487,027	7923944,958	795,849	217487,014	7923944,946	795,934	0,0125	0,0123	-0,0859	0,0877	
GCP 12	217641,946	7923772,306	782,524	217641,910	7923772,309	782,513	0,0363	-0,0028	0,0102	0,0378	
GCP 13	217547,296	7923643,438	774,821	217547,282	7923643,440	774,810	0,0147	-0,0017	0,0114	0,0187	
GCP 14	217523,624	7923530,622	786,893	217523,595	7923530,571	786,956	0,0287	0,0512	-0,0631	0,0862	
GCP 15	217327,892	7923531,696	795,475	217327,866	7923531,653	795,520	0,0257	0,0428	-0,0453	0,0674	
GCP 16	217307,143	7923720,764	765,036	217307,141	7923720,740	765,107	0,0021	0,0244	-0,0703	0,0744	
GCP 17	217400,599	7923869,812	771,092	217400,612	7923869,790	771,152	-0,0133	0,0223	-0,0601	0,0655	
GCP 18	217115,078	7924328,002	784,863	217115,090	7924327,985	784,844	-0,0121	0,0170	0,0188	0,0281	
GCP 19	217184,002	7924238,012	792,404	217183,999	7924238,032	792,401	0,0034	-0,0199	0,0032	0,0205	
GCP 20	217207,997	7924138,960	794,631	217208,008	7924138,972	794,653	-0,0109	-0,0118	-0,0219	0,0271	
GCP 21	217141,917	7923980,997	771,787	217141,923	7923981,000	771,819	-0,0062	-0,0026	-0,0328	0,0335	
GCP 22	217147,901	7923759,900	761,773	217147,904	7923759,896	761,787	-0,0033	0,0039	-0,0142	0,0151	
GCP 23	217140,975	7923507,721	794,056	217140,991	7923507,724	794,109	-0,0167	-0,0032	-0,0532	0,0558	
GCP 24	217055,164	7923460,865	786,133	217055,138	7923460,853	786,156	0,0266	0,0118	-0,0227	0,0369	
GCP 25	217024,259	7923691,024	770,805	217024,282	7923690,988	770,839	-0,0239	0,0361	-0,0340	0,0551	
GCP 26	217040,146	7923926,781	772,684	217040,156	7923926,777	772,669	-0,0103	0,0035	0,0146	0,0182	
Pontos de Checagens											
CKP 01	217906,456	7924434,923	862,264	217906,464	7924434,921	862,266	-0,0081	0,0018	-0,0017	0,0085	
CKP 02	217887,087	7924211,653	867,962	217887,084	7924211,670	868,046	0,0039	-0,0173	-0,0842	0,0860	
CKP 03	217874,252	7923949,794	845,865	217874,290	7923949,857	845,878	-0,0375	-0,0635	-0,0133	0,0749	
CKP 04	217858,003	7923697,006	843,683	217858,001	7923697,016	843,722	0,0022	-0,0102	-0,0391	0,0405	
CKP 05	217618,398	7923890,064	790,113	217618,328	7923890,125	790,079	0,0703	-0,0615	0,0340	0,0994	
CKP 06	217727,085	7924097,167	845,667	217727,049	7924097,166	845,723	0,0360	0,0013	-0,0565	0,0670	
CKP 07	217567,924	7924247,824	847,125	217567,957	7924247,862	847,156	-0,0331	-0,0385	-0,0308	0,0594	
CKP 08	217275,265	7924159,360	810,432	217275,280	7924159,388	810,484	-0,0156	-0,0282	-0,0517	0,0609	
CKP 09	217241,911	7924235,055	802,460	217241,901	7924235,113	802,479	0,0104	-0,0578	-0,0188	0,0617	
CKP 10	217389,892	7923979,457	799,226	217389,885	7923979,461	799,213	0,0069	-0,0045	0,0126	0,0150	
CKP 11	217425,042	7923824,127	761,936	217425,049	7923824,085	761,980	-0,0070	0,0422	-0,0439	0,0612	
CKP 12	217429,001	7923584,230	778,864	217428,946	7923584,185	778,913	0,0547	0,0447	-0,0487	0,0858	

CKP 13	217300,855	7923653,781	773,523	217300,839	7923653,747	773,511	0,0161	0,0337	0,0115	0,0391
CKP 14	217242,375	7923771,237	755,946	217242,410	7923771,225	755,976	-0,0354	0,0120	-0,0308	0,0484
CKP 15	217098,894	7923862,868	750,311	217098,940	7923862,828	750,322	-0,0463	0,0399	-0,0115	0,0621
CKP 16	217132,158	7923559,919	789,207	217132,108	7923559,892	789,217	0,0490	0,0270	-0,0102	0,0569
Pedra	217101,803	7923926,078	757,675	217101,809	7923926,078	757,662	-0,0059	0,0003	0,0133	0,0146
Cupim	217042,214	7923989,254	744,569	217042,227	7923989,314	744,578	-0,0124	-0,0602	-0,0091	0,0622

Fonte: Autor (2024).

A avaliação dos pontos de controles (GCPs) revelou discrepâncias de baixa magnitude nas componentes planimétricas (E e N), predominantemente inferiores a 3 cm, o que indica elevada consistência horizontal do ajustamento do modelo. Os resíduos mais expressivos nos pontos de controles foram observados na componente vertical (h), alcançando até 8,6 cm em pontos específicos, notadamente em áreas de maior complexidade geomorfológica ou situados próximos a taludes e extremidades da plataforma viária. Apesar disso, a maior parte dos GCPs apresentou erros altimétricos inferiores a 5 cm, confirmando a estabilidade do modelo nas regiões centrais e homogêneas do levantamento.

No conjunto de pontos de checagem (CKPs), utilizados exclusivamente para validação independente, verificou-se comportamento semelhante, com erros horizontais geralmente inferiores a 4 cm. A componente vertical, entretanto, mostrou maior variabilidade, com discrepâncias que atingiram valores próximos de 10 cm, a exemplo do CKP 05. Esses resultados reforçam a sensibilidade do modelo à variação topográfica e às condições locais de sobreposição das imagens, fatores determinantes na acurácia altimétrica. Ainda assim, em termos globais, os resíduos mantiveram-se dentro de limites aceitáveis para levantamentos de alta precisão com ARP, confirmando a viabilidade técnica da metodologia aplicada.

De modo geral, a análise da Tabela 3 evidencia que as discrepâncias posicionais não apresentam padrão sistemático marcante, estando os erros distribuídos em torno de zero, especialmente nas componentes planimétricas. Esse comportamento indica ausência de viés geométrico relevante no ajustamento, sendo a dispersão observada compatível com os limites de acurácia relatados em estudos similares na literatura. Portanto, os resultados demonstram que o modelo fotogramétrico, ajustado a partir dos GCPs e validado com CKPs independentes, apresenta desempenho geométrico adequado para aplicações em topografia de alta precisão, com ressalvas pontuais para regiões verticalmente mais complexas.

Com o intuito de sintetizar os resultados obtidos na avaliação da acurácia posicional da Tabela 3 acima, foram calculados os valores de raiz do erro quadrático médio (RMSE) tanto para os pontos de controle quanto para os pontos de checagem independentes. Essa abordagem permite quantificar, de forma objetiva, a precisão planimétrica e altimétrica do modelo, bem

como avaliar sua consistência espacial quando submetido a dados não utilizados no ajustamento.

A seguir, a Tabela 4 apresenta os resultados consolidados do RMSE, evidenciando a qualidade geométrica do modelo fotogramétrico gerado.

TABELA 4 – RMSE do ajustamento da nuvem de pontos.

Pontos de controle					
Núm. Pontos	RMSE E (cm)	RMSE N (cm)	RMSE h (cm)	RMSE E, N (cm)	Total (cm)
26	2,76	2,23	7,42	3,55	8,23
Pontos de checagem					
18	4,39	4,57	5,45	6,31	8,29

Fonte: Autor (2025).

Assim, a Tabela 4 apresenta a precisão do ajuste da nuvem de pontos gerada por aerofotogrametria, com base na raiz dos erros quadráticos médios (RMSE) dos pontos de apoio, tanto de controle quanto de checagem, após o processamento. Os valores observados para os 44 pontos de apoio indicam uma excelente acurácia planimétrica, com erros de 2,76 cm na componente E e 2,23 na componente N, resultando em um erro combinado na resultante E e N de 3,55 cm. O erro altimétrico, por sua vez, foi mais significativo, com 7,42 cm em h, o que gerou um erro total na resultante de 8,23 cm, ainda dentro dos limites aceitáveis para aplicações topográficas de alta precisão conforme os resultados encontrados nos estudos de Dos Santos et al. (2016); Oniga; Breaban e Statescu (2018); Nadi et al. (2020). Esses resultados demonstram que o método empregado apresentou desempenho consistente, especialmente no que tange às componentes horizontais. Para os 16 pontos de checagem, os erros aumentaram ligeiramente, sendo 4,39 cm em E, 4,57 cm em N e uma resultante entre eles de 6,31 cm. Em (h) altitude, ouve um erro de 5,45 cm , resultando em um erro total da resultante de 8,29 cm. Embora esses valores sejam superiores aos do ponto de controle, eles permanecem em uma margem que reflete confiabilidade dos dados gerados, evidenciando a robustez do processo de ajustamento e a adequação da metodologia proposta para levantamentos de precisão. Esses resultados confirmam a viabilidade do uso da aerofotogrametria com drones em contextos de levantamentos topográficos, especialmente quando se busca um equilíbrio entre custo, tempo e precisão.

3.3. Levantamento do eixo da rodovia com o uso de receptor GNSS em modo RTK no trecho de interesse

O levantamento da via pavimentada, no trecho compreendido entre os quilômetros 36 à 39, como ilustra na Figura 5, foi conduzido por meio de técnicas de posicionamento GNSS em modo (*Real Time Kinematic – RTK*), com configuração específica para garantir alta densidade amostral (pontos a cada 1 metro no eixo e a cada 5 metros nas bordas) e precisão posicional. Para a aquisição dos dados, os pontos foram coletados a cada metro ao longo do eixo da via e a cada cinco metros nos bordos, abrangendo o intervalo entre o acostamento e a pista de rolamento. Essa metodologia permitiu capturar com elevado detalhamento a geometria da plataforma viária, considerando tanto sua conformação longitudinal quanto transversal.



FIGURA 5 – Aquisição de pontos GNSS na rodovia.
Fonte: Autor (2025).

A escolha desse trecho deveu-se à sua variabilidade topográfica, com presença de desníveis, segmentos planos e áreas de transição, o que o torna ideal para testar a consistência dos modelos tridimensionais gerados. Ao todo, foram coletados 2.350 pontos com o uso de receptor GNSS-RTK, os quais, além de documentarem a geometria real da rodovia, serviram como base independente para a validação da nuvem de pontos, gerada por procedimentos fotogramétricos. O rigor na coleta dos dados e a estratégia de amostragem espacial adotada conferem ao levantamento precisão centimétrica, consolidando sua aplicabilidade em projetos de infraestrutura e análises topográficas de alta exigência técnica.

3.4. Plano de voo

O planejamento da missão foi realizado por meio de software de controle automatizado de voo *Dronedeploy*, como mostra a Figura 6, adotando sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 70%, com altura média de voo de 220 metros acima do terreno e *Ground Sample Distance* (GSD) médio planejado de 5,6 cm/pixel. Tal configuração foi projetada com o intuito

de assegurar redundância geométrica suficiente para o correto pareamento das imagens e formação robusta da nuvem de pontos. Ao todo, foram adquiridas 850 imagens aéreas, cobrindo integralmente a área de interesse, (139 hectares), com resolução de 4864 x 3648 pixels, distância focal de 8,8 mm.

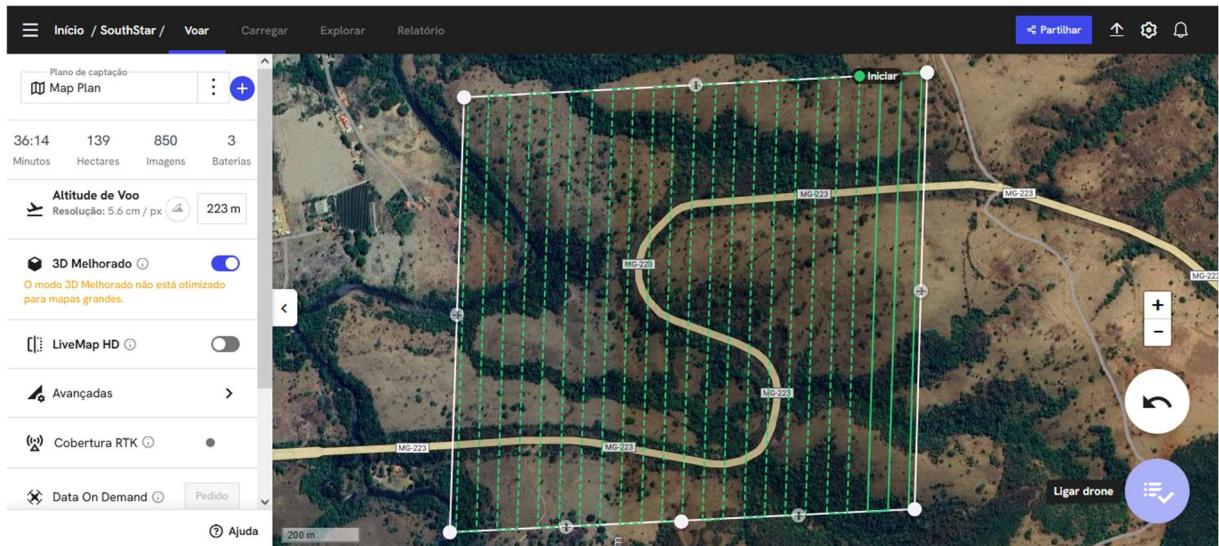


FIGURA 6 – Planejamento do voo através do software Dronedeploy.
Fonte: Autor (2025).

