



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA

JOÃO PAULO DE SANTANA RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DO USO DE UAS EQUIPADO COM PPK PARA GERAÇÃO DE
ORTOIMAGENS: ESTUDO DE CASO NO CASARÃO DA VÁRZEA, RECIFE-PE**

Recife

2025

JOÃO PAULO DE SANTANA RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DO USO DE UAS EQUIPADO COM PPK PARA GERAÇÃO DE
ORTOIMAGENS: ESTUDO DE CASO NO CASARÃO DA VÁRZEA, RECIFE-PE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Cartográfica e de Agrimensura,
Departamento de Engenharia Cartográfica
da Universidade Federal de Pernambuco,
Centro de Tecnologia e Geociência, como
requisito para a obtenção do título de
bacharel(a) em Engenharia Cartográfica e
de Agrimensura.

Orientador(a): Simone Sayuri Sato

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Rodrigues, João Paulo de Santana.

AVALIAÇÃO DO USO DE UAS EQUIPADO COM PPK PARA GERAÇÃO
DE ORTOIMAGENS: ESTUDO DE CASO NO CASARÃO DA VÁRZEA,
RECIFE?PE / João Paulo de Santana Rodrigues. - Recife, 2025.

68 p. : il., tab.

Orientador(a): Simone Sayuri Sato

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Cartográfica e
de Agrimensura - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices.

1. Fotogrametria. 2. Post-Processed Kinematic. 3. PPK. 4.
Georreferenciamento Direto. 5. Acurácia Posicional. 6. UAS, Drone. I. Sato,
Simone Sayuri. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

JOÃO PAULO DE SANTANA RODRIGUES

AVALIAÇÃO DO USO DE UAS EQUIPADO COM PPK PARA GERAÇÃO DE ORTOIMAGENS: ESTUDO DE CASO NO CASARÃO DA VÁRZEA, RECIFE-PE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Aprovado em: 29/08/2025.

Nota: 9.3

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



SIMONE SAYURI SATO

Data: 04/09/2025 14:28:49-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Dra. Simone Sayuri Sato (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente



LUCAS GONZALES LIMA PEREIRA CALADO

Data: 05/09/2025 10:44:46-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Lucas Gonzales Lima Pereira Calado (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente



LEANDRO LUIZ SILVA DE FRANCA

Data: 05/09/2025 09:25:49-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Msc. Leandro França (Examinador Externo)
Instituto Federal da Paraíba

ASSINADO DIGITALMENTE POR



Schneider Almeida Paiva

CPF: 788.434.804-72



Profª. Msc. Schneider Almeida Paiva (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho à minha mãe Marli, à minha companheira Bruna e à minha filha Melissa por todo o amor e apoio nesta trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Marli, por toda luta para me dar uma educação de qualidade, todo apreço e carinho e principalmente pelo encorajamento para me tornar um homem melhor.

Agradeço a minha companheira Bruna por estar sempre ao meu lado, frente a todas as dificuldades. Não poderia escolher uma parceira melhor nessa caminhada.

Agradeço à minha orientadora Simone Sato por todo conhecimento repassado, por todo encorajamento e paciência nesta etapa, que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho avalia a viabilidade do uso de Unmanned Aerial System (UAS) equipados com PPK para a geração de ortoimagens em áreas de difícil acesso, com foco na melhora da acurácia posicional dos produtos geoespaciais e na redução do tempo e dos custos operacionais em relação a métodos tradicionais baseados em Pontos de Controle no Terreno. A metodologia envolveu o mapeamento aerofotogramétrico, a produção de ortoimagens e a comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos. O estudo foi conduzido no Casarão da Várzea (Recife–PE), patrimônio histórico em estado de ruínas e recoberto por vegetação, o que representa um cenário trabalhoso para a aquisição de dados. Os resultados demonstraram que o método PPK atingiu acurácia planimétrica Classe A (escala 1:1.000) e altimétrica Classe B, segundo a Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG, 2016). O erro quadrático médio planimétrico obtido foi de 0,110 m, valor estatisticamente equivalente ao processamento com pontos de controle onde foi obtido o valor de 0,109 m. Conclui-se que o método PPK constitui uma alternativa eficaz para o mapeamento de áreas remotas ou de difícil acesso, apresentando desempenho comparável ao método convencional e destacando-se pela eficiência operacional, associada à redução de custos e simplificação logística.

Palavras-chave: Fotogrametria; *Post-Processed Kinematic*; PPK; Georreferenciamento Direto; Acurácia Posicional; UAS, Drone.

