



MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO
CENTRO DE INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO EM HIDROGRAFIA PARA OFICIAIS

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL COM O USO DO POSICIONAMENTO CINÉMÁTICO PÓS-PROCESSADO (PPK) APLICADO À AEROFOTOGRAMETRIA DIGITAL
ASSOCIADO A TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO MODERNAS

2º Ten. BRUNO de Mendonça PACHECO

Orientadora: Primeiro-Tenente (RM2-EN) MARCELLA Fernandes de Oliveira Melo

Niterói-RJ, Brasil
Outubro, 2025

Bruno de Mendonça Pacheco

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL COM O USO DO POSICIONAMENTO CINÉMÁTICO PÓS-PROCESSADO (PPK) APLICADO À AEROFOTOGRAMETRIA DIGITAL
ASSOCIADO A TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO MODERNAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao corpo docente e técnico do Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino da Marinha do Brasil (CIAARA/MB), como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Oficial Hidrógrafo.

Orientadora: Primeiro-Tenente (RM2-EN) Marcella Fernandes de Oliveira Melo

Niterói – RJ
Outubro, 2025

Pacheco, Bruno de Mendonça

Avaliação da acurácia posicional com o uso do posicionamento cinemático pós-processado (PPK) aplicado à aerofotogrametria digital associado a técnicas de processamento modernas / Bruno de Mendonça Pacheco. – Rio de Janeiro: MB/CIAARA, 2025.

xii, 35 f.: il. Color.; 29,7 cm.

Orientador: Marcella Fernandes de Oliveira Melo.

Monografia – MB/CIAARA Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais, 2025.

Referências Bibliográficas: p. 45-47.

1. Aerofotogrametria digital. 2. Posicionamento Cinemático Pós-Processado (PPK). 3. Erro Quadrático Médio (RMSE).

I. Melo, Marcella Fernandes de Oliveira. II. Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino, CIAARA, Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais. III. Avaliação da acurácia posicional com o uso do posicionamento cinemático pós-processado (PPK) aplicado à aerofotogrametria digital associado a técnicas de processamento modernas CDD: 526

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL COM O USO DO POSICIONAMENTO CINEMÁTICO PÓS-PROCESSADO (PPK) APLICADO À AEROFOTOGRAMETRIA DIGITAL ASSOCIADO A TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO MODERNAS

Bruno de Mendonça Pacheco

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE TÉCNICO DO CENTRO DE INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO DA MARINHA DO BRASIL (CIAARA/MB) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE OFICIAL HIDRÓGRAFO.

Examinada por:

1T (RM2-EN) MARCELLA Fernandes de Oliveira
Melo, M.Sc.

CT (EN) EDICO Ramon de Melo, M.Sc.

CMG (RM1) Heraldo Soares CALDEIRA, M.Sc.

NITERÓI, RJ – BRASIL
OUTUBRO DE 2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, motivo único e suficiente da minha existência, quem me permitiu chegar até aqui. Agradeço à Santa Virgem Maria, Mãe de Deus e minha, cujas intercessões me sustentaram nos momentos mais difíceis da minha vida.

A minha família, parte fundamental na minha história, a qual lançou as bases para formar quem sou hoje. Gratidão especial a minha mãe, Eliane, aquela que para mim sempre foi referência de tantas virtudes, e que neste ano prestou-me inúmeros auxílios, tornando mais possível a conclusão deste curso.

A minha noiva, Dailane, aquela que, com paciência incansável, sempre suportou as excessivas ausências e privações de tempo que essa carreira me impôs, jamais deixando faltar o carinho e a compreensão.

A minha orientadora, 1T Marcella, cuja colaboração e dedicação estiveram presentes desde o início desse trabalho, sem as quais a conclusão dele não seria possível.

Ao CT Edico, que se mostrou disponível desde o início a ajudar e a transmitir conhecimentos.

Ao professor Júlio Di Paola, que com paciência e atenção marcantes, transmitiu-me conhecimentos preciosos acerca do tema desse trabalho, facilitando muito minha caminhada até aqui.

Não poderia deixar de expressar aqui minha gratidão à turma do CAHO de 2025, a mais unida das que já fiz parte. Aprendi muito com as pequenas atitudes diárias de espírito de corpo e colaboração mútua de cada um de vocês. Desde o primeiro dia de aula na presença de vocês, eu já soube que estava no lugar certo.

Agradeço a todos os mestres e oficiais pelos ensinamentos prestados dentro e fora de sala de aula, que formam as bases para a carreira de Oficial Hidrógrafo.

Enfim, agradeço a todos aqueles que não foram citados até aqui, mas que de alguma forma contribuíram com a minha trajetória neste ano.

Muito obrigado.

RESUMO

A avaliação da acurácia posicional em levantamentos aerofotogramétricos é fundamental para garantir a confiabilidade de produtos cartográficos utilizados em engenharia, geociências e monitoramento ambiental. Esta monografia investiga o uso do Posicionamento Cinemático Pós-Processado (PPK) aplicado à aerofotogrametria digital, associado a técnicas modernas de processamento de imagens. O principal objetivo deste trabalho foi analisar a acurácia posicional planimétrica obtida em ortofotos geradas a partir de um voo realizado com aeronave remotamente pilotada (ARP), comparando as coordenadas de pontos coletados em campo com receptor GNSS geodésico aos valores extraídos dos produtos processados. Para tanto, foram utilizados pontos de controle e de verificação distribuídos na área de estudo, cujas coordenadas foram determinadas via PPP no serviço online do IBGE. As imagens aéreas, por sua vez, foram processadas em *softwares* especializados, como Agisoft Metashape, seguindo etapas de alinhamento, otimização de câmeras e geração de ortofotos. A acurácia foi avaliada pelo cálculo do Erro Quadrático Médio (RMSE) nos eixos planimétricos e confrontada com padrões internacionais de exatidão cartográfica. Os resultados indicaram que a integração do GNSS utilizando o método PPK à aerofotogrametria digital contribui para a redução significativa dos erros posicionais, garantindo compatibilidade com exigências normativas e elevando a confiabilidade dos produtos gerados. O estudo demonstra, assim, a eficiência do PPK como alternativa viável para projetos que demandam alta precisão posicional, ao mesmo tempo em que reduz a dependência de grandes quantidades de pontos de apoio coletados em campo.

Palavras-chave: aerofotogrametria digital; posicionamento cinemático pós-processado (PPK); acurácia posicional; pontos de controle; RMSE.

ABSTRACT

The evaluation of positional accuracy in photogrammetric surveys is essential to ensure the reliability of cartographic products used in engineering, geosciences, and environmental monitoring. This monograph investigates the use of Post-Processed Kinematic (PPK) positioning applied to digital aerial photogrammetry, combined with modern image processing techniques. The main objective was to analyze the planimetric positional accuracy of orthophotos generated from a flight conducted with a remotely piloted aircraft (RPA), by comparing the coordinates of points collected in the field with a geodetic GNSS receiver to the values extracted from the processed products. Control and check points distributed across the study area were used, with their coordinates determined via PPP on the IBGE online service. The aerial images were processed using specialized software, such as Agisoft Metashape, following steps of alignment, camera optimization, and orthophoto generation. Accuracy was assessed through the calculation of the Root Mean Square Error (RMSE) in the planimetric axes and compared with international cartographic accuracy standards. The results indicated that integrating the PPK method into the digital photogrammetry workflow significantly reduces positional errors, ensuring compliance with normative requirements and increasing the reliability of the final products. Thus, the study demonstrates the efficiency of PPK as a viable alternative for projects requiring high positional accuracy, while reducing dependence on large quantities of field-collected control points.