- 1 – detecta pontos chaves em todas as imagens (*keypoints*);
- 2 – correspondencias dos pontos chaves (*keypoints*);
- 3 – estimar os parâmetros de orientação exterior e interior da câmera;
- 4 – adensar a nuvem de pontos;
- 5 – (bundle adjustment).

O processamento dos dados foi realizado no software *Agisoft Metashape Professional*, seguindo rigorosamente as etapas moderna da fotogrametria digital. Inicialmente, aplicou-se o algoritmo (*Scale-Invariant Feature Transform* – SIFT) para a detecção automática de pontos homólogos entre os pares de imagens, etapa conhecida como Pontos de correspondência (do inglês, *matching points*). Este processo permite identificar feições invariantes em múltiplas imagens, mesmo diante de mudanças de escala, rotação e variações de iluminação. A robustez do algoritmo SIFT garante a confiabilidade do emparelhamento, possibilitando a criação de uma malha de conexões entre as imagens, fundamental para a etapa de reconstrução geométrica.

Na sequência, alinhou-se as imagens, ou seja, aplicou o alinhamento (*alignment*) fotogramétrico por meio do ajustamento por feixe (*bundle adjustment*), que simultaneamente estima os parâmetros extrínsecos (posição e orientação das câmeras) e intrínsecos (parâmetros de calibração) de cada fotografia. Esse ajustamento gera uma nuvem de pontos esparsa, com

georreferenciamento relativo preliminar, representando o esqueleto da estrutura tridimensional da cena.

Após a calibração e alinhamento das câmeras, executou-se a geração da *dense cloud* ou nuvem de pontos densificada, mediante o algoritmo de correlação estéreo multivisão. Essa etapa considera o paralaxe entre múltiplas imagens para calcular com alta precisão a posição tridimensional de cada ponto da superfície visível. No presente trabalho, foram adotadas as configurações de qualidade “Alta” e filtro de profundidade “Médio”, equilibrando desempenho computacional e acurácia geométrica. O resultado foi uma nuvem densa, detalhada, contínua e com alta resolução espacial, representando fielmente a morfologia do terreno e das feições construídas.

3.5. Geração da nuvem de pontos

A Figura 7 sintetiza, de forma ilustrativa, o fluxo completo adotado para a geração e validação da nuvem de pontos densa utilizada nesta pesquisa, integrando as etapas de aquisição de dados com a Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), processamento fotogramétrico e verificação da acurácia posicional. No primeiro módulo, a figura evidencia o processo de coleta sistemática de imagens sobrepostas obtidas pelo drone DJI Phantom 4 Pro, equipado com receptor GPS/GLONASS e câmera FC6310S (20 MP, 24 mm). O modo P, por utilizar o sistema de navegação e os sensores de visão embarcados, assegurou voo estável, manutenção precisa da altitude e velocidade controlada, garantindo a uniformidade das trajetórias e a qualidade geométrica do conjunto de imagens.

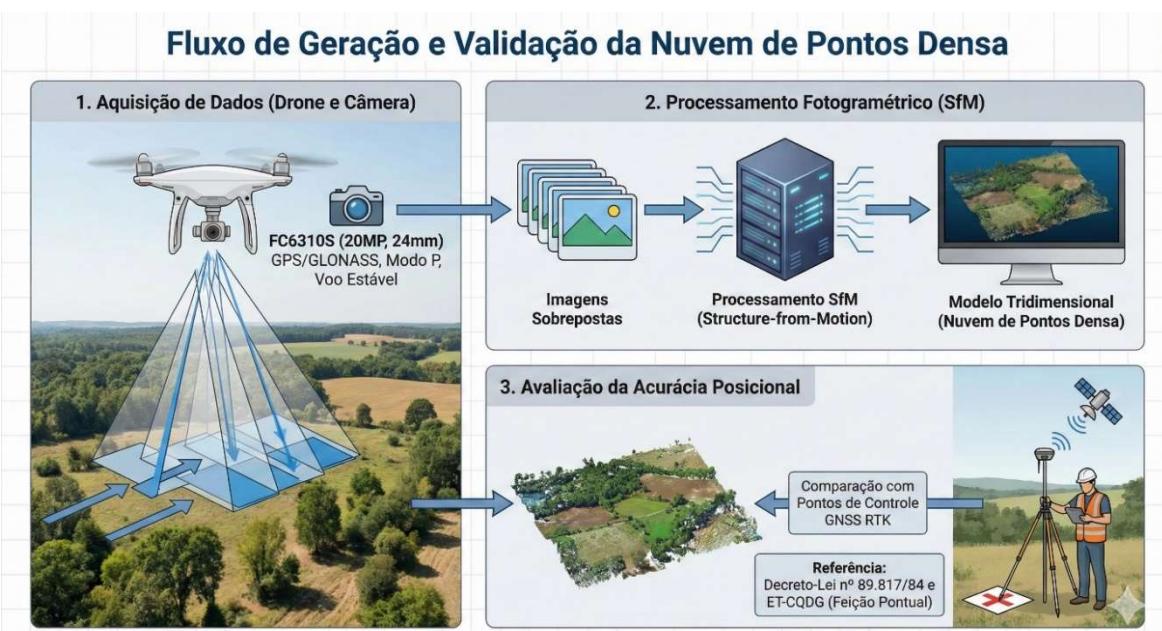


FIGURA 7 – Síntese do processo para geração da nuvem de pontos.
Fonte: Autor (2025), com Google Gemini.

De forma mais aprofundada, a geração da nuvem de pontos densa foi conduzida por meio de um fluxo fotogramétrico estruturado e preciso, fundamentado na técnica *Structure-from-Motion* (SfM), implementado com dados adquiridos a partir de uma ARP. A plataforma utilizada foi o drone DJI Phantom 4 Pro, dotado de sistema de posicionamento GPS/GLONASS e com resistência a ventos de até 10 m/s, o que proporcionou estabilidade durante o voo e maior precisão no registro de coordenadas geográficas. O drone operou a uma velocidade máxima de 50 km/h no modo P, que utiliza o GPS e os sensores de visão para manter a posição e a altitude estáveis, possibilitando cobrir a área no tempo necessário e mantendo a qualidade dos dados coletados.

A câmera FC6310S, integrada com sensor CMOS de 1 polegada, resolução de 20 megapixels, 84° de campo de visão e distância focal de 24 mm (equivalente ao formato 35 mm), com ajustes de abertura entre f/2,8 e f/11, permitiu maior flexibilidade para ajustar a profundidade de campo e a exposição durante os voos.

As imagens sobrepostas foram processadas com base em cálculos fotogramétricos para a geração de um modelo tridimensional na forma de nuvem de pontos. A avaliação da acurácia posicional desse modelo foi realizada por meio da comparação com pontos de controle obtidos em campo com receptores GNSS em modo RTK. Como referência, adotou-se o padrão de acurácia definido pelo Decreto-Lei nº 89.817/84, complementado pelas diretrizes da Especificação Técnica de Controle de Qualidade em Dados Geoespaciais (ET-CQDG), utilizando-se o método de feição pontual.

3.6. Georreferenciamento da nuvem de pontos

Para o georreferenciamento absoluto da nuvem de pontos, foram utilizados 44 pontos de apoio, como mostra a Figura 8, sendo 26 pontos de controle em campo (GCPs) e 18 pontos de checagem (CKPs), coletados com receptor GNSS Topcon Hiper V de dupla frequência operado em modo RTK (*Real Time Kinematic*).

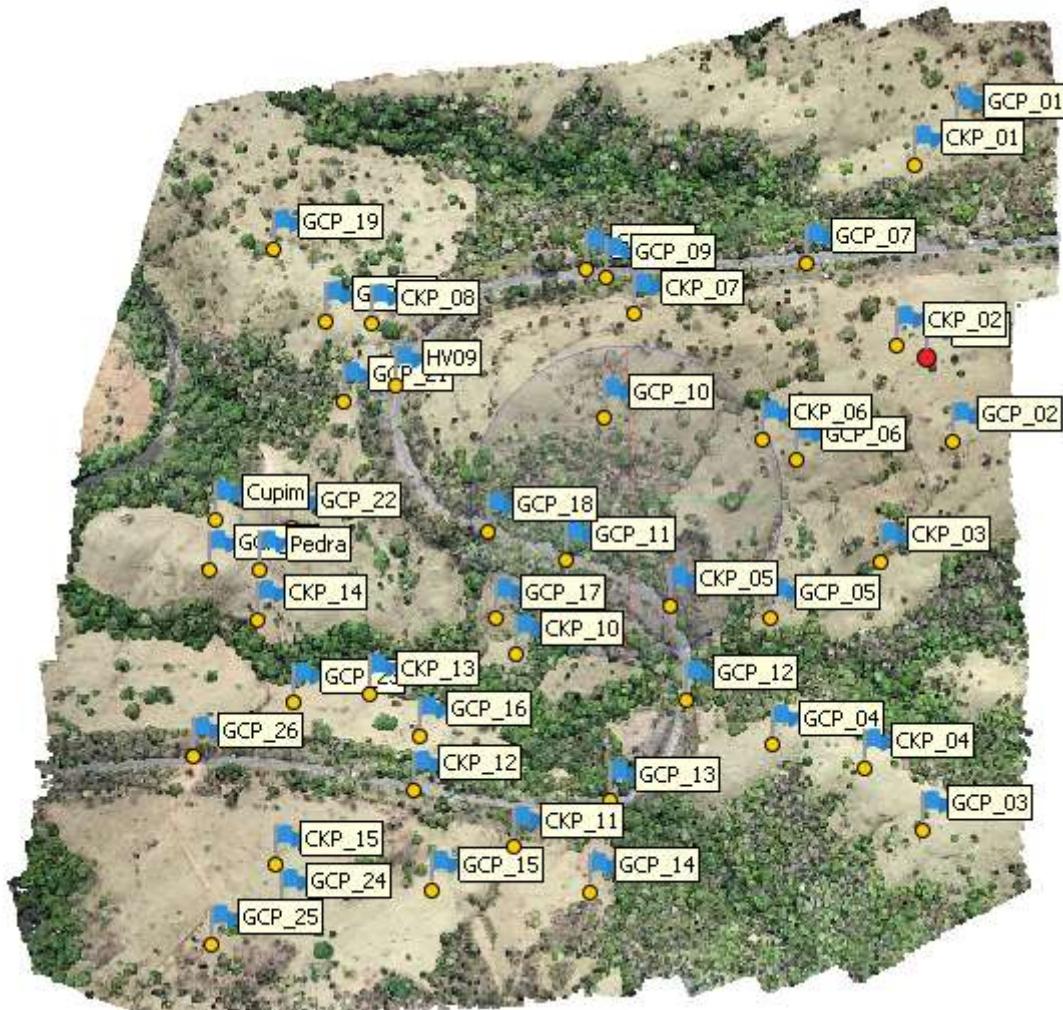


FIGURA 8 – Distribuição espacial dos Pontos de Controle e Pontos de Checagem.
Fonte: Autor (2025).

A distribuição dos pontos de apoio foi criteriosamente planejada para garantir a máxima precisão no ajustamento da nuvem de pontos. Para evitar distorções no modelo final, os pontos de apoio foram distribuídos de forma estratégica ao longo das extremidades da imagem, abrangendo as áreas periféricas e centrais da cena fotogramétrica. Essa configuração busca reduzir ao máximo eventuais distorções geométricas que possam surgir em razão de efeitos radiais ou de outras limitações inerentes aos sistemas fotogramétricos, como a curvatura das lentes ou mudanças de altitude ao longo do voo. Além disso, a distribuição extensa e equilibrada dos pontos de apoio nas bordas da imagem, associada ao uso do georreferenciamento, assegura que a nuvem de pontos final tenha uma precisão homogênea em toda a área de estudo, sem perdas significativas de acuracidade em regiões mais afastadas do ponto central, o que é essencial para garantir uniformidade na extração da feição da rodovia, segundo Luther; Geist; Fluegge (2024) que será detalhada mais adiante. Esses GCPs foram inseridos no projeto fotogramétrico para um segundo ajustamento por feixe, com otimização conjunta das imagens

das câmeras e dos parâmetros de calibração, para melhorar a orientação absoluta das imagens corrigindo erros sistemáticos, reduzindo distorções, resultando em um modelo tridimensional com excelente fidelidade posicional garantindo que o produto final represente fielmente a realidade do terreno. Os CKPs embora não os utilizam para o ajustamento no processamento, é de fundamental importância para validar a acurácia do modelo. Os erros no ajustamento da nuvem de pontos foram avaliados por meio dos valores da raiz do erro quadrático médio (em inglês, *Root Mean Squared Error – RMSE*) obtidos para os pontos de controle e de checagem. A metodologia adotada assegurou que os resíduos entre as coordenadas de referência e as coordenadas ajustadas da nuvem de pontos permanecessem dentro de margens aceitáveis para levantamentos de alta precisão. Embora os resultados finais dos erros serão detalhados mais adiante, é importante destacar que o processo de ajustamento foi definido seguindo critérios no que tange ao controle de qualidade, utilizando pontos de apoio bem distribuídos em toda área e técnicas de georreferenciamento, visando a minimização de distorções e a maximização da acurácia nas estimativas de posição. Esse cuidado metodológico é fundamental para garantir a confiabilidade dos dados gerados e sua aplicação em projetos topográficos de alta precisão.