ABSTRACT

This study evaluates the feasibility of using Unmanned Aerial System (UAS) equipped with PPK technology for generating orthoimages in areas with limited accessibility. The research focuses on optimizing the positional accuracy of geospatial products while reducing the time and operational costs when compared to traditional approaches based on Ground Control Points. The methodology included aerial photogrammetric surveys, orthoimage generation, and comparative accuracy analysis between the two georeferencing strategies. The case study was conducted at Casarão da Várzea (Recife – PE), a historic building in ruins and partially covered by vegetation, which presents significant challenges for data acquisition. The results demonstrated that the PPK method achieved Class A planimetric accuracy (scale 1:1,000) and Class B altimetric accuracy, according to the Brazilian Technical Specification for Geospatial Data Quality Control (ET-CQDG, 2016). The Root Mean Square Error in two dimensions was 0.110 m, a value statistically equivalent to processing with control points, where a value of 0.109 m was obtained. These findings indicate that PPK method is an effective alternative for mapping remote or difficult-to-access areas, with performance comparable to the conventional method and standing out for its operational efficiency, associated with cost reduction and logistical simplification.

Keywords: Photogrammetry; Post-Processed Kinematic; PPK; Direct Georeferencing; Positional Accuracy; UAV, Drone.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Fluxograma metodológico	22
Figura 2	Mapa de localização	23
Figura 3	Parâmetros de voo no DroneDeploy	26
Figura 4	DJI Phantom 4 Advanced com Kit PPK 2	27
Figura 5	POLARIS S100 utilizado como Estação Base	27
Figura 6	Emlid Flow	28
Figura 7	Planejamento do Apoio de Campo	29
Figura 8	Parâmetros das imagens utilizadas para processamento com PPK.	30
Figura 9	Exemplo de marcação dos GCPs no Pix4DMapper	31
Figura 10	Nuvem de Pontos e MDS apresentados no Pix4DMapper	32
Figura 11	Interface do software GPPK, processamento e ajustamento das imagens aéreas utilizando o método PPK	33
Figura 12	Interface do software GPPK, janela de visualização da situação do ajustamento das imagens aéreas utilizando o método PPK	33
Figura 13	Interface do software GPPK, correção das coordenadas no centro de perspectivas das imagens.	34
Figura 14	Vetorização dos pontos de teste no QGIS	36
Figura 15	Avaliação da Acurácia utilizando <i>plugin</i> GeoPEC no QGIS	36
Figura 16	Resultado da avaliação de Acurácia utilizando o GeoPEC	37
Figura 17	Número de sobreposições de imagens computadas para cada pixel do ortomosaico	39
Figura 18	Posições das imagens computadas com ligações entre imagens correspondentes	40
Figura 19	Ortomosaico e MDS representado no QGIS	44
Figura 20	Nuvem de pontos densa e modelo 3D texturizado	45
Gráfico 1	Discrepâncias posicionais planimétricas do processamento com 5 GCPs	42
Gráfico 2	Discrepâncias posicionais planimétricas do processamento com PPK	42
Gráfico 3	Discrepâncias posicionais altimétricas do processamento com 5 GCPs	43
Gráfico 4	Discrepâncias posicionais altimétricas do processamento com PPK	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Valores de erro médio (EM) e erro padrão (EP), para CQDG em grandes escalas	21
Tabela 2	Parâmetros de processamento – Pix4DMapper	29
Tabela 3	Coordenadas dos Pontos do Apoio de Campo em metros	37
Tabela 4	Valores de RMSE dos processamentos	39
Tabela 5	Acurácia Posicional	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DP: Desvio Padrão

ET-CQDG: Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados

Geoespaciais

GCPs: Ground Control Points (Pontos de Controle no Terreno)

GNSS: *Global Navigation Satellite System* (Sistema Global de Navegação por Satélite)

GPPK: Software de processamento PPK da Guandalini

GSD: Ground Sampling Distance (Distância de amostragem do solo)

H: Altura Normal

IBGE-PPP: Posicionamento por Ponto Preciso do IBGE

IMU: Unidade de Medição Inercial

ISO: International Organization for Standardization

MDT: Modelo Digital de Terreno

MDS: Modelo Digital de Superfície

NTRIP: Networked Transport of RTCM via Internet Protocol

PEC-PCD: Padrão de Exatidão Cartográfica - Produtos Cartográficos Digitais

PPK: Post Processed Kinematic (Cinemático Pós-Processado)

RBMC: Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

RMSE: Root Mean Square Error (Raiz do Erro Quadrático Médio)

RTK: Real Time Kinematic (Cinemático em Tempo Real)

RTCM: Radio Technical Commission for Maritime Services

SfM: Structure from Motion

UTM: Universal Transversa de Mercator

UAS: Unmanned Aerial System (Sistema Aéreo Não Tripulado)