Keywords: digital photogrammetry; post-processed kinematic positioning (PPK); positional accuracy; control points; RMSE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Condomínio Netuno	17
Figura 2 - Localização dos 13 pontos na área do levantamento	19
Figura 3 - Foto do Ponto 01	21
Figura 4 - Coordenadas do Ponto 01.....	21
Figura 5 - Foto do Ponto 02	22
Figura 6 - Coordenadas do Ponto 02.....	22
Figura 7 - Foto do Ponto 03	23
Figura 8 - Coordenadas do Ponto 03.....	23
Figura 9 - Foto do Ponto 04	24
Figura 10 - Coordenadas do Ponto 04.....	24
Figura 11 - Foto do Ponto 05	25
Figura 12 - Coordenadas do Ponto 05.....	25
Figura 13 - Foto do Ponto 06	26
Figura 14 - Coordenadas do Ponto 06.....	26
Figura 15 - Foto do Ponto 07	27
Figura 16 - Coordenadas do Ponto 07.....	27
Figura 17 - Foto do Ponto 08	28
Figura 18 - Coordenadas do Ponto 08.....	28
Figura 19 - Foto do Ponto 09	29
Figura 20 - Coordenadas do Ponto 09.....	29
Figura 21 - Foto do Ponto 10	30
Figura 22 - Coordenadas do Ponto 10.....	30
Figura 23 - Foto do Ponto 11	31
Figura 24 - Coordenadas do Ponto 11.....	31
Figura 25 - Foto do Ponto 12	32
Figura 26 - Coordenadas do Ponto 12.....	32
Figura 27 - Foto do Ponto 13	33
Figura 28 - Coordenadas do Ponto 13.....	33
Figura 29 - Drone com PPK: DJI Mavic 2 Pro PPK.....	34
Figura 30 – Receptor GNSS Emlid Reach RS2.....	35
Figura 31 - Receptor GNSS Emlid Reach RS3	35

Figura 32 - Ortofoto PPK.....	37
Figura 33 - Ortofoto Pontos de Controle	38
Figura 34 - Coordenadas dos Pontos de Verificação extraídas da Ortofoto PPK no QGIS	39
Figura 35 - Coordenadas dos Pontos de Verificação extraídas da Ortofoto PC no QGIS	39
Figura 36 - Erros planimétricos por Pontos de Verificação.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Alturas das antenas e horários de rastreamento de cada ponto	21
Tabela 2 - Coordenadas dos Pontos de Verificação obtidas pelo PPP IBGE e nas ortofotos pelo QGIS	40
Tabela 3 - Diferenças das coordenadas do drone para o PPP IBGE e cálculo do erro planimétrico do drone	40
Tabela 4 - Diferenças das coordenadas do receptor GNSS para o PPP IBGE e cálculo do erro planimétrico do receptor GNSS	41
Tabela 5 - Erro Quadrático Médio e outras métricas	41
Tabela 6 - Ranking dos erros por Pontos de Verificação.....	41
Tabela 7 - Tabela-Resumo com Erro Quadrático Médio e outras métricas.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
CAA	Centro de Análise e Apoio
CIAARA	Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino
CDD	Classificação Decimal de Dewey
CM	Câmera Métrica
DEM	Digital Elevation Model (Modelo Digital de Elevação)
DSM	Digital Surface Model (Modelo Digital de Superfície)
DTM	Digital Terrain Model (Modelo Digital de Terreno)
EM	Erro Máximo
EM(p)	Erro Máximo Planimétrico
EM(a)	Erro Máximo Altimétrico
GCP	Ground Control Point (Ponto de Controle)
GNSS	Global Navigation Satellite System (Sistema Global de Navegação por Satélite)
GSD	Ground Sample Distance (Distância de Amostragem do Terreno)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBGE-PPP	Serviço de Posicionamento por Ponto Preciso do IBGE
PC	Ponto de Controle
PPP	Precise Point Positioning (Posicionamento por Ponto Preciso)
PPK	Post-Processed Kinematic (Posicionamento Cinemático Pós-Processado)
PV	Ponto de Verificação
RMSE	Root Mean Square Error (Erro Médio Quadrático)
RTK	Real Time Kinematic (Posicionamento Cinemático em Tempo Real)
SGM	Semi-Global Matching
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SIRGAS2000	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SfM	Structure from Motion
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UTM	Universal Transverse Mercator (Projeção Universal Transversa de Mercator)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.	OBJETIVOS	16
3	METODOLOGIA.....	17
3.1	PLANEJAMENTO DO LEVANTAMENTO.....	17
3.2	EXECUÇÃO DE CAMPO.....	18
3.3	PÓS-PROCESAMENTO DOS DADOS	20
3.4	INSTRUMENTAÇÃO E SOFTWARES UTILIZADOS	34
3.5	GERAÇÃO DAS ORTOFOTOS E EXTRAÇÃO DAS COORDENADAS	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	CONSOLIDAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS DADOS.....	40
4.2	ERROS POSICIONAIS POR PONTO DE VERIFICAÇÃO	42
4.3	AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA.....	43
4.4	DISCUSSÃO QUALITATIVA DOS RESULTADOS.....	43
5	CONCLUSÃO.....	44
6	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

A constante evolução das tecnologias de sensoriamento remoto, *Global Navigation Satellite System* (GNSS, Sistema Global de Navegação por Satélite) e processamento de imagens digitais transformou significativamente a prática da aerofotogrametria. O surgimento de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), aliados a sensores de alta resolução e softwares avançados de reconstrução tridimensional, tornou os levantamentos aerofotogramétricos mais acessíveis, rápidos e precisos.

A aerofotogrametria, definida como a técnica de obtenção de informações métricas da superfície terrestre a partir de imagens aéreas, consolidou-se como ferramenta essencial em aplicações de engenharia, gestão ambiental, agricultura de precisão e planejamento urbano (WOLF; DEWITT, 2000). Desde as primeiras imagens aéreas obtidas no século XIX, a evolução tecnológica ampliou as possibilidades de uso da aerofotogrametria, culminando em métodos modernos como o Structure from Motion (SfM) e algoritmos de correlação automática de imagens, como o Semi-Global Matching (SGM) (JAMES; ROBSON; SMITH, 2020).

Apesar dos avanços, muitos projetos ainda dependem da implantação de Pontos de Controle em Solo (PCs) para garantir a acurácia posicional dos produtos gerados. Este procedimento, embora eficaz, pode elevar os custos operacionais e ampliar o tempo de execução dos levantamentos, além de ser inviável em áreas de difícil acesso. A técnica de *Post-Processed Kinematic* (PPK, Posicionamento Cinemático Pós-Processado) surge como alternativa, oferecendo a possibilidade de obter alta precisão posicional sem a necessidade de comunicação contínua em tempo real com a estação base (ELING et al., 2015), como ocorre com a tecnologia RTK, por exemplo.

Considerando o crescente interesse por métodos que proporcionem ganhos em eficiência e redução de custos, torna-se relevante investigar se a utilização do PPK pode substituir o uso tradicional de PCs sem comprometer a qualidade dos produtos cartográficos. Tal análise contribui diretamente para a modernização dos procedimentos na aerofotogrametria digital, além de possibilitar a produção de produtos cartográficos de alta precisão, como ortofotomosaicos aplicáveis à atualização de cartas náuticas, impactando positivamente na segurança da navegação.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1.1 AEROFOTOGRAMETRIA DIGITAL

Anteriormente realizada com câmeras analógicas e processos manuais, a aerofotogrametria evoluiu com a adoção de sensores digitais, marcando o início da aerofotogrametria digital (LUHMANN et al., 2014). O uso de sensores digitais, embarcados em aeronaves tripuladas ou Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), trouxe avanços significativos, permitindo maior precisão na captura de imagens e automatização das etapas de navegação e processamento. Esses sensores, integrados a sistemas de Navegação Global por Satélite (GNSS) e Unidades de Medição Inercial (IMU), possibilitam o registro simultâneo de posição e orientação da câmera no momento da captura, otimizando o georreferenciamento dos produtos fotogramétricos (REMONDINO; FRASER, 2006).

De acordo com Kraus (1997), a digitalização da fotogrametria não apenas acelerou o processamento e melhorou a qualidade dos produtos gerados, mas também reduziu significativamente os custos operacionais, tornando levantamentos de alta precisão mais acessíveis.

1.1.2 INTEGRAÇÃO GNSS E FOTOGRAFETRIA

A integração de dados GNSS aos sistemas de aquisição de imagens representa um dos avanços mais relevantes na aerofotogrametria digital moderna. O GNSS (*Global Navigation Satellite System*) consiste em constelações de satélites que fornecem informações de posicionamento e tempo a receptores em qualquer local do globo (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; COLLINS, 2001). Com a utilização de receptores GNSS embarcados, é possível registrar as coordenadas da câmera no momento exato da captura, otimizando a etapa de aerotriangulação e reduzindo, ou mesmo eliminando, a necessidade de uma grande quantidade de Pontos de Controle em Solo (PCs) (COLOMINA; MOLINA, 2014). No entanto, como destacam Fraser e Hanley (2003), a precisão final dos produtos fotogramétricos ainda depende diretamente da qualidade dos dados GNSS obtidos e das técnicas de correção aplicadas.