3.7. Extração da feição de interesse (rodovia)

Desde o planejamento, até o processamento da nuvem, já se previa a necessidade de um recorte preciso da área de interesse, de modo a isolar apenas os elementos pertinentes à análise, ou seja, o trecho pavimentado, entre acostamentos e a via de rolamento no quilometro 36 à 39. Antes do recorte de fato, foi aplicada a filtragem por confiança no *Agisoft Metashape*, por meio da ferramenta *Calculate Point Confidence*. Essa operação, embora não remova fisicamente os pontos de baixa confiabilidade, oculta-os da visualização, proporcionando um ambiente de navegação, edição e inspeção mais eficiente, além de preservar a integridade posicional do modelo. Na sequência, utilizou-se a ferramenta *Trimming*, também no Metashape, para realizar o corte da nuvem de pontos. Esse recurso permite a remoção de elementos espúrios, como partes do fundo, ruídos, reflexos ou qualquer dado capturado fora da geometria principal da rodovia. A aplicação dessas ferramentas resulta em um modelo tridimensional mais limpo, com superfície mais coerente, e adequada para análise detalhada. Ao eliminar pontos desnecessários, o *trimming* contribui diretamente para a redução da densidade do modelo, sem perca de precisão e representatividade da área de interesse, além de facilita a manipulação em softwares de manipulação de nuvem de pontos, como é o caso do *Agisoft Metashape*, como mostrada na Figura 9. A etapa inicial da geração do Modelo Digital de Terreno (MDT) consistiu na importação, para o software *Agisoft Metashape*, da nuvem de pontos previamente classificada

como pertencente ao solo, contendo aproximadamente 9.842.361 pontos, com densidade média de 78 pontos/m². A Figura 9a apresenta os pontos do terreno identificados sob a cobertura arbórea, após a remoção dos pontos não terrestres da nuvem. Posteriormente, os dados geoespaciais processados foram utilizados para a análise estatística do MDT. Concluídas essas etapas de refinamento, a extração da feição de interesse da nuvem de pontos foi exportada no formato (*.txt) e importada no software MATLAB® para posterior processamento.

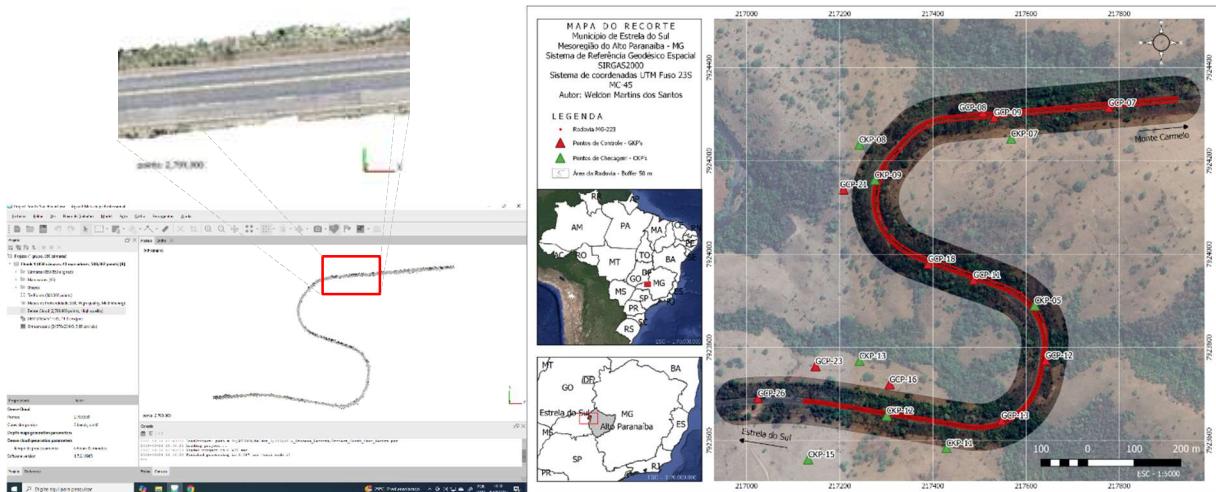


FIGURA 9 – Imagem do recorte com buffer de 50 metros, a partir do eixo da Rodovia.
Fonte: Autor (2025).

3.8. Registro dos pontos coletados pelo receptor GNSS com a nuvem gerada pelo processamento aerofotogramétrico utilizando ARP

Para avaliar a correspondência geométrica entre as coordenadas tridimensionais obtidas pelo receptor GNSS através do método de posicionamento em tempo real, ou seja, em modo RTK e aquelas derivadas do levantamento aerofotogramétrico, adotou-se um procedimento analítico baseado exclusivamente no cálculo das distâncias ao vizinho mais próximo, implementado por meio de um script desenvolvido em MATLAB®. Essa abordagem foi escolhida por sua objetividade, precisão e ampla aceitação na literatura especializada como método eficaz para quantificar discrepâncias espaciais entre nuvens de pontos.

O procedimento consistiu na análise sistemática da distância euclidiana tridimensional entre cada ponto de coordenada tridimensional coletado pelo receptor do conjunto GNSS e o seu respectivo ponto mais próximo advindo da nuvem de pontos obtida a partir do processamento aerofotogramétrico de imagens coletadas pelo sensor embarcado na ARP. Para cada ponto de coordenada obtido pelo receptor GNSS, o algoritmo localizou, mediante busca otimizada, o elemento mais próximo na nuvem de pontos geradas pelo processamento de imagens oriundas da ARP, calculando automaticamente a distância mínima entre eles. Esse

cálculo foi realizado sobre as três componentes espaciais (E , N , h), considerando a métrica euclidiana clássica em \mathbb{R}^3 .

A correspondência entre os pontos foi realizada por meio da função *knnsearch* no toolbox do MATLAB®, que implementa uma busca eficiente do vizinho mais próximo (*k-nearest neighbors* – KNN) com base na distância euclidiana tridimensional. Para cada ponto do conjunto coletado pelo receptor GNSS, representado pelas coordenadas (E_{gnss} , N_{gnss} , h_{gnss}), o algoritmo percorreu automaticamente a nuvem de pontos gerada pelo processamento aerofotogramétrico das imagens da ARP, (E_{arp} , N_{arp} , h_{arp}), identificando aquele cuja distância fosse mínima em relação ao ponto GNSS considerado. A distância entre os pontos foi calculada segundo a fórmula clássica da métrica euclidiana:

$$d(ARP, GNSS) = \sqrt{(E_{gnss} - E_{arp})^2 + (N_{gnss} - N_{arp})^2 + (h_{gnss} - h_{arp})^2} \quad (1)$$

Essa busca foi repetida para cada um dos pontos coletado com receptor GNSS, resultando em um vetor de distâncias mínimas e um índice correspondente ao ponto da nuvem advinda do processamento do levantamento aerofotogramétrico de imagens da ARP mais próximo. Para maior rigor analítico, foi implementado um critério de validação, baseado em um parâmetro denominado "raio de cobertura", que estabeleceu um limiar máximo aceitável de distância. Caso a distância mínima encontrada para determinado ponto coletado com receptor GNSS fosse inferior ou igual a esse limiar, as diferenças entre as coordenadas (em X, Y e Z) foram computadas e armazenadas. Caso contrário, o resultado foi desconsiderado, sendo registrado como valor ausente (NaN). Esse procedimento garantiu que apenas as correspondências espacialmente relevantes fossem consideradas na análise, aumentando a confiabilidade estatística dos resultados obtidos. Além disso, o script contabilizou automaticamente o número de pontos válidos tanto nas coordenadas obtidas pelo receptor GNSS-RTK quanto na nuvem de pontos adquiridas pela processamento de dados das imagens de ARP (Drone), assegurando rastreabilidade completa do processo.

Com as distâncias obtidas, o script executou automaticamente um filtro estatístico, eliminando correspondências cujo erro absoluto, entre coordenadas, excedesse 10 cm. Esta etapa é fundamental para o descarte de outliers que possam comprometer a avaliação da acurácia geométrica. Na sequência, foram calculadas as principais métricas descritivas de erro, consagradas na literatura internacional: a Raiz do Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square Error* — RMSE), o Erro Médio Absoluto (*Mean Absolute Error* — MAE) e os valores máximos e mínimos dos resíduos, além de um contador para a quantidade de pontos avaliados.

Este procedimento, inteiramente automatizado e reproduzível, forneceu um diagnóstico quantitativo preciso da compatibilidade geométrica entre os modelos tridimensionais, constituindo uma base metodológica sólida para a análise comparativa e validação da qualidade do levantamento topográfico realizado.

3.9. Validação externa

A validação externa da acurácia posicional do modelo foi conduzida com base nos 2.350 pontos independentes coletados com receptor GNSS pela técnica de posicionamento em modo RTK, distribuídos uniformemente ao longo do modal rodoviário, ou seja, na (bordas e eixo), como pode ser observado na Figura 4. Esses pontos não foram utilizados no ajustamento da nuvem de pontos e serviram exclusivamente para avaliação independente da precisão do modelo tridimensional gerado. E, desse modo, a nuvem de pontos é reposicionada conferindo acurácia ao bloco de ajustamento aerofotogramétrico

Para efetivar essa etapa de validação, as altitudes estimadas pela nuvem de pontos proveniente do processamento aerofotogramétrico foram comparadas diretamente com as altitudes obtidas em campo com o uso de receptor GNSS pela técnica de RTK, mediante correspondência espacial conduzida com base no método do vizinho mais próximo. A associação entre os dois conjuntos de dados foi realizada por meio de um script desenvolvido em MATLAB®, que, para cada ponto coletado com o receptor GNSS, identificou automaticamente o ponto mais próximo na nuvem gerada pelo processamento das imagens capturadas por sensores embarcados na ARP, utilizando a distância euclidiana tridimensional, sem qualquer interpolação ou ajuste adicional. Dessa forma, para cada ponto coletado com o receptor GNSS, a altitude correspondente foi obtida diretamente a partir do processamento fotogramétrico que gerou a nuvem de pontos derivada do sensor embarcado na ARP, com base no método vizinho mais próximo (em inglês: *Nearest Neighbor*).

A partir dessa correspondência, calculou-se uma matriz de resíduos verticais (erro em h), obtida pela subtração direta entre os valores altimétricos estimados pela nuvem de pontos e os valores de referência coletados com receptor GNSS-RTK. Essa matriz possibilitou uma análise ponto a ponto das discrepâncias altimétricas e permitiu calcular a precisão vertical do modelo, além de identificar padrões ou anomalias localizadas. A distribuição dos erros foi representada graficamente por meio de mapas de distribuição, mostrados na Figura 6(a, c, d) e histogramas de frequência, mostrados na Figura 6(b, d, f), destacando a variação espacial do desvio padrão na componente h. A predominância de resíduos centrados em torno de zero, com baixa dispersão, reforça a ausência de viés sistemático altimétrico, demonstrando consistência

na aplicação do modelo fotogramétrico. No entanto, observou-se uma variação pontual dos erros em regiões de maior complexidade topográfica e/ou nas extremidades da área mapeada, onde a sobreposição entre imagens e a incidência solar podem ter influenciado a qualidade da reconstrução tridimensional.

A análise dos desvios padrão por componente revelou estabilidade planimétrica satisfatória $E(X)$ e $N(Y)$, com dispersões inferiores a 0,03 m na maior parte do trecho. Por outro lado, a componente vertical $h(Z)$ apresentou maior sensibilidade, com desvios padrão em torno de 0,07 m em zonas críticas, entre taludes e áreas de sombreamento. Esses resultados evidenciam que, embora o modelo apresente desempenho global consistente, sua precisão local pode ser impactada por fatores geomorfológicos, fotogramétricos e/ou operacionais. A associação entre os pontos observados e os estimados foi realizada com base no método do vizinho mais próximo, considerando a distância euclidiana em 360° como critério de emparelhamento, como no trabalho de Dos Santos; Galo, (2014). A análise dos resíduos verticais foi conduzida por meio de histogramas e mapas temáticos, permitindo verificar a homogeneidade da acurácia ao longo do trecho mapeado.

As métricas estatísticas calculadas incluíram o Erro Médio Absoluto (MAE), representativo dos erros sistemáticos médios; a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), que incorpora tanto os erros sistemáticos quanto os aleatórios; além dos valores máximos e mínimos absolutos observados nos resíduos verticais. Essas medidas forneceram uma avaliação quantitativa robusta da acurácia altimétrica do modelo fotogramétrico gerado a partir de imagens coletadas por sensores embarcados em ARP, permitindo identificar não apenas a tendência geral dos erros, mas também sua dispersão e extremos ao longo do modal rodoviário.