VRS: Virtual Reference System (Sistema de Referência Virtual)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS.....	15
2.1. Objetivo geral.....	15
2.2. Objetivos específicos.....	15
2.3. Justificativas.....	15
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
3.1. Fotogrametria.....	17
3.1.1. Fotogrametria Structure from Motion.....	17
3.1.2. Uso de plataformas aéreas não tripulada com PPK.....	18
3.2. Métodos de Posicionamento com GNSS.....	19
3.2.1. RTK – Real Time Kinematic.....	19
3.2.2. PPK – Pos Processing Kinematic.....	19
3.3 Qualidade de dado geoespacial.....	20
4. METODOLOGIA.....	22
4.1. Área De Estudo.....	22
4.2. Planejamento do Voo e Coleta de Dados.....	24
4.2.1 Materiais e Equipamentos Utilizados.....	24
4.3.1 Planejamento do voo.....	25
4.3.2 Coleta de dados, processamentos do apoio terrestre e correção do PPK.	26
4.3.3 Processamento de dados do Voo.....	29
4.3.3.1 Processamento utilizando 5 GCPs.....	31
4.3.3.2 Processamento utilizando método PPK.....	32
4.3.3.3 Análise de qualidade.....	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
6. CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS.....	48
APÊNDICE A – Relatório GeoPEC do processamento com 5 GCPs.....	51
APÊNDICE B – Relatório GeoPEC do processamento com PPK.....	59
APÊNDICE C – Relatório IBGE-PPP.....	67

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por dados geoespaciais precisos e de alta resolução, especialmente em áreas de difícil acesso, tem impulsionado o desenvolvimento e a adoção de tecnologias inovadoras no campo da fotogrametria. Nesse contexto, os *Unmanned Aerial System* (UAS) consolidam-se como ferramentas relevantes, oferecendo flexibilidade e capacidade de coleta de dados sob demanda, características que os distinguem das técnicas tradicionais de sensoriamento remoto (Tomaščík et al., 2019).

Segundo Nex et al. (2022), os UAS representam uma das tecnologias emergentes mais significativas nas geociências e no sensoriamento remoto nas últimas duas décadas. Tornaram-se amplamente utilizados em diferentes áreas de aplicação, substituindo outras plataformas em razão de sua versatilidade e custos relativamente reduzidos. Como mencionado por Chabot (2018), esse crescimento é evidenciado pelo aumento expressivo de publicações científicas sobre UAVs: de acordo com a base Scopus, mais de 80.000 artigos foram publicados desde 2001 utilizando os termos “UAV”, “drone”, “UAS” ou “RPAS” em títulos ou palavras-chave. A maioria desses trabalhos concentra-se nos campos da engenharia e da ciência da computação, com forte contribuição também das pesquisas em sensoriamento remoto.

A integração de tecnologias como a fotogrametria digital e o método *Structure from Motion* (SfM) ampliou o potencial dos UAS na geração de insumos e produtos cartográficos, com elevada acurácia e eficiência (Martínez-Carricondo et al., 2023). Em Rangel et al. (2018) destacam a importância de garantir que os produtos derivados desses levantamentos atendam às normas de qualidade cartográfica, aspecto essencial para projetos de engenharia de alta complexidade.

De fato, os UAS constituem uma alternativa de menor custo em relação aos métodos tradicionais de mapeamento terrestre, uma vez que integram a bordo sistemas de posicionamento e sensores de alta precisão, como a *Inertial Measurement Unit* (IMU) e o *Global Navigation Satellite System* (GNSS). Tais recursos tornam os UAS adequados a aplicações em pequena escala e em pesquisas que demandam restituição detalhada de áreas específicas (Famiglietti et al., 2021).

Contudo, apesar de sua ampla aplicabilidade em levantamentos de baixa altitude e curtas distâncias, a utilização dos UAS frequentemente requer medições complementares em campo, notadamente a coleta de *Ground Control Points* (GCPs) Famiglietti et al. (2021). Obtidos por sistemas GNSS trabalhando no modo *Network Real Time Kinematic* (NRTK) e são usados sucessivamente na fase de processamento fotogramétrico, técnica abordada em (Roswell; Honkavaara, 2012).

O levantamento de GCPs, entretanto, demanda tempo e recursos, podendo tornar-se inviável em áreas remotas ou de difícil acesso, comprometendo a eficiência do mapeamento (Wolf et al., 2014; Tomaščík et al., 2019). Nesse cenário, uma alternativa consiste no uso de receptores GNSS de alta precisão acoplado na aeronave, possibilitando o georreferenciamento direto das imagens. Esses receptores multibanda e multi-constelação permitem o emprego de correções em tempo real com método *Real Time Kinematic* (RTK) ou em modo pós-processado com método *Post-Processed Kinematic* (PPK), alcançando precisão centimétrica (Isejima, 2008). No caso do PPK, ressalta-se que a qualidade da solução depende diretamente da estação base utilizada como referência (Famiglietti et al., 2021).

Embora a literatura já apresente avanços significativos sobre o tema, este trabalho busca contribuir com a análise dos desafios ainda existentes para viabilizar mapeamentos precisos sem a necessidade de múltiplos GCPs. O objetivo é explorar o potencial do uso de UAS equipados com PPK em levantamentos aerofotogramétricos de áreas de difícil acesso, avaliando a acurácia posicional dos produtos gerados e o ganho de eficiência operacional em comparação com metodologias convencionais baseadas em pontos de apoio distribuídos no terreno.