1.1.3 POSICIONAMENTO CINEMÁTICO PÓS-PROCESSADO (PPK) E POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO (PPP)

O Posicionamento Cinemático Pós-Processado (PPK) é uma técnica de correção de dados GNSS na qual os dados são registrados durante a operação, como o voo de um VANT, e

posteriormente corrigidos com base nos registros simultâneos de uma estação base fixa (GREJNER-BEZEK; MUNJAL, 2015). Em comparação ao *Real-Time Kinematic* (RTK, Posicionamento Cinemático em Tempo Real), o PPK oferece vantagens como maior robustez em áreas com dificuldades de comunicação e menor dependência de links de rádio ou internet, embora exija a etapa adicional de pós-processamento (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008). De acordo com Gini et al. (2014), essa abordagem é especialmente eficiente para levantamentos em regiões remotas, garantindo alta acurácia posicional mesmo em condições adversas.

Além disso, o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) é um método que permite obter coordenadas absolutas de pontos no solo a partir de observações GNSS brutas, sem necessidade de estação base local, utilizando efemérides precisas e correções fornecidas por serviços internacionais de rastreamento de satélites. No Brasil, o IBGE disponibiliza uma plataforma online de PPP, a qual fornece coordenadas de referência em SIRGAS2000, projeção UTM, fuso 23S, utilizadas para georreferenciamento e validação de produtos fotogramétricos (IBGE, 2022).

1.1.4 PONTOS DE CONTROLE E PONTOS DE VERIFICAÇÃO

Mesmo com os avanços do PPK e do RTK, os Pontos de Controle (PCs) permanecem essenciais para assegurar a acurácia dos produtos fotogramétricos, sendo suas coordenadas obtidas com alta precisão por receptores GNSS de dupla frequência ou métodos geodésicos tradicionais (ASPRS, 2015). Paralelamente, os Pontos de Verificação (PVs) são empregados exclusivamente para validar os produtos gerados, sem influenciar o ajuste dos modelos, assegurando uma análise imparcial da acurácia (FGDC, 1998; ASPRS, 2014). A ASPRS (2015) recomenda que os PVs sejam bem distribuídos sobre a área de estudo e que a avaliação utilize métricas como o *Root Mean Square Error* (RMSE, Erro Quadrático Médio) para as componentes planimétricas e altimétricas.

1.1.5 TÉCNICAS AVANÇADAS DE PROCESSAMENTO: SFM e SGM

O *Structure from Motion* (SfM) revolucionou a fotogrametria moderna ao possibilitar a reconstrução tridimensional de objetos e superfícies a partir de múltiplas imagens bidimensionais, sem a necessidade de informações prévias de orientação (WESTOBY et al., 2012). Sua principal vantagem é a geração automatizada de nuvens de pontos densas e detalhadas, tornando acessíveis levantamentos de alta precisão (SMITH; VERICA, 2016). Complementando o SfM, o algoritmo *Semi-Global*

Matching (SGM) propicia a criação de modelos digitais de superfície a partir da correspondência estéreo de imagens, combinando alta densidade de pontos com boa acurácia, especialmente em terrenos complexos (HIRSCHMÜLLER, 2008).

1.1.6 AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL

A avaliação da acurácia posicional constitui uma etapa fundamental na validação de produtos fotogramétricos, assegurando sua conformidade com os padrões cartográficos estabelecidos. Segundo a ASPRS (2015), acurácia refere-se ao grau de proximidade entre um valor mensurado e o seu valor verdadeiro. Uma das métricas mais utilizadas é o Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square Error* – RMSE), que quantifica os desvios entre coordenadas observadas e valores de referência. O RMSE é calculado pela raiz quadrada da média dos quadrados dos resíduos e pode ser aplicado às componentes planimétrica (X, Y) e altimétrica (Z) (FGDC, 1998; ASPRS, 2015).

A fórmula geral para um eixo é:

$$RMSE = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n} \right]} \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

- \hat{y}_i representa os valores estimados ou observados;
- y_i corresponde às coordenadas de referência;
- n é o número de observações.

A fórmula para os dois eixos:

$$RMSE = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{x}_i - x_i) + (\hat{y}_i - y_i)^2}{n} \right]} \quad (\text{Equação 2})$$

Para a avaliação planimétrica, combina-se os desvios em X e Y, obtendo-se o RMSE planimétrico, que consolida a acurácia bidimensional em uma única métrica. Valores de RMSE na ordem de

centímetros são considerados de alta precisão, adequados para aplicações em engenharia, mapeamento urbano e agricultura de precisão (ASPRS, 2015).

O uso de RMSE associado a Pontos de Verificação (PVs) independentes permite comparar métodos de georreferenciamento, como PCs e PPK, de forma objetiva e confiável.

1.1.7 SÍNTESE E CONEXÃO COM O ESTUDO

Dessa forma, os conceitos de aerofotogrametria digital, integração GNSS, PPK, SfM/SGM, Pontos de Controle e Verificação, e métricas de avaliação de acurácia fundamentam a comparação entre métodos de georreferenciamento. Este referencial teórico sustenta a metodologia adotada no TCC, permitindo avaliar tanto a precisão posicional dos ortofotomosaicos quanto a eficiência operacional das abordagens com PCs ou PPK.

2. OBJETIVOS

- (a) Geral: Avaliar a acurácia posicional de produtos aerofotogramétricos obtidos a partir do uso da técnica de PPK em comparação aos produtos gerados com a utilização de PCs, analisando o impacto na qualidade cartográfica e na eficiência operacional.
- (b) Específicos:
 1. Planejar e executar um aerolevantamento fotogramétrico utilizando VANT equipado com sistema GNSS embarcado;
 2. Realizar o levantamento de PCs e PVs em campo, utilizando receptores GNSS de alta precisão;
 3. Processar e gerar ortofotomosaicos utilizando duas metodologias distintas de georreferenciamento: (i) com apoio de PCs; e (ii) com aplicação exclusiva do PPK;
 4. Analisar e comparar a acurácia posicional dos ortofotomosaicos gerados, com base nos PVs;
 5. Avaliar a relação entre a qualidade dos produtos gerados e o tempo de execução de cada metodologia.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento desse Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi estruturado em quatro etapas principais, a saber: (1) planejamento do levantamento, (2) execução de campo, (3) pós-processamento, e (4) instrumentação e softwares utilizados. Cada etapa é detalhada a seguir:

3.1 PLANEJAMENTO DO LEVANTAMENTO

O planejamento teve como objetivo garantir a execução eficiente do aerolevantamento e a confiabilidade dos produtos fotogramétricos. Foram realizadas as seguintes atividades:

3.1.1 DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A etapa prática deste trabalho foi conduzida no Condomínio Netuno (Figura 1), situado dentro do Complexo Naval da Ponta da Armação, em Niterói (RJ). A área foi definida considerando a disponibilidade de infraestrutura adequada e a possibilidade de executar um levantamento fotogramétrico em ambiente controlado, garantindo maior segurança operacional e confiabilidade dos dados.

Figura 1 - Condomínio Netuno



Fonte: Google Earth (2025)

3.1.2 ELABORAÇÃO DO PLANO DE VOO

Definiu-se uma altura de voo de 120 metros, velocidade adequada para a captura das imagens, sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 60%, garantindo cobertura completa da área de interesse e qualidade satisfatória para o processamento fotogramétrico.

3.1.3 DESCRIÇÃO DO VANT

Foi utilizado o drone DJI Mavic 2 Pro equipado com sistema GNSS de precisão (ou de dupla frequência) embarcado, permitindo aquisição simultânea de imagens aéreas e dados de posicionamento para processamento PPK.

3.1.4 DEFINIÇÃO DE EQUIPAMENTOS GEODÉSICOS

Foram definidos os instrumentos para o levantamento dos Pontos de Controle (PCs) e Pontos de Verificação (PVs) em campo, etapas fundamentais para o georreferenciamento e validação dos produtos. Utilizaram-se receptores GNSS geodésicos Emlid RS2 e RS3, capazes de registrar observações de alta precisão em modo estático.

3.2 EXECUÇÃO DE CAMPO

As atividades de campo ocorreram em dois dias, 28 de agosto e 11 de setembro de 2025, totalizando dois dias de levantamentos. As ações realizadas foram:

3.2.1 LEVANTAMENTO DE PONTOS DE CONTROLE (PCs)

No primeiro dia, após a execução do voo fotogramétrico com o drone, foram implantados e rastreados seis PCs (01 a 06) utilizando o receptor GNSS Emlid RS2. A estação base permaneceu ativa durante todo o período de aquisição, registrando dados de referência necessários à correção diferencial das observações do drone e dos receptores GNSS. As alturas das antenas e os horários de rastreamento foram devidamente registrados e estão organizados na Tabela 1.