3.10. Distribuição espacial do desvio padrão E N h

Com o objetivo de caracterizar a precisão e a variabilidade interna das observações de campo, foi realizada a análise dos desvios padrão das coordenadas leste $E(X)$, norte $N(Y)$, e altitude elipsoidal $h(Z)$ dos 2.350 pontos. A Figura 10 apresenta, de forma conjunta, as distribuições espaciais dos desvios padrão para cada componente nas imagens (a), (c) e (e), e seus respectivos histogramas de frequência nas imagens (b), (d) e (f).

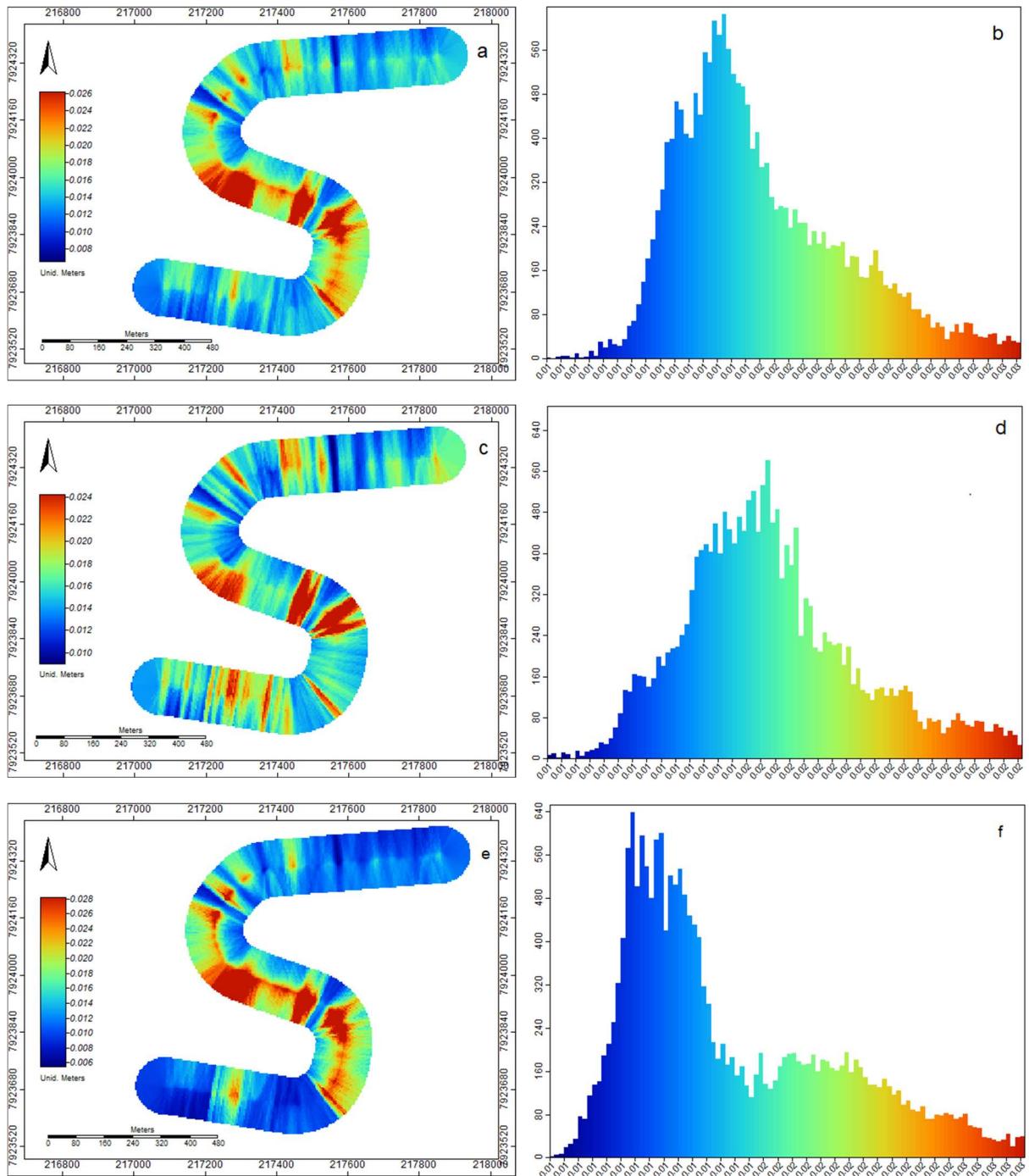


FIGURA 10. (a, c, e) – Distribuição espacial do desvio padrão e , (b, d, f) – Histograma das componentes $E(X)$, $N(Y)$ e $h(Z)$ do GNSS-RTK.
Fonte: Autor (2025).

Os valores de desvio padrão variaram entre 0,001 m e 0,097 m para E , entre 0,0001 m e 0,103 m para a coordenada N e entre 0,000001 m e 0,072 m para h , o que reflete a alta estabilidade dos dados obtidos. As distribuições espaciais evidenciam a predominância de zonas com baixos desvios (inferiores a 0,03 m), com poucas áreas localizadas de maior variabilidade, geralmente associadas a trechos de transição topográfica ou à periferia do modal rodoviário. Os histogramas, por sua vez, confirmam essa homogeneidade, apresentando formas

aproximadamente unimodais, com concentrações marcantes em faixas de baixa dispersão e caudas reduzidas, sendo as componentes Este e Altitude levemente inclinadas para a direita. A análise integrada dessas representações permite concluir que os dados coletados com receptor GNSS, utilizados como base de validação externa, exibem comportamento estatístico e espacial altamente confiável, sendo compatíveis com levantamentos geodésicos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico, são apresentados os resultados da avaliação da qualidade da nuvem de pontos gerada por aerofotogrametria, comparando-a com os pontos de referência coletados por GNSS em modo RTK. Inicialmente, é realizada a análise da distribuição espacial dos erros, considerando separadamente as componentes planimétricas Este (E) e Norte (N), bem como a componente altimétrica (h). Em seguida, são avaliadas as métricas estatísticas de acurácia, destacando-se os valores de RMSE, MAE, além dos erros máximos e mínimos observados.

A organização dos resultados nesta ordem busca evidenciar, de maneira sistemática, o comportamento dos resíduos em cada componente, permitindo a identificação de tendências, concentrações e dispersões. Tal abordagem possibilita compreender não apenas a magnitude dos erros, mas também a sua distribuição no espaço, aspecto essencial para a validação da nuvem de pontos como alternativa aos levantamentos topográficos convencionais.

Por fim, os valores consolidados são apresentados na Tabela 4, a qual sintetiza as métricas estatísticas para cada componente analisada. Essa síntese constitui a base para a interpretação subsequente, na qual são discutidas as implicações dos resultados obtidos e sua aderência às referências da literatura e às normas de precisão cartográfica aplicáveis.

4.1. Distribuição espacial dos erros E, N, h

A avaliação da acurácia posicional dos dados oriundos da nuvem de pontos obtida pelo processamento do levantamento aerofotogramétrico com (ARP) foi realizada com base nos resíduos obtidos entre os pontos medidos com receptores GNSS pela técnica de posicionamento em modo RTK e os respectivos valores interpolados da nuvem de pontos gerada pela coleta e processamento de imagens obtidas com a ARP e analisada com o Sistema de Análises Geocientíficas Automatizado (no inglês: *System for Automated Geoscientific Analyses – SAGA GIS*) na versão (2.3.2). Esta análise fundamentou-se na técnica geoestatística de interpolação espacial baseada na teoria das variáveis regionalizadas, ou seja, a *krigagem* ordinária, a qual se revelou adequada para interpolar os resíduos e representar espacialmente sua distribuição ao

longo da área de estudo. A Figura 11 (a, c, e) e (b, d, f) representam, as distribuições espaciais dos erros nas componentes leste E(X), norte N(Y) e na altitude elipsoidal e/ou geométrica h(Z) obtida em função do processamento do levantamento com o receptor GNSS em modo RTK, subtraindo as coordenadas dos pontos coletado com a aerofotogrametria da nuvem de pontos com a ARP, organizadas em duas imagens: mapas de distribuição espacial e histogramas da frequência dos valores dos erros respectivamente.

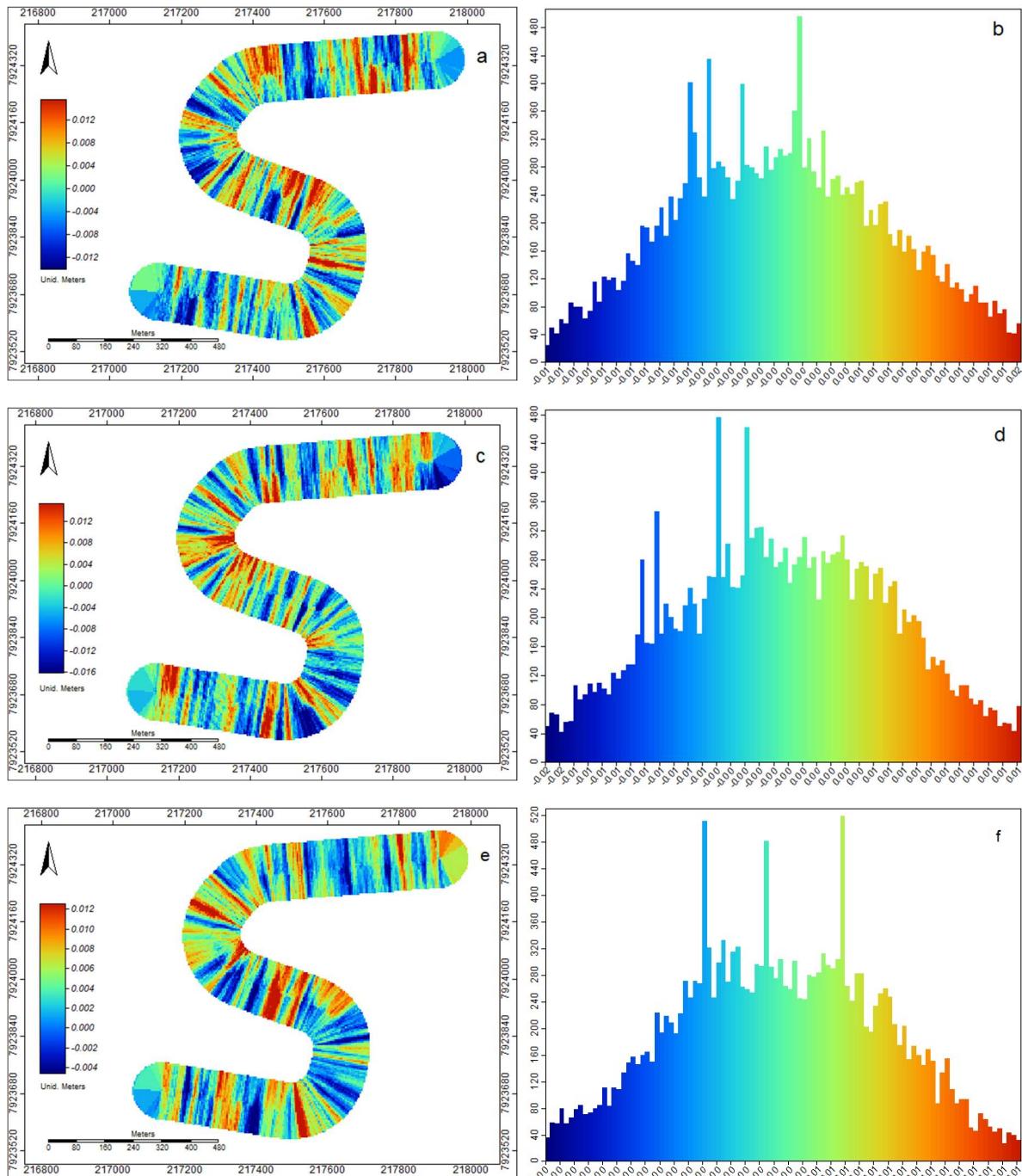


FIGURA 11. (a, c, e) – Distribuição espacial dos erros e, (b, d, f) – Histograma das componentes E(X), N(Y) e h(Z) da nuvem de pontos da ARP subtraído dos pontos coletados com o receptor GNSS-RTK.

Fonte: Autor (2025).

4.2. Erros na componente Este (X)

A distribuição espacial do erro da componente leste E(X), representada na Figura 6a, evidencia uma alternância equilibrada entre resíduos positivos e negativos ao longo do traçado, sem a formação de zonas concentradas de discrepâncias sistemáticas. As manchas cromáticas, bem distribuídas em toda a extensão do modal rodoviário, indicam comportamento essencialmente aleatório dos desvios planimétricos nesta direção. Esta constatação é reforçada pelo histograma correspondente Figura 6b, que revela uma distribuição simétrica centrada em torno de zero, com acúmulo de frequências na faixa de erro entre $\pm 0,02$ m. A avaliação estatística dos resíduos da componente leste indicou uma média de 0,0037 m, desvio padrão de 0,0256 m, assimetria de 0,661 e curtose de 0,496. Apesar da leve assimetria positiva, os resultados apontam para uma distribuição com comportamento próximo do normal, sem evidência de caudas extremas ou concentração de outliers. Esses dados sustentam a conclusão de que o modelo apresenta estabilidade geométrica no eixo leste, com erros majoritariamente aleatórios e flutuações pontuais que não comprometem a acurácia planimétrica da restituição.