2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

2.1. Objetivo geral

Avaliar a viabilidade do uso UAS equipado com PPK para o mapeamento de áreas de difícil acesso, verificando a acurácia posicional dos produtos geoespaciais gerados e analisando os ganhos de eficiência operacional, em comparação com os tradicionais baseados em GCPs.

2.2. Objetivos específicos

- a) Desenvolver um procedimento de aquisição de dados com UAS e PPK que possibilite a replicabilidade do procedimento em diferentes áreas de estudo;
- b) Aplicar do procedimento em um estudo de caso real, avaliando a capacidade do método PPK em substituir ou reduzir a dependência de GCPs;
- c) Verificar a precisão e a acurácia das coordenadas obtidas pelo processamento com PPK em comparação aos valores de referência levantados em campo;
- d) Realizar análise comparativa entre o método tradicional de georreferenciamento com GCPs e o método baseado em PPK, avaliando vantagens, limitações e impacto na eficiência operacional.

2.3. Justificativas

Nos últimos anos, os avanços em fotogrametria digital e técnicas de SfM permitiram significativa automação no processamento de imagens, reduzindo o tempo e a necessidade de intervenção manual. Entretanto, a etapa de georreferenciamento permanece, em grande parte, manual e onerosa.

O procedimento convencional de georreferenciamento indireto baseia-se na coleta de GCPs e Pontos de Verificação, que demandam levantamentos topográficos adicionais em campo. Essa prática, embora consolidada, apresenta limitações importantes: elevado

custo operacional, necessidade de tempo considerável para posicionamento e medição dos pontos e, em alguns casos, inviabilidade técnica em áreas de difícil acesso (Losè et al., 2020; Tomaščík et al., 2019).

Embora soluções de detecção automática ou semiautomática de alvos artificiais tenham sido desenvolvidas, a etapa de levantamento em campo continua sendo um gargalo no fluxo de produção cartográfica. Nesse sentido, o georreferenciamento direto por meio do PPK surge como alternativa promissora, reduzindo a dependência de GCPs sem comprometer a acurácia dos produtos gerados a depender das aplicações fotogramétricas. (Wolf et al., 2014).

Sobre essas argumentações, este trabalho, deverá responder a seguinte questão: O PPK acoplado em UAS é capaz de substituir, em termos de acurácia posicional e eficiência operacional, o método tradicional baseado em GCPs em levantamentos aerofotogramétricos de áreas de difícil acesso?

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Fotogrametria

Segundo Wolf (2014) a fotogrametria tem sido definida como a arte, ciência e tecnologia de obter informações confiáveis sobre objetos físicos e o ambiente através de processos de registro, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de registro de energia eletromagnética radiante e outros fenômenos. Segundo o autor, a fotogrametria métrica consiste em fazer medições precisas a partir de fotos e outras fontes de informação, permitindo encontrar distâncias, ângulos, áreas, volumes, elevações e tamanhos e formas de objetos, entre as aplicações mais comuns estão a preparação de mapas planimétricos e topográficos. As fotografias, fonte de dados da fotogrametria, são do tipo aéreas e terrestres, sendo as aéreas, mais frequentemente oriundas de câmeras embarcadas em aeronaves (tripuladas e não tripuladas) e as terrestres, tiradas de câmeras baseadas em solo, e imagens de satélite (quando imageadas no modo estéreo) também são usadas.

3.1.1. *Fotogrametria Structure from Motion*

Nos últimos anos, vários estudos se concentraram no uso de UAS para gerar modelos 3D e produtos métricos de valor agregado por meio de abordagens SfM. Esses estudos abordaram diferentes aspectos (por exemplo, a otimização do planejamento de voo e das fases de aquisição de imagens (Palanirajan et al, 2019 e Hernandez–Lopez et al, 2013), o uso de imagens oblíquas (Aicardi et al, 2016), a otimização da configuração dos pontos de controle (Bolkas, 2019 e Agüera–Vega; Carvajal–Ramírez; Martínez–Carricondo, 2017), a avaliação da acurácia geométrica dos produtos fotogramétricos (Toth; Jozkow; Grejner–Brzezinska, 2015) e a calibração da câmera (Gašparovic; Gajski, 2016 e Yusoff et al, 2017). (Losè, et al, 2020)..

A fotogrametria SfM utiliza câmeras padrão para tomadas de fotos e algoritmos de ajustamento de blocos de imagens que permitem o alinhamento das mesmas, produzem uma nuvem de pontos tridimensional (3D) numa referência 3D relativa ou absoluta (James e Robson, 2012, 2014), permitindo a produção de modelagem 3D de alta resolução e produtos derivados, como modelos digitais e ortofotos. Esses novos desenvolvimentos levaram ao surgimento da fotogrametria SfM como uma alternativa de baixo custo e de

alta resolução às técnicas de levantamento a laser ou às técnicas tradicionais de levantamento topográfico. (Anderson et al., 2019)

Com base na utilização do algoritmo SfM, segundo (Salas López et al., 2022), se pode substituir os métodos convencionais de levantamento, sendo possível obter precisões centimétricas de acordo com a escala de estudo. Para atingir este nível de precisão no mapeamento de áreas urbanas utilizando UAS, é necessária uma elevada sobreposição entre as imagens captadas por georreferenciamento indireto ou direto e, posteriormente, são obtidos modelos fotogramétricos detalhados (Nuvem de Pontos, Modelo Digital de Elevação, Ortofoto).