Tabela 1 – Alturas das antenas e horários de rastreamento de cada ponto

Ponto	Altura antena (m)	Início (Fuso P)	Fim (Fuso P)	Tempo total
01	1,73	15:03:25	15:13:30	0:10:05
02	1,73	15:19:18	15:29:21	0:10:03

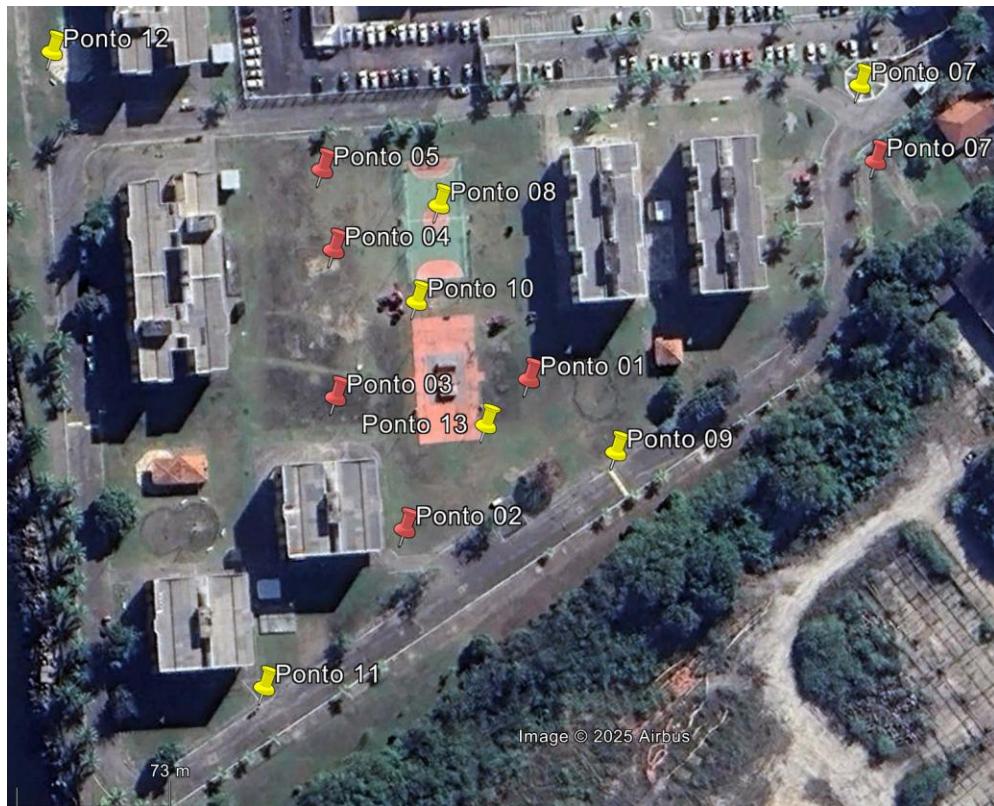
03	1,72	15:31:57	15:42:07	0:10:10
04	1,68	15:44:30	15:54:32	0:10:02
05	1,71	15:56:25	16:06:31	0:10:06
06	1,65	16:09:52	16:19:54	0:10:02
07	2,00	13:19:57	13:35:16	0:15:19
08	1,50	13:28:30	13:43:00	0:14:30
09	2,00	13:39:57	13:56:23	0:16:26
10	1,50	13:48:00	14:03:00	0:15:00
11	2,00	14:00:52	14:16:07	0:15:15
12	2,00	14:20:20	14:35:22	0:15:02
13	2,00	14:39:24	14:54:26	0:15:02

Fonte: Autor (2025)

3.2.2 LEVANTAMENTO DE PONTOS DE VERIFICAÇÃO (PVs)

No segundo dia, foram coletados sete PVs (07 a 13) com o objetivo de validar os produtos fotogramétricos gerados. Os pontos 08 e 10 foram rastreados com o receptor Emlid RS3, enquanto os demais utilizaram o RS2. A localização espacial de todos os PCs e PVs está ilustrada na Figura 2.

Figura 2 - Localização dos 13 pontos na área do levantamento



Fonte: Google Earth (2025)

3.3 PÓS-PROCESAMENTO DOS DADOS

Após a coleta das observações em campo, a etapa de pós-processamento teve como objetivo gerar produtos cartográficos precisos e confiáveis, corrigir as posições obtidas pelos instrumentos de campo e validar a acurácia dos dados. Nessa fase, os dados GNSS brutos do drone e dos receptores em solo foram processados utilizando técnicas consolidadas de correção diferencial e de reconstrução fotogramétrica, permitindo a obtenção de ortofotos georreferenciadas e a extração de coordenadas planimétricas para comparação com os Pontos de Verificação (PVs).

3.3.1 PROCESSAMENTO GNSS

As observações coletadas nos Pontos de Controle (PCs) e Pontos de Verificação (PVs) foram processadas utilizando a plataforma online disponibilizada pelo IBGE, que fornece coordenadas de referência em SIRGAS2000, projeção UTM, fuso 23S.

Em seguida, o processamento PPK dos dados do drone e da estação base foi realizado no software Topodrone, aplicando correções diferenciais e atribuindo coordenadas precisas aos centros de perspectiva das imagens aéreas. Essa etapa foi essencial para consolidar o método PPK, permitindo gerar um conjunto de imagens corrigidas para posterior reconstrução fotogramétrica.

Posteriormente, as imagens dos marcos implantados em campo e as informações processadas pelo IBGE/PPP foram registradas nas Figuras 3 a 28, documentando a coleta e garantindo a confiabilidade das coordenadas, posteriormente utilizadas tanto no ajuste com PCs quanto na validação com PVs.

Figura 3 - Foto do Ponto 01



Fonte: Autor (2025)

Figura 4 - Coordenadas do Ponto 01

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (É a que deve ser usada) ⁴	-22° 53' 06,7718"	-43° 07' 47,2641"	-3,79	7467968.957	691847.009	-45
Na data do levantamento ⁵	-22° 53' 06,7621"	-43° 07' 47,2669"	-3,79	7467969.256	691846.933	-45
Sigma(95%) ⁶ (m)	0,041	0,076	0,124			

Coordenada Altimétrica

Modelo:	hgeoHNOR_IMBITUBA	
Fator para Conversão (m):	-6,14	Incerteza (m): 0,05
Altitude Normal (m):	2,35	

Fonte: IBGE (2025)

Figura 5 - Foto do Ponto 02



Fonte: Autor (2025)

Figura 6 - Coordenadas do Ponto 02

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (É a que deve ser usada) ⁴	-22° 53' 07,7185"	-43° 07' 48,1380"	-4,08	7467940.152	691821.732	-45
Na data do levantamento⁵	-22° 53' 07,7088"	-43° 07' 48,1408"	-4,08	7467940.451	691821.656	-45
Sigma(95%)⁶ (m)	0,050	0,090	0,145			

Coordenada Altimétrica

Modelo:	hgeoHNOR_IMBITUBA
Fator para Conversão (m):	-6,14
Altitude Normal (m):	2,06
Incerteza (m):	0,05

Fonte: IBGE (2025)

Figura 7 - Foto do Ponto 03



Fonte: Autor (2025)

Figura 8 - Coordenadas do Ponto 03

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (É a que deve ser usada) ⁴	-22° 53' 06,5144"	-43° 07' 49,0228"	-3,75	7467977.511	691796.984	-45
Na data do levantamento⁵	-22° 53' 06,5047"	-43° 07' 49,0256"	-3,75	7467977.811	691796.908	-45
Sigma(95%)⁶ (m)	0,056	0,092	0,124			

Coordenada Altimétrica

Modelo:	hgeoHNOR_IMBITUBA
Fator para Conversão (m):	-6,14
Altitude Normal (m):	2,39
Incerteza (m):	0,05

Fonte: IBGE (2025)

Figura 9 - Foto do Ponto 04



Fonte: Autor (2025)

Figura 10 - Coordenadas do Ponto 04

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (É a que deve ser usada) ⁴	-22° 53' 05,7158"	-43° 07' 48,9476"	-3,96	7468002.050	691799.439	-45
Na data do levantamento ⁵	-22° 53' 05,7061"	-43° 07' 48,9504"	-3,96	7468002.349	691799.363	-45
Sigma(95%) ⁶ (m)	0,058	0,084	0,138			