4.3. Erros na componente Norte (Y)

A análise do erro na componente norte N(Y), ilustrada na Figura 6c, demonstra um padrão espacial ligeiramente mais disperso em relação à componente leste E(X). Embora ainda se observe alternância de erros positivos e negativos, há segmentos localizados com maior intensidade de resíduos negativos, indicando uma tendência à subestimação das coordenadas norte em algumas regiões. Este comportamento é compatível com imperfeições no pareamento de pontos em áreas com vegetação ou transições topográficas, onde a reconstrução fotogramétrica tende a ser mais suscetível a distorções. O histograma Figura 6d confirma essa leitura, apresentando assimetria negativa discreta, com concentração da maior parte dos resíduos entre -0,04 m e 0,00 m. Para avaliar a normalidade da distribuição, foi realizada uma análise estatística descritiva dos resíduos da componente norte, que indicou média de -0,0018 m, desvio padrão de 0,0282 m, assimetria de -0,275 e curtose de 0,014. Esses valores indicam que os dados seguem uma distribuição aproximadamente simétrica e mesocúrtica – com curtose próxima da normal, o que é compatível com uma distribuição (normal) gaussiana. Assim, considera-se que os erros exibem comportamento predominantemente aleatório, sem viés sistemático relevante, e não comprometem a qualidade geométrica do modelo nessa direção.

4.4. Erros na componente (Z)

A componente vertical $h(Z)$, apresenta, conforme Figura 6e, um padrão espacial uniforme, com distribuição suave dos resíduos ao longo de todo o trecho em estudo do modal rodoviário. As variações cromáticas são menos intensas e mais dispersas do que nas componentes planimétricas, o que indica uma representação altimétrica consistente do modelo fotogramétrico. A distribuição praticamente simétrica do histograma (Figura 6f), com a maior parte dos resíduos concentrados entre -0,02 m e +0,01 m, reforça essa estabilidade altimétrica.

A análise estatística descritiva dos erros verticais confirmou essa leitura: a média dos resíduos foi de -0,0229 m, com desvio padrão de 0,0345 m, assimetria de 0,078 e curtose de -0,181. Tais valores indicam uma distribuição próxima da normal, com levea tendência negativa e sem presença de caudas, características compatíveis com um comportamento aleatório dos erros verticais.

Considera-se, portanto, que a acurácia vertical global — entendida aqui como a proximidade entre os valores altimétricos do modelo e os valores reais obtidos em campo — é satisfatória. Esse desempenho é indicativo de bom alinhamento na componente vertical, ou seja, há coerência entre a elevação da nuvem de pontos gerada pelo modelo fotogramétrico e os pontos de verificação altimétrica coletados via receptor GNSS-RTK. Em termos práticos, a altitude calculada pelo modelo fotogramétrico está muito próxima da altitude medida em campo com o receptor GNSS.

No presente estudo, embora a ET-ADGV proponha métodos formais de amostragem para coleta de pontos de checagem, a abordagem adotada baseou-se em pontos de controle e verificação previamente estabelecidos e distribuídos ao longo das bordas e do eixo do modal, o que assegura a confiabilidade da análise, mesmo sem seguir estritamente os critérios de amostragem da norma. Ainda assim, os resultados estatísticos obtidos demonstram a efetividade da calibração do modelo e a qualidade do ajuste vertical do levantamento.

4.5. Métricas RMSE, MAE, Máximo e Mínimo

A análise quantitativa dos erros posicionais entre os dados obtidos com receptor GNSS em modo RTK e os valores interpolados da nuvem gerada pelo processamento de imagens com a ARP em software específico, foram fundamentadas em métricas estatísticas clássicas, amplamente consagradas na literatura técnico-científica: a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), o Erro Médio Absoluto (MAE), e os erros absolutos máximos e mínimos. O RMSE considera a soma quadrática dos resíduos, penalizando mais fortemente os erros extremos e

representando a soma dos erros sistemáticos e aleatórios, enquanto o MAE quantifica a magnitude média dos desvios, sendo sensível a erros sistemáticos. Suas respectivas expressões são dadas por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{x}_i - x_i| \quad (3)$$

em que: \hat{x}_i representa a coordenada extraída da nuvem de pontos obtida pelo processamento aerofotogramétrico; x_i é o valor de referência adquirido com GNSS-RTK e, n é o número total de pontos comparados.

A relação entre RMSE e MAE é crucial: quando $RMSE > MAE$, há a presença de erros aleatórios significativos na distribuição dos resíduos. Se a diferença entre RMSE e MAE for pequena, a dispersão dos erros é reduzida e não há valores extremos que influenciem fortemente a acurácia global (Jiménez et al., 2021).

Os resultados numéricos obtidos — apresentados na Tabela 5 — evidenciam elevada acurácia posicional do modelo tridimensional.

Para a componente horizontal Este (E), obteve-se RMSE de 0,033 m e MAE de 0,028 m, com erro máximo absoluto de 0,097 m.

Para o Norte (N), os valores foram similares: RMSE de 0,033 m, MAE de 0,028 m e erro máximo de 0,103 m.

Já na componente vertical (h), observou-se excelente desempenho métrico, com RMSE de apenas 0,016 m, MAE de 0,011 m e erro máximo de 0,070 m. A análise tridimensional consolidada (3D) apresentou RMSE global de 0,050 m, o que está de acordo com os padrões de acurácia estabelecidos por órgãos normativos nacionais e internacionais, especialmente quando se considerada a alta densidade da nuvem de pontos obtida pelo processamento aerofotogramétrico através das imagens coletadas por sensores em Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP).

Os erros Máximo e Erro Mínimo – fornecem uma visão da amplitude das discrepâncias entre a nuvem gerada e os pontos GNSS.

Esses resultados validam a confiabilidade geométrica da modelagem digital aplicada neste estudo, demonstrando que o processo de reconstrução fotogramétrica, aliado à adequada

calibração e validação externa com receptor GNSS-RTK, é capaz de gerar produtos cartográficos compatíveis com levantamentos topográficos.

TABELA 5 – Métricas nas componentes coordenadas da nuvem de pontos em relação aos pontos GNSS-RTK

Métricas	E(X)	N(Y)	h(Z)	3D (N, E, h)
RMSE (m)	0,033	0,033	0,015	0,050
MAE (m)	0,028	0,028	0,011	0,047
Erro máximo	0,097	0,103	0,060	0,117
Erro mínimo	0,000	0,000	0,000	0,002

Fonte: Autor (2025).

A diferença entre RMSE e MAE nos eixos E, N, e h:

- E: RMSE (0,033 m) vs. MAE (0,028 m) → Diferença de 5,00 mm.
- N: RMSE (0,033 m) vs. MAE (0,028 m) → Diferença de 5,00 mm.
- h: RMSE (0,015 m) vs. MAE (0,011 m) → Diferença de 4,00 mm.

4.6. Interpretação:

A maior diferença entre RMSE e MAE ocorre na componente horizontal, indicando que há presença de erros aleatórios afetando as coordenadas E e N, mas de magnitudes pequenas ($MAE < 2,8 \text{ cm}$).

A menor diferença ocorre na componente vertical (h), o que sugere menor variabilidade dos erros e melhor controle da precisão altimétrica.

O erro máximo observado ($\sim 12 \text{ cm}$) configura-se como um outlier e sua causa específica não pôde ser identificada com precisão. No entanto, possíveis origens incluem uma solução erroneamente classificada como fixa durante o posicionamento GNSS-RTK, a seleção incorreta do vizinho mais próximo na correspondência entre os pontos da nuvem geradas pelo procedimento aerofotogramétrico em software específico e os do levantamento via receptor GNSS modo RTK, ou ainda falhas no ajuste da nuvem de pontos durante o processo de georreferenciamento e alinhamento previamente descrito.

Os resultados mostram que o MAE 3D (0,047 m) é bastante próximo do RMSE 3D (0,050 m), o que indica que o efeito sistemático é maior que o aleatório, dos erros, que poderia então ser corrigido por alguma técnica que modelasse esse efeito. Essa proximidade entre as métricas revela que os erros seguem um padrão consistente, com baixa variabilidade aleatória, o que reforça a possibilidade de aplicar ajustes futuros para aprimorar a acurácia dos modelos tridimensionais obtidos.

A literatura aponta que erros verticais em fotogrametria com ARP geralmente variam de 1 a 5 vezes o GSD (*Ground Sampling Distance*), o que é considerado uma faixa de erro relativamente aceitável para muitas aplicações de alta precisão, conforme os estudos de (De Oliveira; Paradella; Silva, 2011; Jiménez et al., 2021; Cho et al., 2023; Florin et al., 2024; Almeida et al., 2024). Em particular, a componente vertical da nuvem de pontos apresentou um RMSE $h = 0,016187$ m, o que reflete uma boa acurácia na estimativa das elevações. No entanto, ao avaliar a precisão, veracidade e acurácia dos dados, Rofatto et al. (2025) destacam a importância de uma análise mais detalhada das métricas utilizadas, sugerindo que a avaliação da acurácia não deve se restringir apenas a parâmetros globais, como o RMSE, mas também deve incluir métricas de tendência, como o MAE (*Mean Absolute Error*). Segundo os autores, o MAE é uma ferramenta essencial para identificar e quantificar viéses sistemáticos nos dados, ou seja, erros que se repetem de forma consistente em todas as medições. Essa recomendação é particularmente relevante quando se considera a pesquisa de Jiménez et al. (2021), que também identificou tendências sistemáticas em seus dados e usou o MAE para quantificá-las. No caso deste estudo, o valor do MAE $h = 0,012404$ m sugere a presença de um pequeno viés sistemático, indicando que os erros não são aleatórios, mas seguem uma tendência previsível. Isso é particularmente significativo quando se analisa a componente vertical, onde o erro sistemático pode ser mais pronunciado. Esse tipo de análise aprofundada da acurácia, conforme sugerido por Rofatto et al. (2025), permite uma compreensão mais precisa das fontes de erro e oferece subsídios para a melhoria contínua dos processos de fotogrametria com ARP.

Com base na literatura revisada, podemos avaliar os resultados comparando-os com padrões reconhecidos.

4.6.1. Acurácia Horizontal:

A literatura indica que a acurácia horizontal de levantamentos fotogramétricos com ARPs pode variar dependendo das características do terreno. Jiménez et al. (2021), no artigo *Digital Terrain Models Generated with Low-Cost UAV Photogrammetry*, apontam que, para terrenos planos, a acurácia horizontal pode variar de 1 a 3 vezes o GSD, enquanto para terrenos mais complexos essa faixa se amplia para 1 a 7 vezes o GSD. Considerando a área desta pesquisa como de terreno complexo, devido à topografia accidentada e à elevada variação altimétrica, a acurácia horizontal observada para as componentes E e N foi de 0,033 m (3,3 cm). Este valor, obtido a partir de um GSD de 5,6 cm/pixel, encontra-se não apenas dentro da faixa estabelecida pela literatura, mas inclusive superior ao limite inferior esperado ($1 \times \text{GSD} = 5,6$ cm), evidenciando que os resultados alcançados são consistentes e apresentam desempenho

mais preciso que o reportado em estudos de referência para terrenos de características similares. Dentre as finalidades mencionadas pode-se citar os estudos, de Fonseca et al. (2017), em “Avaliação da Qualidade Posicional de Dados Espaciais Gerados por VANT”, estabelece que levantamentos fotogramétricos com pontos de controle utilizando receptor GNSS devem atender aos critérios do Decreto-Lei 89.817/84, adaptada para produtos digitais com o padrão PEC-PCD, o que coloca esses levantamentos na Classe A para escalas de 1:1000. Os resultados obtidos nesta pesquisa estão em conformidade com esses critérios, demonstrando que a acurácia alcançada é compatível com as exigências legais e normativas para levantamentos dessa natureza.

4.6.2. Acurácia Vertical:

Jiménez et al., (2021) apontam que a acurácia vertical em levantamentos fotogramétricos tende a ser de 1,5 a 5 vezes o GSD.

Nesta pesquisa, o RMSE h (0,016187 m) indica um excelente controle da precisão altimétrica, sugerindo que a calibração da câmera e a qualidade da aerotriangulação foram bem executadas, minimizando distorções altimétricas como o efeito de "*doming*" (Pedreira; Oliveira; Santos, 2020; Li et al., 2022; Teixeira; Pulo. Júnior, 2023).

Se o MAE fosse muito menor que o RMSE, significaria que existem alguns erros atípicos (outliers) que aumentam a média quadrática dos erros. Como os valores são próximos, isso sugere que os erros são relativamente consistentes e sem tendências significativas.

Com base nesses dados, pode-se concluir que a tendência sistemática (viés) é baixa e que a acurácia geral da modelagem é elevada, com uma boa confiabilidade na estimativa das coordenadas espaciais a partir da nuvem de pontos gerada por levantamento e processamento aerofotogramétrico advindos de imagens coletadas por sensores embarcados em ARP e os pontos coletados com receptores GNSS pela técnica de posicionamento em modo RTK.