3.1.2. Uso de plataformas aéreas não tripulada com PPK

Nos últimos anos, o mapeamento e o levantamento topográfico do terreno ou da superfície terrestre têm sido as tarefas mais dinâmicas, eficientes e eficazes para os cartógrafos. Os progressos foram significativos graças ao desenvolvimento da geotecnologia. Os métodos de levantamento remoto (sem contato), ou seja, fotogramétricos, são preferencialmente utilizados para mapear superfícies, incluindo a varredura por radar, a varredura a laser ou a fotogrametria aérea e terrestre. Os métodos de levantamentos fotogramétricos oferecem uma grande quantidade de dados espaciais com acurácia e nível de detalhamentos elevadíssimos, seja de partes ou elementos da superfície da Terra. Os resultados da aquisição de dados desse método são: imagens aéreas, modelos digitais de terreno e de superfície, nuvens de pontos, mapas vetoriais e ortofotos que representam objetos do mundo real. A utilização de veículos aéreos pilotados ou os UASs se tornou atualmente muito popular. Os UASs são preferidos porque são acessíveis e de fácil operação. A sua vantagem reside na minimização do trabalho de campo, aumento de rapidez na aquisição de dados fotogramétricos e, no processamento, traz como resultado, detalhamento e acurácia do mapeamento. Portanto, os UASs são atualmente utilizados em quase todas as disciplinas científicas, técnicas e não técnicas (Kovanič et al., 2023)

Segundo (Cho et al, 2022), na última década, os pequenos sistemas de UAS utilizaram amplamente posicionamentos GNSS e IMUs para a sua estabilidade e navegação. Com o desenvolvimento de dispositivos e redes de navegação, os UAS podem também utilizar a função de *Virtual Reference System* (VRS), o que melhora a

precisão da fotogrametria em comparação com o código de alcance sem informação de correção. Por outro lado, os VRSs não são adequados para utilização quando a distância da linha de base excede os 10 km. Em Kim e Bae (2020) e Taddia et al. (2020) é visto que a precisão melhora com a aplicação do posicionamento PPK. Entretanto, os levantamentos apoiados com GCP, representaram 35% do custo total do mapeamento (Jacobsen, 1991), e o PPK podem reduzir o custo do levantamento terrestre (Tomaščík et al., 2019).

3.2. Métodos de Posicionamento com GNSS

3.2.1. RTK – Real Time Kinematic

O RTK é um método que permite a obtenção de coordenadas precisas em tempo real, através da transmissão de dados de correção de sinais de rádio. Na abordagem RTK, as coordenadas medidas pelo GNSS a bordo são corrigidas com as informações enviadas por uma estação de base em tempo real. A estação de base GNSS pode ser um receptor instalado no terreno ou umas estações geodésicas criada por uma rede de *Continuously Operating Reference Station* (CORSs), cujas correções são enviadas através de um GNSS Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) (Losè; Chiabrando; Tonolo, 2020).

3.2.2. PPK – Pos Processing Kinematic

O método PPK é uma técnica de posicionamento geodésico que utiliza dados GNSS coletados por dois receptores: um fixo (base) e um móvel (rover). As observações simultâneas dos dois receptores possibilitam calcular as duplas diferenças, onde vários erros envolvidos nas observações são reduzidos (Seeber, 2003). Como exemplos, pode-se citar os erros de relógio dos satélites e receptores, erros de relatividade, atraso de hardware de satélites e receptores, erro de canais dos receptores (Monico, 2008).

No levantamento GNSS com método relativo cinemático pós-processado, para obter a precisão e acurácia necessária, por via de regra, está condicionada a solução da ambiguidade, que é o termo usado para representar o número inteiro de ciclos entre o

satélite e o receptor no instante da primeira observação (Blewitt, 1989). Para se realizar o levantamento com GNSS, com alta precisão, de forma rápida ou até mesmo instantânea, é necessário que as ambiguidades sejam solucionadas como vetor composto por números inteiros (solução inteira ou fixa). (Lima et al., 2016)

Para resolver o vetor de ambiguidades pode ser solucionada durante o trajeto, desde que haja tempo suficiente e poucas perdas de ciclo, embora isso possa reduzir a precisão inicial. É importante ter um número suficiente de satélites para garantir redundância e obter uma solução adequada. Com quatro satélites, por exemplo, são obtidas três DDs (Dupla Diferença) por época de dados, correspondendo às correções das coordenadas a serem determinadas. Por sua característica dinâmica, o método PPK é ideal para o estudo das trajetórias obtidas. (Busch, 2022).

Utilizando o método PPK realiza-se o processamento dos dados após a coleta, permitindo uma maior precisão e confiabilidade das coordenadas. Essa técnica é amplamente utilizada em levantamentos aerofotogramétricos, onde a precisão no posicionamento é crucial para a qualidade dos produtos gerados.