Coordenada Altimétrica

Modelo:	hgeoHNOR_IMBITUBA
Fator para Conversão (m):	-6,14
Altitude Normal (m):	2,18
Incerteza (m):	0,05

Fonte: IBGE (2025)

Figura 11 - Foto do Ponto 05



Fonte: Autor (2025)

Figura 12 - Coordenadas do Ponto 05

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (É a que deve ser usada)⁴	-22° 53' 04,8193"	-43° 07' 48,8299"	-3,67	7468029.584	691803.144	-45
Na data do levantamento⁵	-22° 53' 04,8096"	-43° 07' 48,8327"	-3,67	7468029.884	691803.068	-45
Sigma(95%)⁶ (m)	0,064	0,088	0,153			

Coordenada Altimétrica

Modelo:	hgeoHNOR_IMBITUBA
Fator para Conversão (m):	-6,14
Altitude Normal (m):	2,47
Incerteza (m):	0,05

Fonte: IBGE (2025)

Figura 13 - Foto do Ponto 06



Fonte: Autor (2025)

Figura 14 - Coordenadas do Ponto 06

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (é a que deve ser usada)⁴	-22° 53' 04,6772"	-43° 07' 44,2817"	-3,36	7468032.309	691932.831	-45
Na data do levantamento⁵	-22° 53' 04,6675"	-43° 07' 44,2845"	-3,36	7468032.609	691932.755	-45
Sigma(95%)⁶ (m)	0,085	0,122	0,256			

Coordenada Altimétrica

Modelo:	hgeoHNOR_IMBITUBA
Fator para Conversão (m):	-6,14
Altitude Normal (m):	2,78
Incerteza (m):	0,05

Fonte: IBGE (2025)

Figura 15 - Foto do Ponto 07



Fonte: Autor (2025)

Figura 16 - Coordenadas do Ponto 07

Coordenadas SIRGAS

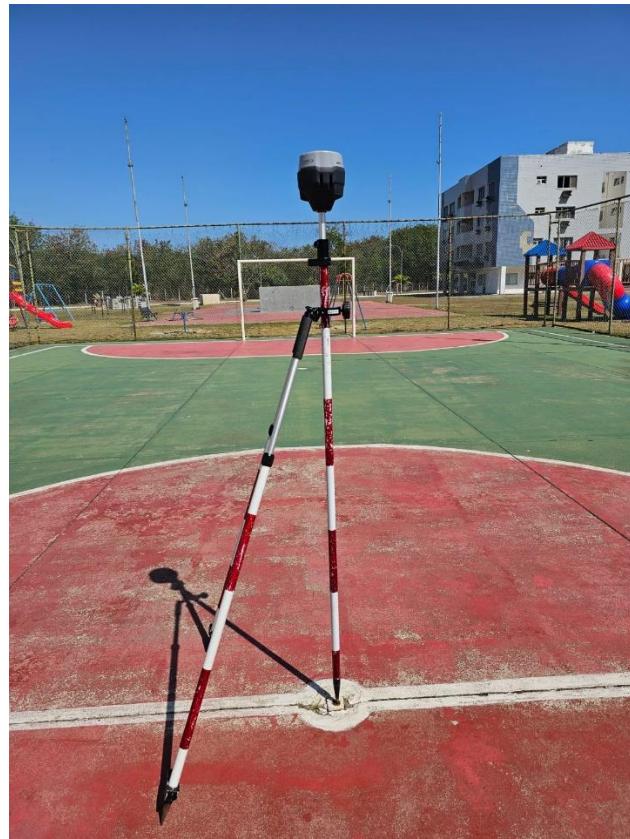
	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (É a que deve ser usada) ⁴	-22° 53' 04,2184"	-43° 07' 44,5465"	-3,41	7468046.518	691925.463	-45
Na data do levantamento⁵	-22° 53' 04,2086"	-43° 07' 44,5493"	-3,41	7468046.821	691925.387	-45
Sigma(95%)⁶ (m)	0,016	0,027	0,077			

Coordenada Altimétrica

Modelo:	hgeoHNOR_IMBITUBA
Fator para Conversão (m):	-6,14
Altitude Normal (m):	2,73
Incerteza (m):	0,05

Fonte: IBGE (2025)

Figura 17 - Foto do Ponto 08



Fonte: Autor (2025)

Figura 18 - Coordenadas do Ponto 08

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (É a que deve ser usada) ⁴	-22° 53' 05,2142"	-43° 07' 48,0556"	-3,22	7468017.157	691825.058	-45
Na data do levantamento ⁵	-22° 53' 05,2044"	-43° 07' 48,0584"	-3,22	7468017.459	691824.982	-45
Sigma(95%)⁶ (m)	0,116	0,293	0,295			

Coordenada Altimétrica

Modelo: hgeoHNOR_IMBITUBA
Fator para Conversão (m): -6,14 **Incerteza (m):** 0,05
Altitude Normal (m): 2,92

Fonte: IBGE (2025)

Figura 19 - Foto do Ponto 09



Fonte: Autor (2025)

Figura 20 - Coordenadas do Ponto 09

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (É a que deve ser usada)⁴	-22° 53' 07,0990"	-43° 07' 46,5302"	-3,56	7467958.626	691867.799	-45
Na data do levantamento⁵	-22° 53' 07,0892"	-43° 07' 46,5330"	-3,56	7467958.929	691867.723	-45
Sigma(95%)⁶ (m)	0,011	0,020	0,073			

Coordenada Altimétrica

Modelo:	hgeoHNOR_IMBITUBA
Fator para Conversão (m):	-6,14
Altitude Normal (m):	2,58
Incerteza (m):	0,05

Fonte: IBGE (2025)

Figura 21 - Foto do Ponto 10



Fonte: Autor (2025)

Figura 22 - Coordenadas do Ponto 10

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (É a que deve ser usada)⁴	-22° 53' 05,9782"	-43° 07' 48,2464"	-3,63	7467993.724	691819.322	-45
Na data do levantamento⁵	-22° 53' 05,9684"	-43° 07' 48,2492"	-3,63	7467994.027	691819.246	-45
Sigma(95%)⁶ (m)	0,162	0,268	0,428			

Coordenada Altimétrica

Modelo:	hgeoHNOR_IMBITUBA
Fator para Conversão (m):	-6,14
Altitude Normal (m):	2,51
Incerteza (m):	0,05

Fonte: IBGE (2025)

Figura 23 - Foto do Ponto 11



Fonte: Autor (2025)

Figura 24 - Coordenadas do Ponto 11

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (É a que deve ser usada)⁴	-22° 53' 08,9880"	-43° 07' 49,3859"	-3,57	7467901.552	691785.669	-45
Na data do levantamento⁵	-22° 53' 08,9782"	-43° 07' 49,3887"	-3,57	7467901.855	691785.593	-45
Sigma(95%)⁶ (m)	0,018	0,034	0,081			

Coordenada Altimétrica

Modelo:	hgeoHNOR_IMBITUBA
Fator para Conversão (m):	-6,14
Altitude Normal (m):	2,57
Incerteza (m):	0,05

Fonte: IBGE (2025)

Figura 25 - Foto do Ponto 12



Fonte: Autor (2025)

Figura 26 - Coordenadas do Ponto 12

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (é a que deve ser usada)⁴	-22° 53' 04,1530"	-43° 07' 51,3180"	-4,71	7468050.980	691732.488	-45
Na data do levantamento⁵	-22° 53' 04,1432"	-43° 07' 51,3208"	-4,71	7468051.283	691732.412	-45
Sigma(95%)⁶ (m)	0,028	0,097	0,239			

Coordenada Altimétrica

Modelo:	hgeoHNOR_IMBITUBA
Fator para Conversão (m):	-6,14
Altitude Normal (m):	1,43
Incerteza (m):	0,05

Fonte: IBGE (2025)

Figura 27 - Foto do Ponto 13



Fonte: Autor (2025)

Figura 28 - Coordenadas do Ponto 13

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (é a que deve ser usada) ⁴	-22° 53' 06,9070"	-43° 07' 47,6043"	-4,44	7467964.921	691837.260	-45
Na data do levantamento ⁵	-22° 53' 06,8972"	-43° 07' 47,6071"	-4,44	7467965.224	691837.184	-45
Sigma(95%)⁶ (m)	0,043	0,066	0,120			

Coordenada Altimétrica

Modelo:	hgeoHNOR_IMBITUBA
Fator para Conversão (m):	-6,14
Altitude Normal (m):	1,70
Incerteza (m):	0,05

Fonte: IBGE (2025)

3.4 INSTRUMENTAÇÃO E SOFTWARES UTILIZADOS

Para o desenvolvimento do trabalho, foram empregados os seguintes equipamentos e softwares:

1. Drone com PPK: DJI Mavic 2 Pro PPK, conforme mostrado na Figura 29;

Figura 29 - Drone com PPK: DJI Mavic 2 Pro PPK



Fonte: SUAS News. Topodrone DJI Mavic 2 Pro PPK Upgrade Kit. Disponível em: <<https://www.suas-news.com/2020/10/topodrone-dji-mavic-2-pro-ppk-upgrade-kit/>>. Acesso em: 28 set. 2025.