5. CONCLUSÕES

Este estudo evidenciou a viabilidade da utilização de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) para a aquisição de dados geoespaciais, por meio da geração de nuvens de pontos que possibilitaram a construção de Modelos Digitais de Terreno (MDT). A abordagem adotada demonstrou ser eficiente para aplicações em infraestrutura viária, considerando a qualidade dos dados obtidos.

Deste modo, os resultados indicaram que a acurácia e a precisão dos dados provenientes da fusão entre imagens capturadas pelo sensor da ARP e os pontos obtidos via GNSS-RTK são compatíveis com os valores reportados na literatura. Isso reforça a aplicabilidade dessa tecnologia para levantamentos topográficos que exigem confiabilidade e detalhamento.

Além disso, constatou-se que a integração entre GNSS e ARP proporciona um fluxo de trabalho eficiente e tecnicamente viável, capaz de atender às demandas de mapeamentos de alta densidade, especialmente em áreas de difícil acesso ou que demandam rapidez na coleta de dados.

A análise quantitativa das métricas RMSE e MAE revelou erros médios absolutos reduzidos, com valores de RMSE para as componentes E, N e h bem abaixo dos limites estabelecidos em estudos anteriores, indicando um alto nível de acurácia global. A comparação com outros estudos (Mora et al., 2019; Jiménez et al., 2021) confirmou a consistência dos resultados, especialmente na componente vertical, onde a acurácia foi também satisfatória.

Além disso, a análise espacial e estatística dos resíduos por meio da krigagem ordinária permitiu identificar tendências sutis no comportamento dos erros, particularmente na componente Leste, que apresentou um leve viés negativo. Nesse contexto, o termo “leve viés” refere-se a uma tendência sistemática de pequena magnitude, na qual os valores estimados pelo modelo tendem a se posicionar ligeiramente abaixo daqueles obtidos em campo. Trata-se, portanto, de um deslocamento médio não aleatório, porém de baixa intensidade, que não compromete substancialmente a coerência geométrica do conjunto.

Importante destacar que esse tipo de viés é amplamente reconhecido na literatura em fotogrametria e geoprocessamento e é considerado totalmente passível de correção. Em situações como esta, a mitigação pode ser realizada por diferentes abordagens, tais como: **(i)** aplicação de um ajuste simples de offset, compensando a diferença média entre os conjuntos; **(ii)** refinamento do ajuste do bloco fotogramétrico, incluindo melhorias na distribuição ou ponderação dos pontos de controle; ou **(iii)** adoção de correções locais orientadas pelo mapa de tendência espacial dos resíduos, conforme revelado pela *krigagem*. Dessa forma, ainda que o viés esteja presente, ele pode ser minimizado ou eliminado a partir de procedimentos tradicionais de calibração e ajuste, sem comprometer a confiabilidade dos resultados.

O estudo contribui para a consolidação do uso de ARP em levantamentos aerofotogramétricos de rodovias, sendo uma alternativa robusta às técnicas convencionais, com potencial para otimização de tempo e redução de custos. No entanto, ressalta-se a necessidade de cuidados no planejamento do voo, calibração dos equipamentos e distribuição dos pontos de controle, para garantir a máxima precisão.

Por fim, a partir dos resultados obtidos pela avaliação da qualidade da nuvem de pontos gerada por processamento em software específico pelos dados coletados por câmeras de pequeno formato a bordo da ARP, foi possível sinalizar que há de se discutir, de forma ampla, sobre as possibilidades de utilização/aplicação desse tipo de dado em diversas temáticas, tais como: descrição geométrica de parcelas, projeto geométrico na identificação de construções ou atividades não autorizadas na faixa de domínio., dentre outros.

Futuros estudos poderão explorar a combinação com sensores lidar, a análise de diferentes algoritmos de reconstrução e o impacto de diversas configurações de GCPs, ampliando a precisão e a aplicabilidade desta tecnologia em outras áreas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, Fernando J; AGUIRA, Francisco; AGUILAR, Manuel A; CARVAJAL, Fernando.: Effects of Terrain Morphology, Sampling Density, and Interpolation Methods on Grid DEM Accuracy. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, V. 71, p. 805-816. (2005). Disponível em: <https://doi.org/10.14358/PERS.71.7.805>. Acesso em: 16 abr. 2023.

AHMED, Wasiu Akande; ISIAKA, Lukman Alage; MALA, Baba; OLATOYINBO, Seyi Festus. Evolution of GNSS/GPS technology and its applications from ancient times to the present. Next Research, v. 2, n. 3, p. 100387, 2025. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100387>. Acesso em: 30 abr. 2023.

AIBIN, Michael; ALDIAB, Motasem; BHAVSAR, Ruchi; LODHRA, Jasleen; REIS, Mino; REZAEIAN, Fifi; SACZUK, Eric; TAER, Mahsa; TAER, Maryam. Survey of RPAS autonomous control systems using artificial intelligence. IEEE Access, v. 9, p. 167580-167591. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3136226>. (2021). Acesso em: 05 de jan. 2023.

ALAMRI, Sultan; ELA, Jiang Feng; ZHU, Jun; YANG, Min; KAINZ, Wolfgang. The Geospatial Crowd: Emerging Trends and Challenges in Crowdsourced Spatial Analytics. ISPRS International Journal of Geo-Information, v. 13, n. 6, p. 168, (2024). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijgi13060168>. Acesso em: 20 abr. 2023.

ALI, Ahmad; ORDOÑEZ, Javier; CARTUJO, Pedro; MARTOS, Vanesa. Remotely Piloted Aircraft (RPA) in Agriculture: A Pursuit of Sustainability. Agronomy 11, no. 1: 7. (2021). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy11010007>. Acesso em: 27 de dez. 2022.

ALMEIDA, Edmilson Igor Bernardo; SOUSA, Andreza Maciel de; RIBEIRO, Bruna da Silva Brito; SOUSA, Daniel Lobo de; SILVA, Maria da Paz Pires; SOUSA, Washington da Silva; OLIVEIRA, Leonardo Bernardes Taverny de; LESSA, Bruno Franca da Trindade; SOUZA, Jarlyson Brunno Costa; PONTES, Islana Silva. Aerial survey and glyphosate-resistant weeds control before soybean seeding. Australian Journal of Crop Science, v. 18, n. 1, p. 29-36, (2024). Disponível em: <https://doi.org/10.21475/ajcs.24.18.01.p4019>. Acesso em: 27 de dez. 2022.

ALVES, S. DE S. O.; BAPTISTA, A. C. **Processamento e avaliação posicional de produtos cartográficos obtidos por uma ARP em região de relevo acidentado.** Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR – Santos/SP, 2019.

ASPRS – AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. Edition 1, Version 1.0, Bethesda, MD: ASPRS, Nov. 2014. Disponível em: <https://www.asprs.org/ItemDetail?iProductCode=PAS2024&Category=PUB&WebsiteKey=e8e7bedc-f8a0-4a72-9989-95fd785baf8a>. Acesso em: 30 nov. 2024.

BARBA, Salvatore; BARBARELLA, Maurizio; BENEDETTO, Alessandro Di; FIANI, Margherita; GUJSKI, Lucas; LIMONGIELLO, Marco.: Accuracy Assessment of 3D Photogrammetric Models from an Unmanned Aerial Vehicle. *Drones*, 3(4), 79., 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/drones3040079>. Acesso em: 02 fev. 2023.

BELZ, N.; MCCORMACK, E. **Guidelines for using photogrammetric tools on unmanned aircraft systems to support the rapid monitoring of avalanche-prone roadside environments.** US Department of Transportation Pacific Northwest Transportation Consortium Washington State Department of Transportation Alaska Department of Transportation University of Washington University of Alaska Fairbanks,. 2022. Acesso em março de 2023. Disponível em: <https://digital.lib.washington.edu/researchworks/handle/1773/49179>. Acesso em: 13 mai. 2024.

BENJAMIN, Adam R; O'BRIEN, Dennis; BARNES, Grenville; WILKINSON, Benjamin E; VOLKMANN, Walter.: Improving Data Acquisition Efficiency: Systematic Accuracy Evaluation of GNSS-Assisted Aerial Triangulation in UAS Operations. *Journal of Surveying Engineering - American Society of Civil Engineers*, v. 146, ed. 1, 2019. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000298](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000298). Acesso em: 15 out. 2023.

BENTO, Nicole Lopes; FERRAZ, Gabriel Araújo e Silva; BARATA, Rafael Alexandre Pena; SANTANA, Luca Santos; BARBOSA, Brenon Diennevan Souza; CONTI, Leonardo; BECCIOLENI, Valentina; ROSSI, Giussepe.: Overlap influence in images obtained by an unmanned aerial vehicle on a digital terrain model of altimetric precision. *European Journal of Remote Sensing*, 55(1), 263–276, (2022). Disponível em: <https://doi.org/10.1080/22797254.2022.2054028>. Acesso em: 18 out. 2023.

BORÉM, A; DE QUEIROZ, D. M; VALENTE, D. S. M; PINTO, F. de A. de C. et al. **Agricultura digital.** 2^a Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

BOROWSKI, Lukasz; KUDRYS, Jacek; KUBICKI, Bartosz; SLÁMOVÁ, Martina; MACIUK, Kamil. Phase Centre Corrections of GNSS Antennas and Their Consistency with ATX Catalogues. *Remote Sensing* 14, no. 13: 3226. (2022). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14133226>. Acesso em: 25 de fev. 2023.

BRASIL. Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 20 jun. 1984. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm. Acesso em: 10 fev. 2023.

BRASIL. Ministério da Defesa. Exército Brasileiro. Departamento de Ciência e Tecnologia. Norma da Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais de Defesa da

Força Terrestre (ET-ADGV-DefesaFT – EB80-N-72.003). 2. ed. Brasília, DF: Exército Brasileiro, 2016a.

BRASIL. Ministério da Defesa. Exército Brasileiro. Departamento de Ciência e Tecnologia. Norma da Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG – EB80-N-72.004). 1^a ed. Brasília, DF: Exército Brasileiro, 2016b.

BRASIL. Ministério da Defesa. Exército Brasileiro. Departamento de Ciência e Tecnologia. Norma da Especificação Técnica para Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais (ET-PCDG – EB80-N-72.001). 2^a ed. Brasília, DF: Exército Brasileiro, 2016c.

BUCKLEY, Simon J.; HOWELL, J.A.; ENGE, H.D.; KURZ, T.H. Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations. *Journal of the Geological Society*, v. 165, n. 3, p. 625-638, (2008). Disponível em: <https://doi.org/10.1144/0016-76492007-100>. Acesso em: 06 dez. 2024.

BUCKLEY, Simon John; HOWELL, John A.; ENGE, H.D.; LEREN, B. L. S.; KURZ, T.H. Integration of terrestrial laser scanning, digital photogrammetry and geostatistical methods for high-resolution modelling of geological outcrops. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, v. 36, p. B5, (2006). Disponível em: https://www.isprs.org/proceedings/xxxvi/part5/paper/1228_Dresden06.pdf. Acesso em: 06 dez. 2024.

BUDIHARTO, Widodo *et al.* Mapping and 3D modelling using quadrotor drone and GIS software. *Journal of Big Data*, v. 8, p. 1-12, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00436-8>. Acesso em: 22 out. 2024.

CAO, Xiaoqin; LIU, Ziming; HU, Chenlin; SONG, Xiaolong; QUAYE, Jonathan Atuquaye; LU, Ning. Three-Dimensional Geological Modelling in Earth Science Research: An In-Depth Review and Perspective Analysis. *Minerals*. v. 14, n. 7, p. 686, 2024. Acesso em: 18 de dez. (2022). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/min14070686>. Acesso em: 22 dez. 2024.

CARRIVICK, Jonathan L.; SMITH, Mark W.; QUINCEY, Duncan J. *Structure from Motion in the Geosciences*. Garsington Road, Oxford UK John Wiley & Sons, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781118895818>. Acesso em: 17 ago. 2024.

CARVALHO, Carlos Alberto Picanço; VIEIRA, Antônio José Berutti. Geração de Modelo Digital de Terreno a partir de Mapas Digitais 3D: estudo de caso visando garantir o contexto geomorfológico com redução dos dados amostrais. *Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos*, v. 9, n. 1, p. 105-119, 2003.

CHANG, Ming-Fang DONG, Wei; MANGELSON, Josué; KAESS, Michael; LUCEY, Simon. Map compressibility assessment for lidar registration. In: (2021) IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2021. p. 5560-5567. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IROS51168.2021.9636789>. Acesso em: 18 abr. 2025.

CHO, Nahye; LEE, Jungjoo; KIM, Hyundeok. A Study on the Land Change Detection and Monitoring Using High-Resolution Satellite Images and Artificial Intelligence: A Case Study of Jeongeup City. *Journal of Cadastre & Land InformatiX*, v. 53, n. 1, p. 107-121, 2023.

COLOMINA, Ismael; MOLINA, Pere. **Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review**. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, v. 92, p. 79-

97, (2014). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>. Acesso em: 28 abr. 2024.

DOS SANTOS, Afonso de Paula; MEDEIROS, Nilcilene das Graças; SANTOS, Gérson Rodrigues dos; RODRIGUES, Dalto Domigos. Controle de qualidade posicional em dados espaciais utilizando feições lineares. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 21, p. 233-250, (2015). Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1982-21702015000200013>. Acesso em: 03 dez. 2024.