3.3 Qualidade de dado geoespacial

Como descrito por Wolf (2014), a acurácia geométrica de uma imagem georreferenciada pode ser avaliada através da avaliação dos resíduos provenientes da transformação, que devem sempre ser calculados e verificados. Resíduos grandes podem indicar erros nas coordenadas medidas da imagem ou do solo. Muitos pacotes de *software* calculam a *Root Mean Square Error* (RMSE) dos resíduos, o que fornece uma indicação nominal da acurácia.

Complementarmente, ET-CQDG, publicada pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agraria (INCRA) e adotada pela Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR), define critérios e procedimentos para aferir a acurácia posicional de produtos geoespaciais digitais, alinhando-se ao Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). O PEC-PCD classifica a acurácia em diferentes categorias (A, B, C e D) para escalas específicas, baseando-se no erro máximo admissível no plano e estabelecendo limites para o erro posicional com 90% de probabilidade. Os valores de tolerância para cada classe e escala encontram-se apresentados na Tabela 1, servindo como referência objetiva para validação de produtos

cartográficos obtidos tanto por métodos convencionais quanto por tecnologias modernas, como fotogrametria digital e sensoriamento remoto. (Brasil, 2016).

O Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984 estabelece as Instruções Reguladoras as Normas Técnicas da Cartografia Brasileira, em que foram utilizados como referência os parâmetros que as constituem e dividem o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) em diferentes classes, considerando 90% de probabilidade (Brasil, 1984). Este Decreto não prevê um número mínimo de pontos de verificação necessários à comprovação da acurácia dos documentos, refletindo os métodos e tecnologias disponíveis à época. (Brasil, 2016).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_t - y_r)^2}{n}}$$

Onde:

y_t – componente de teste

y_r – componente de referência

n – número de amostras

Tabela 1 – Valores de erro médio (EM) e erro padrão (EP), para CQDG em grandes escalas

Tipo	PEC	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000	
		EM	EP	EM	EP	EM	EP	EM	EP
Planimetria	A	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70
	B	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00
	C	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00
	D	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00
Altimetria	A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84
	B	0,50	0,33	0,33	0,20	1,00	0,67	2,50	1,67
	C	0,60	0,40	0,40	0,20	1,20	0,80	3,00	2,00
	D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50

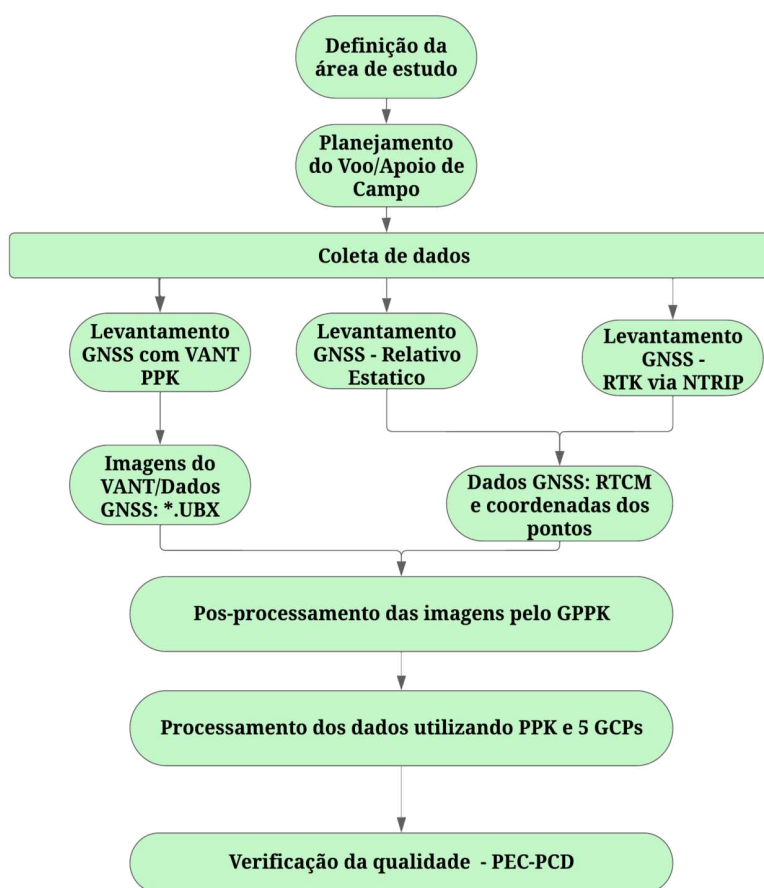
Fonte: Brasil (2016).

4. METODOLOGIA

A metodologia deste estudo foi conduzida em quatro etapas principais visando padronizar um procedimento a ser seguido, conforme mostra o fluxograma da Figura 1.