2. Receptor GNSS geodésico: Para levantamento de Pontos de Controle (PCs) e Pontos de Verificação (PVs), conforme mostrado na figura 30 e na figura 31;

Figura 30 – Receptor GNSS Emlid Reach RS2



Fonte: Guandalini. Receptor GNSS Emlid Reach RS2. Disponível em: <<https://www.guandalinibr.com/produutos/receptor-gnss/gps-emlid-reach-rs2/>>. Acesso em: 28 set. 2025.

Figura 31 - Receptor GNSS Emlid Reach RS3



Fonte: Guandalini. Receptor GNSS Emlid Reach RS3. Disponível em: <[https://www.guandalinibr.com/produtos/receptor-gnss/gps-emlid-reach-rs3/](https://www.guandalinibr.com/produutos/receptor-gnss/gps-emlid-reach-rs3/)>. Acesso em: 28 set. 2025.

3. Smartphone para apoio em campo;
4. Estação de trabalho para processamento dos dados;
5. Software Topodrone para processamento PPK;
6. Software Agisoft Metashape para geração de ortofotos;
7. Software QGIS para análise e extração de coordenadas.

3.5 GERAÇÃO DAS ORTOFOTOS E EXTRAÇÃO DAS COORDENADAS

Após o processamento dos dados GNSS e a aplicação das correções diferenciais via PPK, as imagens aéreas corrigidas foram utilizadas para a geração dos produtos fotogramétricos. Essa etapa foi conduzida no software Agisoft Metashape, responsável pela reconstrução tridimensional e ortorectificação da área de estudo.

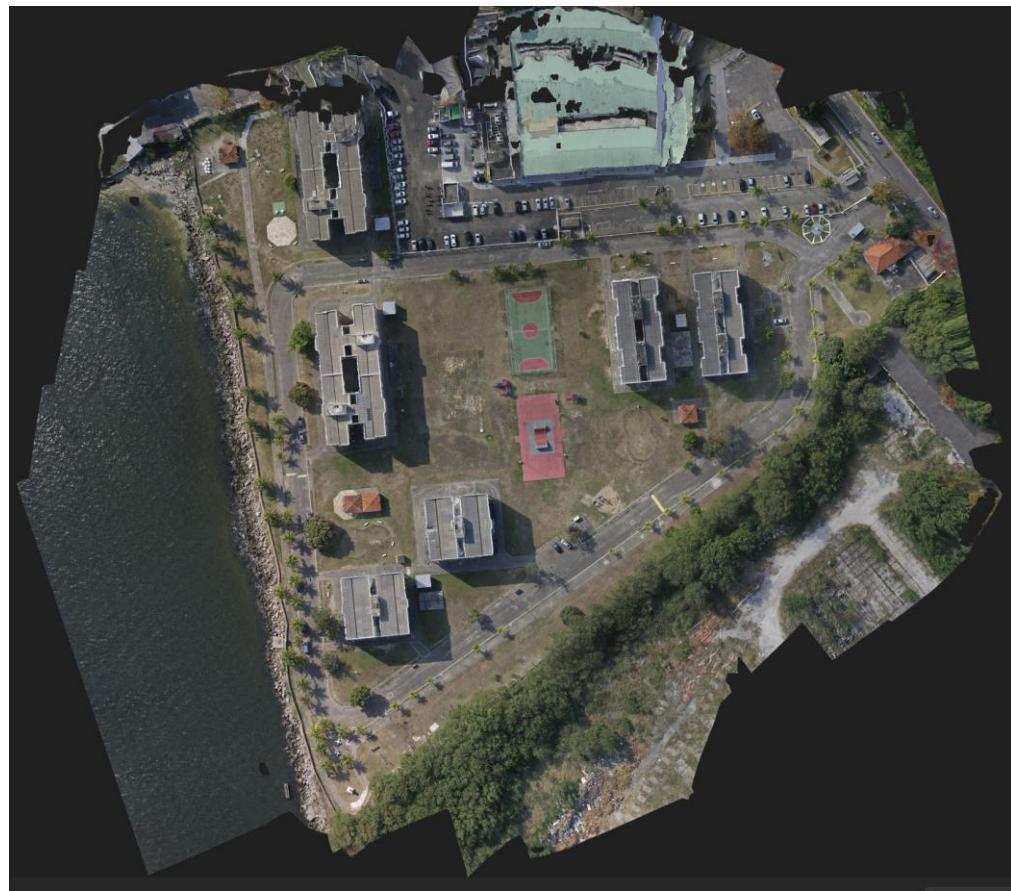
- Ortofoto PPK, gerada exclusivamente com base no processamento cinemático pós-processado, mostrada na figura 32; e
- Ortofoto PC, ajustada a partir do conjunto de Pontos de Controle levantados em campo, mostrada na figura 33.

Figura 32 - Ortofoto PPK



Fonte: Autor (2025)