DOS SANTOS, Afonso de Paula; RODRIGUES, Dalto Domigos; SANTOS, Nerilson Terra; JÚNIOR, Joel Gripp. Avaliação da Acurácia Posicional em Dados Espaciais Utilizando Técnicas de Estatística Espacial: Proposta de Método e Exemplo Utilizando a Norma Brasileira. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 22, p. 630-650, (2016). Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1982-21702016000400036>. Acesso em: 05 dez. 2024.

DE OLIVEIRA, Cléber Gonzales; PARADELLA, Waldir Renato; SILVA, Arnaldo de Queiroz da. Assessment of radargrammetric DSMs from TerraSAR-X Stripmap images in a mountainous relief area of the Amazon region. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing , v. 66, p. 67-72, (2011). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.08.008>. Acesso em: 17 set. 2024.

EL-SHEIMY, Naser; VALEO, Caterina; HABIB, Ayman. **Digital Terrain Modeling: acquisition, manipulation and applications**. London: Artech House, 526 p. 2005.

ELTNER, Anette; SOFIA, Giulia. Structure from motion photogrammetric technique. In: Developments in Earth surface processes. Elsevier, p. 1-24, (2020). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00001-1>. Acesso em: 23 nov. 2024.

FLORIN, A. F. P; GOMEZ, M. J. S; MABAQUIAO, L. C. S; RAMOS, R. V.: Feasibility study of GNSS-enabled GCP marker for control establishment for DRONE Surveying, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLVIII-4/W8-2023, 227–233, (2024). Disponível em: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W8-2023-227-2024>. Acesso em: 16 jun. 2024.

FONSECA, F. de D.; GRIPP, J.; BOTELHO, M. F.; SANTOS, A. de P. dos; NASCIMENTO, L. A.; FONSECA, A. L. B. Avaliação da qualidade posicional de dados espaciais gerados por VANT utilizando feições pontuais e lineares para aplicações cadastrais. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 23, n. 1, p. 134–149, (jan. 2017). Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1982-21702017000100009>. Acesso em: 18 fev. 2024.

GALO, Mauricio; CAMARGO, Paulo de Oliveira. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO (COBRAC), 1., 1994, Florianópolis. Anais... Florianópolis: COBRAC, 1994. Tomo II, p. 41–48.

GARCIA, Marcos Vinícius Yodono; OLIVEIRA, Henrique Cândido de. The Influence of Flight Configuration, Camera Calibration, and Ground Control Points for Digital Terrain Model and Orthomosaic Generation Using Unmanned Aerial Vehicles Imagery. **Boletim de Ciências Geodésicas**, /S. l.J, v. 27, n. 2, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1982-21702021000200015>. Acesso em: 10 fev. 2023.

GOODCHILD, Michael F. Towards Geodesign: Repurposing Cartography and GIS?. *Cartographic Perspectives*, [S. l.], n. 66, p. 7–22, (2010). Disponível em: <https://doi.org/10.14714/CP66.93>. Acesso em: 18 dez. 2024.

GOMES, Anthony de Almeida da Rocha; SILVA, Bruna Nunes da; BARROS, Bruno Alves; GIRI, Fernanda Binott; NUNES, Julio Cesar Borba; OLIVEIRA, Mariana Pedro de; ISAHIAS, Marla de Souza; RODRIGUES, Douglas de Souza. O uso de drones para mapeamento topográfico. *Revista de Gestão e Secretariado*, [S. l.], v. 15, n. 5, p. e3799, (2024). Disponível em: <https://doi.org/10.7769/gesec.v15i5.3799>. Acesso em: 16 jan. 2025.

GOMES, Francisco Carlos Moreira; ZAIDAN, Ricardo Tavares; ROCHA, Cezar Henrique Barra. Análise Comparativa entre a Aplicação de Métodos de Interpolação, para a Geração de Modelos Digitais de Elevação. *Revista Brasileira de Geografia Física – RBGF*, v.15, n.05 (2022) 2448-2462. (2022). Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2448-2462>. Acesso em: 30 abr. 2024.

GONZALO, Pajares. Overview and Current Status of Remote Sensing Applications Based on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Volume 81, Number 4, 281-330(50) pp. April 2015. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Disponível em: <https://doi.org/10.14358/PERS.81.4.281>. Acesso em: 28 abr. 2024.

GRIPP JÚNIOR, Joel. Ortoretificação de imagens de alta resolução para aplicação em cadastro técnico rural e mapeamento de áreas de preservação permanente e reservas legais. Orientador: Vicente Paulo Soares. 2009. v. 1, 151 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Ciências Florestais, Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa - MG, 2009. Disponível em: <https://poscienciaflorestal.ufv.br/wp-content/uploads/2023/05/Joel-Gripp-Junior.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2025.

GUIMARÃES, Miguel Julio Machado; SANTOS, Ítalo Emmanuel dos Anjos; MIRANDA, Isadora Benevides; DA SILVA, Anderson Santos; REZENDE, Fábio dos Anjos; BARROS, Juliane Rafaela Alves. Acurácia planimétrica de ortomosaico produzida com imagens obtidas por aeronave remotamente pilotada. *Revista Brasileira de Geomática (RBGeo)*, Curitiba, PR, v. 11, n. 2, p. 501–516, abr./jun. (2023). Disponível em: <https://doi.org/10.3895/rbgeo.v11n2.16230>. Acesso em: 21 jan. 2025.

GUTH, Peter L; NIEKERK, Adriaan Van; GROHMANN, Carlos H; MULLER, Jan-Peter; HAWKER, Laurence; FLORINSKY, Igor V; GESCH, Dean; REUTER, Hannes I; CRUZ, Virginia Herrera; RIAZANOFF, Serge; LÓPEZ-VÁZQUEZ, Carlos; CARABAJAL, Cláudia C.; ALBINET, Clément; STRBL, Pedro. Digital Elevation Models: Terminology and Definitions. *Remote Sensing*, v. 13, n. 18, p. 3581, (2021). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs13183581>. Acesso em: 18 de dez. 2022.

HERRMANN, Jörg; BOTTERO, Alejandra González. TerraSAR-X Mission: The New Generation in High Resolution Satellites. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis - SC, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 7063-7070.

HINGE, L.; GUNDORPH, J.; UJANG, U.; AZRI, S.; ANTON, F.; RAHMAN, A. Abdul. Comparative analysis of 3D photogrammetry modeling software packages for drones survey. In: **5th International Conference on Geoinformation Science**. International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019. p. 95-100. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W12-95-2019>. Acesso em: 15 ou. 2024.

HU, Dingkun; MINNER, Jennifer. UAVs and 3D City Modeling to Aid Urban Planning and Historic Preservation: A Systematic Review. *Remote Sensing*, v. 15, n. 23, p. 5507, (2023). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15235507>. Acesso em: 05 dez. 2024.

HUANG, Hongbo; YAN, Xiaoxu; ZHENG, Yaolin; ELE, Jiayu; FEI XU, Long; QIN, Dehun. Multi-view stereo algorithms based on deep learning: a survey. *Multimedia Tools and Applications*, v. 84, n. 6, p. 2877-2908, (2025). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11042-024-20464-9>. Acesso em: 17 jun. 2025.

HUPY, Joseph P.; CHANDRASKARAN, Aishwarya. Effective Use of GCP in RPA Data Acquisition and Mapping. In: Scrub Vegetation as Dynamic States of Forests-Methodologies for Learning and Research. IntechOpen, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/intechopen.114811>. Acesso em: 07 dez. 2025.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Atlas Geográfico Escolar**. 9ª ed. 239 p. Rio de Janeiro: Editora IBGE, 2020.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017. Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos Associados ao Sistema Geodésico Brasileiro. Rio de Janeiro - RJ. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/normas_levantamentos_geodesicos.pdf. Acesso em: 13 jan. 2025.

INCRA. Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária, 2018. Norma de execução nº 02, de 19 de fevereiro de 2018: dispõe sobre a utilização de aerofotogrametria no georreferenciamento de imóveis rurais. Brasília - DF. Disponível em: <https://sigef.incra.gov.br/static/documentos/NE-INCRA-DF-N-02.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2024.

IJAWARE, Victor Ayodele; NZELIBE, Ifechukwu Ugochukwu; DAVID, Micheal Deji. Accuracy Assessment of Derived Ortho-photo Using Drone-Based Survey. (2025). **Preprint (Version 1) available at Research Square**. Disponível em: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5691937/v1>. Acesso em: 17 jun. 2025.

JENSEN, John R. Issues Involving the Creation of Digital Elevation Models and Terrain Corrected Orthoimagery Using Soft-copy Photogrammetry. *Geocarto International* 10 (1): 5–21. (1995). Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10106049509354475>. Acesso em: 15 abr. 2023.

JIMÉNEZ, Sergio Iván; BUSTAMANTE, Waldo Ojeda; PABLO, Mariana de Jesús Marcial; ENCISO, Juan. Digital terrain models generated with low-cost UAV photogrammetry: methodology and accuracy. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, v. 10, n. 5, p. 285, (2021). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijgi10050285>. Acesso em: 30 dez. 2024.

JÚNIOR, Paulo de Tarso Setti; SILVA, Crislaine Menezes da; JÚNIOR, Paulo Sérgio de Oliveira; ALVES, Daniele Barroca Marra; MONICO, João Francisco Galera. Posicionamento multi-GNSS. **Journal of the Brazilian Societyt Mechanical Sciences**, p. 1200-1215, (2020). Disponível em: <https://doi.org/10.14393/revbrascartogr>. Acesso em: 03 nov. 2025.

KIM, Hanjin; HYUN, Chang Uk; DONG, Parque Hyeong; CHA, Jongmun. Image mapping accuracy evaluation using UAV with standalone, differential (RTK), and PPP GNSS positioning

techniques in an abandoned mine site. **Sensors**, v. 23, n. 13, p. 5858, (2023). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s23135858>. Acesso em: 28 dez. 2024.

KUMAR, Mohit; KISHOR, Avadh; ABAWAJY, Jemal; AGARWAL, Prabal; SINGH, Amritpal; ZOMAYA, Albert Y. RPAS: An autonomic resource provisioning and scheduling framework for cloud platforms. **IEEE Transactions on Sustainable Computing**, v. 7, n. 2, p. 386-399, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TSUSC.2021.3110245>. Acesso em: 26 dez. 2024.

KRUGER, Claudia Pereira; JÚNIOR, Paulo Sérgio de Oliveira; GARNÉS, Silvio Jacks dos Anjos; ALVES, Daniele Barroca Marra; EURÍQUES, Jorge Felipe. Posicionamento GNSS em Tempo Real: Evolução, Aplicações Práticas e Perspectivas para o Futuro. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, p. 1359-1379, (2020). Disponível em: <https://doi.org/10.14393/revbrascartogr>. Acesso em: 24 dez. 2024.

LI, Bin Bin; XIE, Huan; TONG, Xiao Hua; LIU, Shijie; JIN, Yanmin; WANG, Chao; YE, Zhen. High-accuracy laser altimetry global elevation control point dataset for satellite topographic mapping. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 60, p. 1-16, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3177026>. Acesso em: nov. de 2025.

LI, Zhilin; ZHU, Christopher; GOLD, Chris. Digital terrain modeling: principles and methodology. London: CRC PRESS, 2005. 323 p.

LI, Zhi. A comparative study of the accuracy of digital terrain models (DTMs) based on various data models. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Volume 49, Issue 1, (1994). Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0924-2716\(94\)90051-5](https://doi.org/10.1016/0924-2716(94)90051-5). Acesso em: 29 ago. 2025.

LIM, Cheolsoon; YOON, Hyojung; CHO, Sou; YOO, Chang-Sun; BYUNGWOON, Parque. Dynamic performance evaluation of various GNSS receivers and positioning modes with only one flight test. **Electronics**, v. 8, n. 12, p. 1518, (2019). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/electronics8121518>. Acesso em: 38 de nov. 2024.

LIN, Yi-Chun; CHEN, C.; HSU, C.; WU, J. Evaluating the Potential of Digital Surface Models Generated from UAV Images and Satellite Images. **Applied Sciences** (2020). 10(9), 3229.

LIN, Yi-Chun; CHENG, Yi-Ting; ZHOU, Tian; RAVI, Radhika; HASHEMINASAB, Seyyed Meghdad; FLATT, John Evan; TROY, Cary; HABIB, Ayman. Evaluation of UAV LiDAR for Mapping Coastal Environments. **Remote Sensing** 11, no. 24: 2893, (2019). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs11242893>. Acesso em: 02 fev. 2023.

LONNEVILLE, Britt; ROO, Berdien De; STAL, Cornelis; WIT, Bart De; WULF, Alain De; MAEYER, Philippe De. Accurate and cost-efficient 3D modelling using motorized hexacopter, helium balloons and photo modelling: A case study. In: Euro-Mediterranean Conference. Cham: Springer International Publishing. P. 410-417, (2014). Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-13695-0_39. Acesso em: 22 de out. 2024.

LU, Weixin; WAN, Guowei; ZHOU, Yao; FU, Xiangyu; YUAN, Pengfei; SONG, Shiyu. DeepVCP: An end-to-end Deep Neural Network for Point Cloud Registration. In: International IEEE/CVF Conference on Computer Vision (ICCV). 2019. p.12-21, Seoul. Proceedings... Piscataway: IEEE, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.00010>. Acesso em: 01 jun. 2025.