- (1) Definição da área de estudo;
- (2) Planejamento do mapeamento;
- (3) coleta de dados;
- (4) processamento;

Figura 1 – Fluxograma metodológico



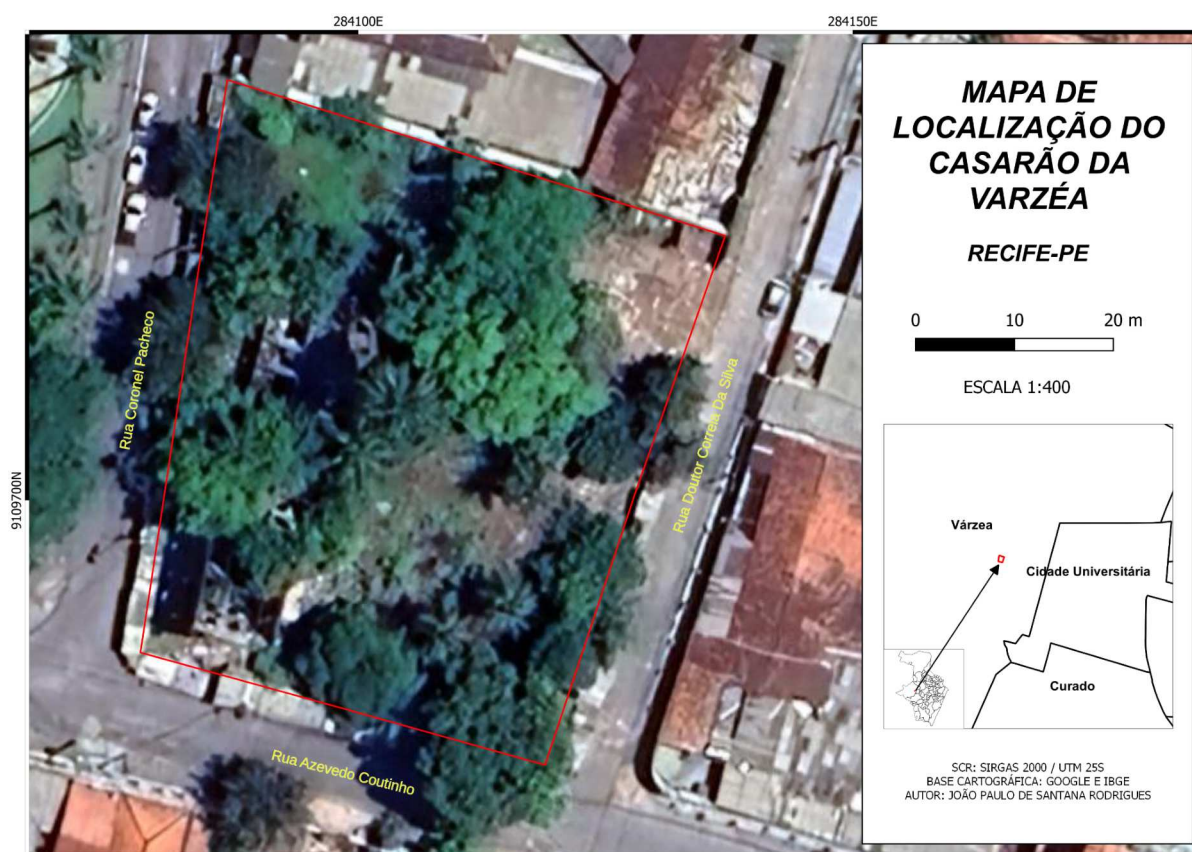
Fonte: Autor (2025).

4.1. Área De Estudo

A área de estudo selecionada para este trabalho é o Casarão da Várzea, localizado no nº 130 da Rua Azeredo Coutinho, no tradicional bairro da Várzea, zona Oeste do

Recife, Pernambuco, como apresentado no mapa de localização da Figura 2. O imóvel possui grande relevância histórica e cultural, sendo classificado como Imóvel de Preservação e incluído no Setor de Preservação Ambiental (SPA), dentro da Zona Especial de Preservação Histórico–Cultural da Praça da Várzea (ZEPH–07), conforme o Plano Diretor do Recife (Lei nº 17.511/2008), apresenta características arquitetônicas e de importância patrimonial, porém com condições de abandono, dificuldades de acesso e em alguns casos de risco que o tornam um caso ideal para aplicação de fotogrametria com UAS utilizando PPK. Em nível de importância cultural e social, esse mapeamento detalhado da área de estudo, entrega detalhes para análise estrutural ou projetos de restauração, justificando o uso de técnicas fotogramétricas com UAS. A fotogrametria aplicada neste contexto permitirá a geração de ortofotos, modelos digitais de superfície (MDS) e nuvens de pontos para análises métricas e qualitativas do imóvel.

Figura 2 - Mapa de localização



Fonte: Autor (2025).

4.2. Planejamento do Voo e Coleta de Dados

O planejamento do voo constitui uma das etapas fundamentais para garantir a qualidade e a confiabilidade dos produtos cartográficos gerados por meio de UAS equipados com PPK. Nessa fase são definidos os parâmetros técnicos que asseguram a adequada cobertura da área de interesse, bem como a otimização do tempo de coleta e a minimização de erros sistemáticos no processo de aquisição das imagens.