Figura 33 - Ortofoto Pontos de Controle

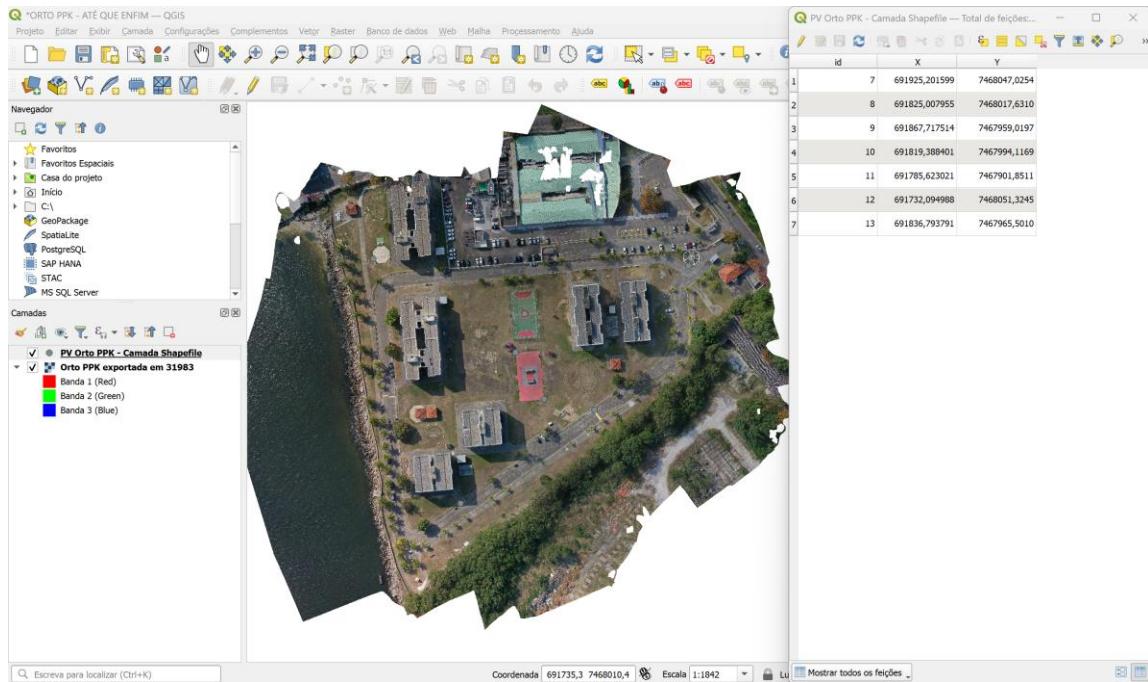


Fonte: Autor (2025)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

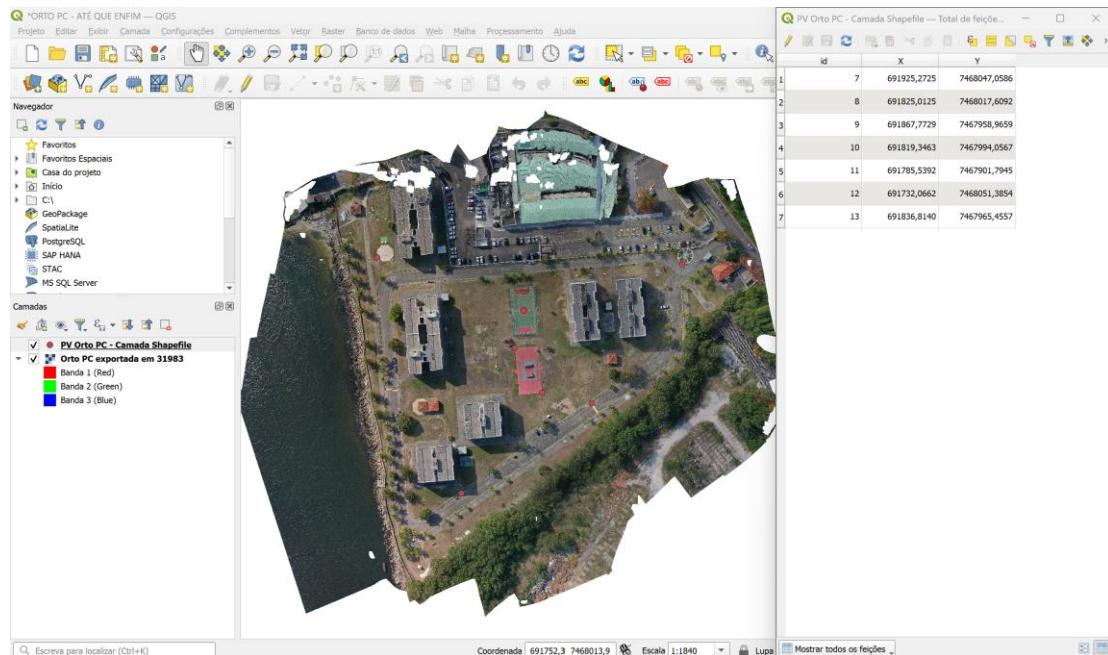
Após a geração dos ortofotomosaicos, ambos os produtos foram importados para o software QGIS, onde foram extraídas as coordenadas planimétricas (X e Y) correspondentes aos sete Pontos de Verificação (07 a 13), conforme mostram a figura 34 e a figura 35.

Figura 34 - Coordenadas dos Pontos de Verificação extraídas da Ortofoto PPK no QGIS



Fonte: Autor (2025)

Figura 35 - Coordenadas dos Pontos de Verificação extraídas da Ortofoto PC no QGIS



Fonte: Autor (2025)

As coordenadas obtidas em cada ortofoto foram organizadas em uma planilha do Excel, permitindo a comparação direta com as coordenadas de referência processadas pelo PPP/IBGE, conforme mostra a tabela 2.

Tabela 2 - Coordenadas dos Pontos de Verificação obtidas pelo PPP IBGE e nas ortofotos pelo QGIS

Ponto	X_PPP_IBGE	Y_PPP_IBGE	X_drone	Y_drone	X_gnss	Y_gnss
7	691925,463000	7468046,518000	691925,201599	7468047,025400	691925,272500	7468047,058600
8	691825,058000	7468017,157000	691825,007955	7468017,631000	691825,012500	7468017,609200
9	691867,799000	7467958,626000	691867,717514	7467959,019700	691867,772900	7467958,965900
10	691819,322000	7467993,724000	691819,388401	7467994,116900	691819,346300	7467994,056700
11	691785,669000	7467901,552000	691785,623021	7467901,851100	691785,539200	7467901,794500
12	691732,488000	7468050,980000	691732,094988	7468051,324500	691732,066200	7468051,385400
13	691837,260000	7467964,921000	691836,793791	7467965,501000	691836,814000	7467965,455700

Fonte: Autor (2025)

4.1 CONSOLIDAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS DADOS

Para avaliação da acurácia posicional, elaborou-se uma planilha automatizada no Excel. Nela foram calculados os resíduos entre as coordenadas observadas (drone e GNSS) e as coordenadas de referência (PPP/IBGE), conforme mostram a tabela 3 e a tabela 4. Em seguida, os valores foram submetidos ao cálculo do Erro Quadrático Médio (RMSE) para as componentes X (este), Y (norte) e para a componente planimétrica resultante, conforme mostra a tabela 5.

Tabela 3 - Diferenças das coordenadas do drone para o PPP IBGE e cálculo do erro planimétrico da ortofoto com uso de

PPK

Ponto	dX_drone	dY_drone	erro_plano_dron e
7	-0,261401	0,507400	0,570776
8	-0,050045	0,474000	0,476635
9	-0,081486	0,393700	0,402044
10	0,066401	0,392900	0,398471
11	-0,045979	0,299100	0,302613
12	-0,393012	0,344500	0,522627
13	-0,466209	0,580000	0,744144

Fonte: Autor (2025)

Tabela 4 - Diferenças das coordenadas do receptor GNSS para o PPP IBGE e cálculo do erro planimétrico da ortofoto com o uso de PC

Ponto	dx_gnss	dy_gnss	erro_plano_gns
7	-0,190500	0,540600	0,573183
8	-0,045500	0,452200	0,454483
9	-0,026100	0,339900	0,340901
10	0,024300	0,332700	0,333586
11	-0,129800	0,242500	0,275053
12	-0,421800	0,405400	0,585034
13	-0,446000	0,534700	0,696290

Fonte: Autor

Tabela 5 - Erro Quadrático Médio e outras métricas

Métrica	DRONE	GNSS
RMSE _x (m)	0,2551770752	0,2488004019
RMSE _y (m)	0,4368788519	0,4195259227
RMSE _r via eixos (m)	0,5059431500	0,4877536672
RMSE _r direto (m)	0,5059431500	0,4877536672
CE90 (1.5175×RMSE _r) (m)	0,7677687301	0,7401661899
NSSDA 95% (1.7308×RMSE _r) (m)	0,8756864039	0,8442040471
Média dx (m)	-0,1759615714	-0,1764857143
Média dy (m)	0,4273714283	0,4068571426
DP dx (m)	0,1996121471	0,1894206204
DP dy (m)	0,0979094433	0,1105176134

Fonte: Autor (2025)

Além disso, foram geradas representações gráficas que facilitaram a interpretação dos resultados, como o comparativo dos RMSEs obtidos com drone e GNSS e o ranking dos erros por pontos de verificação, conforme mostra a tabela 6. Essa etapa de sistematização permitiu não apenas quantificar os erros, mas também visualizar tendências e padrões de desempenho entre os métodos avaliados.

Tabela 6 - Ranking dos erros por Pontos de Verificação

Ponto	Erro_ortho_PPK (m)	Erro_ortho_PC (m)	Melhor método no ponto
-------	--------------------	-------------------	------------------------

7	0,570776	0,573182877	PPK
8	0,476634559	0,454483322	PC
9	0,402044348	0,340900601	PC
10	0,398471457	0,33358624	PC
11	0,302613414	0,275053249	PC
12	0,522626714	0,585033674	PPK
13	0,744144362	0,696290234	PC

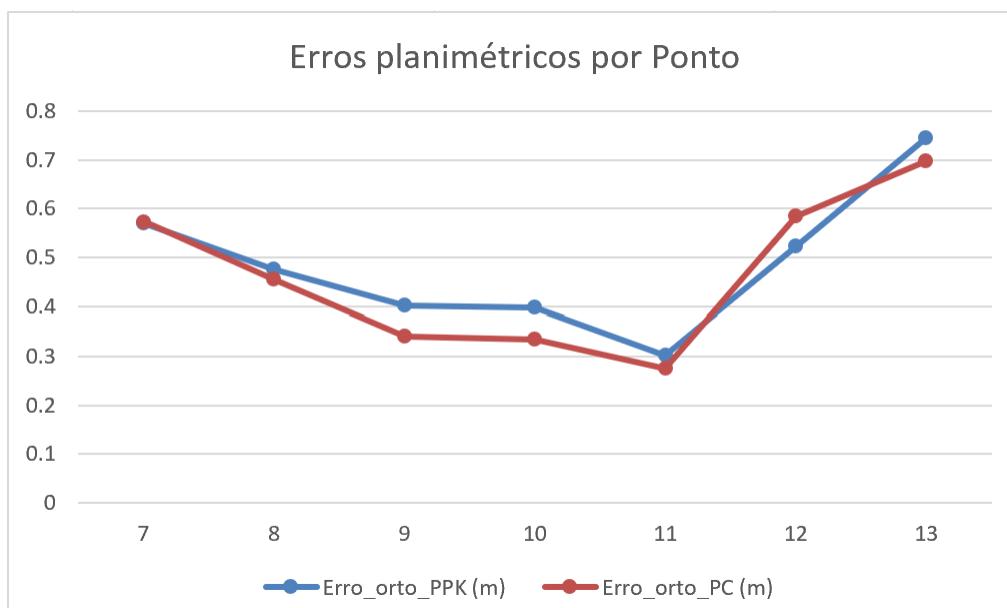
Fonte: Autor (2025)

4.2 ERROS POSICIONAIS POR PONTO DE VERIFICAÇÃO

A análise individual dos Pontos de Verificação (07 a 13) demonstrou que, na maior parte dos casos, as coordenadas obtidas por meio do georreferenciamento com Pontos de Controle (PCs) apresentaram menor erro planimétrico em relação às coordenadas extraídas da ortofoto gerada apenas com PPK.