LUNARDI, O. A.; PENHA, A. de L. T. da P.; CERQUEIRA, R. W. de. O Exército Brasileiro e os Padrões de Dados Geoespaciais para a INDE. In: IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Anais... Recife, 06-09 maio 2012.

LUTHER, Alexander; GEIST, Michael; FLUEGGE, Wilko. Trimming tensor product surfaces generated from point cloud data using B-spline interpolated concave hulls. In: CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS 2024), 57th., (2024), Anais eletrônicos [...] Germany: Salute, 2024. p. 1844-1849. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.326>. Acesso em: 06 mai 2024.

MANDLBURGER, Gottfried; PFENNIGBAUER, Martin; SCHWARZ, Roland; FLORY, Sebastião; NUSSBAUMER, Lukas. Concept and performance evaluation of a novel UAV-borne topo-bathymetric LiDAR sensor. **Remote Sensing**, v. 12, n. 6, p. 986, (2020). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12060986>. Acesso em: 19 abr. 2024.

MARRA JUNIOR, Antonio Carlos. **Modelagem digital do terreno (MDT) estudo da metodologia e aplicações em projetos de engenharia rural**. 2003. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003. Disponível em: <http://doi:10.11606/D.11.2019.tde-20191218-180749>. Acesso em: 16 de jan. de 2025.

MCCORMAC, J; DAVIS, W; SARASUA, W. **Topografia**. 6^a edição. Rio de Janeiro – RJ: LTC, 2016.

MESA-MINGORANCE, José L; ARIZA-LÓPEZ, Francisco J. Accuracy assessment of digital elevation models (DEMs): A critical review of practices of the past three decades. **Remote Sensing**, v. 12, n. 16, p. 2630, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12162630>. Acesso em: 22 abr. 2024.

MILLER, Charles Leslie; LAFLAMME, Robert Arthur. The Digital Terrain Model – Theory and Application. **Photogrammetric Engineering**. v. 24, n. 3, p. 433-442. 1958.

MILLS, Jon P.; BUCKLEY, Simon J.; MITCHELL, Harvey L. Synergistic Fusion of GPS and Photogrammetrically Generated Elevation Models. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Vol. 69, No. 4, April 2003, pp. 341–349. Disponível em: <https://doi.org/10.14358/PERS.69.4.341>. Acesso em: 01 dez. 2024.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS. Descrição, fundamentos e aplicações**. 2^a ed. 480 p. São Paulo: Editora UNESP, 2008.

NADI, Saeed; SHOJAEI, Davood; GHIASI, Yusof. Accuracy assessment of DEMs in different topographic complexity based on an optimum number of GCP formulation and error propagation analysis. **Journal of Surveying Engineering**, v. 146, n. 1, (2019). DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000296. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000296](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000296). Acesso em: 01 dez. 2024.

NEX, Francesco; REMONDINO, Fabio. UAV for 3D mapping applications: a review. **Applied Geomatics**, v. 6, p. 1–15, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>. Acesso em: 13 ago. 2023.

NORDIN, Nor Azme; MUSTAPA, Noraishah; SATAR, Asiah Abdul. Ability of RTK-based GPS measurement method in high accuracy work in geomatics study. *Asian Journal of University Education*, v. 17, n. 4, p. 60–70, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.24191/ajue.v17i4.16212>. Acesso em: 13 fev. 2025.

OLIVEIRA, Diondetson Rocha de; CICERELLI, Rejane Ennes; ALMEIDA, Tati de; MAROTTA, Giuliano Sant'Anna. Geração de modelo digital do terreno a partir de imagens obtidas por veículo aéreo não tripulado. *Revista Brasileira de Cartografia, Brasil*, vol.69, n.6, 1143-1151, (2017). Disponível em: <https://doi.org/10.14393/rbcv69n6-44316>. Acesso em: 30 ago. 2024.

ONIGA, Valeria Ersilia; BREABAN, Ana Ioana; STATESCU, Florian. Determining the optimum number of ground control points for obtaining high precision results based on UAS images. In: Proceedings. Mdpi, 2018. p. 352. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ecrs-2-05165>. Acesso em: 30 ago. 2024.

PADRÓ, Joan Cristian; MUÑOZ, Francisco Javier; PLANO, Jordi; PONS, Xavier. Comparison of four UAV georeferencing methods for environmental monitoring purposes focusing on the combined use with airborne and satellite remote sensing platforms. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, v. 75, p. 130-140, (2019). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.10.018>. Acesso em: 29 ago. 2024.

PEDREIRA, Wallace John Pereira; OLIVEIRA, Joaquito Andrade de; SANTOS, Pablo Santana. Avaliação da acurácia altimétrica usando a tecnologia VANT. *Rev. Caminhos Geogr*, v. 21, p. 209-222, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/RCG217348071>. Acesso em: 15 nov. de 2025.

PINA, P.; VIEIRA, G. **UAVs for science in Antarctica**. *Remote Sensing*. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/7/1610>. Acesso em: 07 mar. 2023.

PRASAD, J. R.; VIDHATE, A.; PATIYAT, D.; PATIL, K. Review of Advanced Image Processing Techniques: Digital Elevation Model. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*. Vol. 10. ISUUE VI, June (2022). DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.44422>. Acesso em: 23 abr. 2023.

QUAMAR, Md Muzakkir; AL-RAMADAN, Baqer; KHAN, Khalid; SHAFIULLAH, Md; EL FERIK, Sami. Advancements and applications of drone-integrated geographic information system technology — A review. *Remote Sensing*, v. 15, n. 20, p. 5039, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15205039>. Acesso em: 19 ago. 2024.

ROFATTO, Vinicius Francisco; MATSUOKA, Marcelo Tomio; KLEIN, Ivandro. **Precisão, veracidade e acurácia: sobre erros e incertezas**. *Revista Brasileira de Cartografia*, [S.l.], v. 77, n. esp., 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv77n0a-74914>. Acesso em: 28 abr. 2025.

SANTANA, Sheyla; MOURA, Ana Clara Mourão; ZYNGIER, Camila. The trends of geotechnology to support urban planning: New paradigms and challenges. *Journal of Earth Science and Engineering* v. 3 p. 484-496. (2013).

SANTOS, Daniel Rodrigues dos; OLIVEIRA, Henrique Cândido de. Princípios de aquisição e processamento de dados espaciais. 1^a edição, 366 p. São Paulo - SP: Blucher, 2022.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos; JACOMINE, Paulo Klinger Tito; ANJOS, Lúcia Helena Cunha dos; OLIVEIRA, Virlei Álvaro de; LUMBRERAS, José Francisco; COELHO, Maurício Rizzato; ALMEIDA, Jaime Antônio de; ARAÚJO FILHO, José Coelho de; OLIVEIRA, João Bertoldo de; CUNHA, Tony Jarbas Ferreira; EMBRAPA SOLOS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5th ed. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.agroapi.cnptia.embrapa.br/portal/assets/docs/SiBCS-2018-ISBN-> Acesso em: 30 mai. 2023.

SEITZ, Steven M. *et al.* A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. In: 2006 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition (CVPR'06). IEEE, (2006). p. 519-528. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/CVPR.2006.19>. Acesso em: 02 jun. 2025.

SHAN, Jie; LI, Zhixin; LERCE, Damon; TISSUE, Kevan; HUPY, Joseph; CARPENTER, Joshua. Democratizing photogrammetry: an accuracy perspective. *Geo-spatial Information Science*, v. 26, n. 2, p. 175–188, (2023). DOI: 10.1080/10095020.2023.2178336. Disponível em: <https://doi.org/10.37134/ajatel.vol13.2.2.2023>. Acesso em: 13 nov. 2025.

SILVA, Andréa Oliveira da; FERNANDES, Ricardo Augusto Souza. Smart governance based on multipurpose territorial cadastre and geographic information system: Ananalysis of geoinformation, transparency and collaborative participation for Brazilian capitals, *Science direct*. v. 97, (2020). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104752>. Acesso em: 13 jun. 2025.

SILVA, Elton John Robaina da; RANGEL, Maysa Pontes; CAMPOS, Priscila Celebrini de Oliveira. Análise altimétrica de baixo custo para projeto básico em levantamento geométrico de rodovia existente. **34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte – ANPET**. Rio de Janeiro – RJ, p. 2684-2691, 2020.

SILVA, I da; SEGANTINE, P. C. L. **Topografia para Engenharia – Teoria e prática de Geomática**. 2ª edição. Rio de Janeiro – RJ: LTC, 2023.

SIMÕES, Silvio Jorge Coelho; ANDRADE, Márcio Roberto Magalhães; MENDES, Tatiana Sussel Gonçalves; MENDES, Rodolfo Moreda; GOMES, Luciene; BORTOLOZO, Cassiano Antonio. Modelagem 3D e geovisualização aplicada a desastres naturais. Uma proposta de laboratório de ensino e pesquisa para monitoramento e previsão de escorregamentos. **Terrae Didatica**, Campinas, SP, v. 15, p. e019024, 2019. DOI: 10.20396/td.v15i0.8654053. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/td.v15i0.8654053>. Acesso em: 28 dez. 2024.

SIQUEIRA, Henrique Lopes; JUNIOR, José Marcato; MATSUBARA, Edson Takashi; COLARES, Reinaldo Almeida e SANTOS, Fabio Martins. Acurácia de Produtos Fotogramétricos Gerados com Aeronave Remotamente Pilotada em Relevo Acidentado. **Revista Brasileira de Cartografia**, vol. 72, nº 3, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/revbrascartogr>. Acesso em: 29 ago. de 2024.

SMITH, Mark William; CARRIVICK, Jonathan L.; QUINCEY, Duncan J. Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in physical geography*, v. 40, n. 2, p. 247-275, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0309133315615805>. Acesso em: 13 jan. 2024.

SOUZA, G. C. **Análise de metodologias no levantamento de dados espaciais para cadastro urbano.** 2001. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

TEIXEIRA, Niel Nascimento; PAULO, Adriano; JÚNIOR, Dionísio Costa Cruz. Gestão urbana: avaliação do desempenho da técnica de Posicionamento GNSS RTK. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 14, nº 7, p. 11345-11370, (2023). Disponível em: <https://doi.org/10.7769/gesec.v14i7.2287>. Acesso em: 16 nov. 2024.

TEIXEIRA, Niel Nascimento; LIMA, Cleverson Alves de; SANTOS, Marcelo Soares Teles; JÚNIOR, Dionísio Costa Cruz; SANTOS, Alana Luiza de Oliveira; SABINO, Bianka Georgina Martineli. Avaliação da acurácia altimétrica em levantamentos topográficos urbanos com aeronaves remotamente pilotadas. **Revista De Gestão E Secretariado**, v. 14, n. 12, p. 21403-21430, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.7769/gesec.v14i12.3109>. Acesso em: 03 nov. de 2025.

VALENTE, Domingos Sárvio Magalhães; ABDUL, Momin; GRIFIT, Tony; HANSEN, Alan. Accuracy and precision evaluation of two low-cost RTK global navigation satellite systems. **Computers and electronics in agriculture**, v. 168, p. 105142, (2020). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105142>. Acesso em: 07 dez. 2025.

WANG, Yinsong; ZOU, Yajie; HENRICKSON Kristian; WANG, Yinhai; TANG, Jinjun.: Google Earth elevation data extraction and accuracy assessment for transportation applications. **PLOS ONE** 12(4): e0175756, (2017). Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175756>. Acesso em: 05 nov. 2024.

WESTOBY, Matthew J. *et al.* ‘Structure-from-Motion’ Photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300-314, (2012). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>. Acesso em: 15 jun. 2025.

YANG, Heng; SHI, Jingnan; CARLONE, Luca. Teaser: Fast and certifiable point cloud registration. **IEEE Transactions on Robotics**, v. 37, n. 2, p. 314-333, (2020). Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TRO.2020.3033695>. Acesso em: 01 jul. 2025.

YAO, Huang; QIN, Rongjun; CHEN, Xiaoyu. **Unmanned Aerial Vehicle for Remote Sensing Applications — A Review.** **Remote Sensing** 11, nº. 12: 1443. (2019). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs11121443>. Acesso em: 28 abr. 2024.

YASYUKEVICH, Yury V.; ZHANG, Baocheng; DEVANABOYINA, Venkata Ratnam. Advances in GNSS positioning and GNSS remote sensing. **Sensors**, v. 24, n. 4, p. 1200, (2024). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s24041200>. Acesso em: 27 dez. 2024.

YURTSEVEN, Huseyin. Comparison of GNSS-TLS-and different altitude UAV-generated datasets on the basis of spatial differences. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 4, p. 175, (2019). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijgi8040175>. Acesso em: 20 dez. 2024.

ZANETTI, Juliette; JUNIOR, Joel Gripp; DOS SANTOS, Afonso de Paula. Influência do número e distribuição de pontos de controle em ortofotos geradas a partir de um levantamento por VANT. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 2, p. 263-277, (2017). Disponível em: <https://doi.org/10.14393/rbcv69n2-44016>. Acesso em: 10 nov. 2025.

ZHANG, Z; ZHU, L. A Review on Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing: Platforms, Sensors, Data Processing Methods, and Applications. *Drones*, 7(6), 398, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/drones7060398>. Acesso em: 30 ago. 2024.