O gráfico elaborado com os erros planimétricos por ponto (Figura 36) evidenciou essa tendência: em cinco dos sete pontos, o método com PCs (GNSS) obteve maior proximidade em relação às coordenadas de referência, enquanto o método PPK apresentou desempenho superior apenas em casos pontuais. Os erros, em ambos os métodos, permaneceram na ordem de poucos centímetros, o que já caracteriza um elevado grau de acurácia posicional.

Figura 36 - Erros planimétricos por Pontos de Verificação



Fonte: Autor (2025)

4.3 AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA

No presente trabalho, a consolidação dos dados por meio do RMSE evidenciou que:

- Para o PPK (drone), o RMSE planimétrico foi de aproximadamente 0,51 m;
- Para o método baseado em PCs (GNSS), o RMSE planimétrico foi ligeiramente menor, em torno de 0,49 m.

Essa diferença, embora pequena, confirma a tendência observada nos erros individuais por ponto: o uso de PCs ainda garantiu um desempenho marginalmente superior em termos de acurácia, conforme evidencia a tabela 7.

Tabela 7 - Tabela-Resumo com Erro Quadrático Médio e outras métricas

Métrica	PPK	PC
RMSE _x (m)	0,2551770752	0,2488004019
RMSE _y (m)	0,4368788519	0,4195259227
RMSE _r via eixos (m)	0,5059431500	0,4877536672
RMSE _r direto (m)	0,5059431500	0,4877536672
CE90 (1.5175×RMSE _r) (m)	0,7677687301	0,7401661899
NSSDA 95% (1.7308×RMSE _r) (m)	0,8756864039	0,8442040471
Média dX (m)	-0,1759615714	-0,1764857143
Média dY (m)	0,4273714283	0,4068571426
DP dX (m)	0,1996121471	0,1894206204
DP dY (m)	0,0979094433	0,1105176134

Fonte: Autor (2025)

4.4 DISCUSSÃO QUALITATIVA DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos confirmam a viabilidade do método PPK como alternativa para levantamentos aerofotogramétricos. Apesar de o método baseado em PCs ter apresentado desempenho ligeiramente melhor, ambos os processos forneceram produtos com erros na ordem de centímetros a decímetros, plenamente compatíveis com aplicações de engenharia, mapeamento urbano e atualização cartográfica.

É importante destacar que o método PPK mostrou-se bastante eficiente ao reduzir a necessidade de implantar e rastrear diversos pontos de controle em campo, o que representa ganho de tempo

e de logística. A implantação de PCs, embora garanta um incremento marginal de acurácia, envolve maior esforço operacional e pode ser inviável em áreas de difícil acesso.

Assim, pode-se concluir que o método PPK, mesmo sem atingir exatamente o mesmo desempenho dos PCs neste experimento, constitui uma solução prática, robusta e de elevada aplicabilidade para levantamentos aerofotogramétricos modernos. Sua adoção, portanto, deve considerar o equilíbrio entre a acurácia exigida no produto final e a viabilidade operacional de cada projeto.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos corroboram a viabilidade técnica do método PPK como alternativa eficiente para levantamentos aerofotogramétricos. Embora o método baseado em Pontos de Controle tenha apresentado acurácia ligeiramente superior, ambos os procedimentos produziram produtos cartográficos com erros na faixa de centímetros a decímetros, plenamente compatíveis com aplicações de engenharia, planejamento urbano e atualização cadastral, portanto são compatíveis (ASPRS, 2015).

O método PPK demonstrou-se operacionalmente vantajoso, uma vez que reduz substancialmente a necessidade de rastreamento de Pontos de Controle e deslocamento em campo, representando economia de tempo e de recursos logísticos. Ainda que a utilização de PCs proporcione uma pequena melhoria na precisão final, essa vantagem deve ser ponderada em relação ao esforço operacional envolvido.

Dessa forma, conclui-se que o método PPK apresenta-se como uma ferramenta prática e tecnicamente confiável, sobretudo em projetos que demandam eficiência operacional sem comprometer a acurácia cartográfica. Essa constatação contribui para a modernização dos processos aerofotogramétricos, oferecendo uma abordagem mais ágil e sustentável para a produção de ortofotomosaicos de alta precisão. Sua adoção deve considerar o equilíbrio entre a precisão requerida e a viabilidade logística de cada levantamento, reafirmando sua importância no contexto dos métodos modernos de georreferenciamento aéreo.

6 REFERÊNCIAS

- ASPRS. **Accuracy Standards for Digital Geospatial Data.** American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2015.
- ASPRS. **Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data.** American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2014.
- COLOMINA, I.; MOLINA, P. **Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 92, p. 79–97, 2014.
- ELING, C.; KLINGBEIL, L.; WIELAND, M.; KUHLMANN, H. **Real-time single-frequency precise point positioning for lightweight UAVs.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 108, p. 94–103, 2015.
- FGDC. **Geospatial Positioning Accuracy Standards.** Federal Geographic Data Committee, 1998.
- FRASER, C.; HANLEY, H. **Bias compensation in airborne photogrammetry.** Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 69, n. 1, p. 53–57, 2003.
- GINI, R. et al. **Aerial remote sensing surveys using lightweight drones and structure from motion photogrammetry: a feasibility study in the context of archaeological site mapping.** ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2014.
- GREJNER-BEZEK, K.; MUNJAL, S. **GNSS Solutions: Post-processing options for kinematic GNSS.** GPS World, 2015.
- GUANDALINI. **Receptor GNSS Emlid Reach RS2.** Disponível em: <https://www.guandalini.br/produtos/receptor-gnss/gps-emlid-reach-rs2/>. Acesso em: 4 out. 2025.
- GUANDALINI. **Receptor GNSS Emlid Reach RS3.** Disponível em: <https://www.guandalini.br/produtos/receptor-gnss/gps-emlid-reach-rs3/>. Acesso em: 4 out. 2025.
- HIRSCHMÜLLER, H. **Stereo processing by semi-global matching and mutual information.** IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 30, n. 2, p. 328–341, 2008.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS: Theory and Practice**. 5. ed. Wien: Springer-Verlag, 2001.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more**. Wien: Springer Science & Business Media, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. ProGrid – Transformação de Coordenadas entre Sistemas de Referência Oficiais. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16312-progrid.html>. Acesso em: 6 out. 2025.

JAMES, M. R.; ROBSON, S.; SMITH, M. W. **3D surface reconstruction from UAV imagery: current methods and future trends**. *Remote Sensing*, v. 12, n. 12, 2020.

KRAUS, K. **Photogrammetry: Volume 1: Fundamentals and Standard Processes**. 4. ed. Bonn: Dummler, 1997.

LUHMANN, T. et al. **Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging**. Berlin: De Gruyter, 2014.

REMONDINO, F.; FRASER, C. **Digital camera calibration methods: considerations and comparisons**. In: ISPRS Commission V Symposium, Dresden, 2006.

SMITH, M. W.; VERICA, G. **Structure from motion photogrammetry in physical geography**. *Progress in Physical Geography*, v. 40, n. 4, p. 511–529, 2016.

SUAS NEWS. **Topodrone DJI Mavic 2 Pro PPK Upgrade Kit**. Disponível em: <https://www.suas-news.com/2020/10/topodrone-dji-mavic-2-pro-ppk-upgrade-kit/>. Acesso em: 4 out. 2025.

WESTOBY, M. J. et al. **‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications**. *Geomorphology*, v. 179, p. 300–314, 2012.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry with Applications in GIS**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2000.