Além de considerar aspectos operacionais, como altura de voo, recobrimento longitudinal e transversal, resolução espacial e extensão da área a ser mapeada, o planejamento envolve também a seleção dos materiais e equipamentos empregados. Esses elementos são determinantes para a eficiência do levantamento, uma vez que a performance do sensor embarcado, a confiabilidade do sistema GNSS, a capacidade da plataforma aérea e os softwares de processamento influenciam diretamente na acurácia final dos dados geoespaciais.

Nesse contexto, apresentam-se a seguir os materiais e equipamentos utilizados no levantamento, destacando suas principais características técnicas e a forma como contribuíram para a execução do voo planejado e para a consecução dos objetivos da pesquisa.

4.2.1 Materiais e Equipamentos Utilizados

Para a realização deste trabalho foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- Drone DJI Phantom 4 Advanced, com câmera CMOS de 1" de 20 MP, f/2.8, ISO máximo de 12800 usado para captura das imagens aéreas de alta resolução, variando de acordo com a resolução da câmera e altura de voo (distância da tomada das imagens)
- 1 par de receptores GNSS modelo POLARES S100: utilizado para obter dados de posicionamento com alta precisão geodésica. Trabalha com conexão Android via app Polaris Connect, com RTK via NTRIP, ou como Pós-Processado, pode ser usado como Base ou Rover. Possui dupla frequência (L1, L2), além de ser multi-constelação.
- Kit PPK2 da Guandalini para drone DJI: constituído de um receptor GNSS como o Emilid Reach M+ de dupla frequência (L1/L2) acoplado ao UAS, permitindo o registro

contínuo de dados brutos (*.UBX) para correção pós-processada com precisão centimétrica e a correção pós-processada das coordenadas GNSS sem dependência de estações RTK em tempo real; aplicativo Emild Flow para configuração do levantamento GNSS pelo método PPK, software proprietário GPPK sincroniza automaticamente as coordenadas com os tempos de disparo da câmera.

- Softwares e aplicativos utilizados: DroneDeploy, um aplicativo para planejamento de voos automáticos e processamento de dados de UAS; Pix4DMapper, um software de fotogrametria que emprega algoritmos de SfM, gera nuvens de pontos 3D com precisão centimétrica (James & Robson, 2014), e demais produtos fotogramétricos: MDS, MDT e ortoimagens; QGIS Versão 3.40.8, *software* de código aberto usado para a análise geoespacial e manipulação de dados geográficos; GeoPEC Versão 1.0, *plugin* brasileiro para *software* QGIS especializado em análise da acurácia posicional de produtos cartográficos, amplamente utilizado em topografia, geodésia e fotogrametria com drones.

4.3.1 Planejamento do voo

Na fase de planejamento, foram definidos os parâmetros de voo considerando as características da área de estudo e os requisitos de precisão do projeto no app DroneDeploy. Para o georreferenciamento direto, o drone DJI Phantom 4 Advanced foi equipado com o kit PPK2 Guandalini. Uma estação base GNSS foi estabelecida utilizando um receptor GNSS Polares S100 configurado para registro contínuo de observações nas frequências L1/L2 com taxa de 1 Hertz em um ponto definido, operando simultaneamente para correção diferencial pós-processada. O software proprietário GPPK foi responsável pelo processamento dos dados GNSS dos centros perspectivos da câmera em cada imagem e sincronização temporal com as imagens capturadas, já o Pix4DMapper para o processamento fotogramétrico completo

Os parâmetros utilizados para a aquisição de imagens incluem a altura de voo de 45 metros, que resulta em um *Ground Sample Distance* (GSD) de aproximadamente 1,3 cm/pixel, conforme a relação entre resolução espacial e precisão cartográfica descrita por Wolf (2014). As sobreposições das imagens são definidas, sendo 85% na direção longitudinal e 80% na direção lateral, visando assegurar uma reconstrução 3D eficiente durante o processamento fotogramétrico e minimizar possíveis falhas no modelo gerado. A altura do plano de voo foi otimizada para evitar obstáculos como edificações e

vegetação alta, garantindo a segurança da operação, considerando ainda o GSD. A velocidade do UAS foi configurada em 3 m/s, de modo a equilibrar a eficiência operacional com a qualidade das imagens captadas, evitando borramentos. A câmera foi posicionada em ângulo nadiral, ou seja, a 90° em relação ao solo, garantindo uma cobertura vertical uniforme da área de interesse. A Figura 3 apresenta a configuração dos parâmetros de voo na interface do DroneDeploy. No app é gerada automaticamente a grade de voo necessária para cobrir toda a área de estudo.

Figura 3 – Parâmetros de voo no DroneDeploy



Fonte: Autor (2025).

Após a definição do plano de voo, planejou-se a distribuição dos pontos de verificação em locais estratégicos de fácil acesso e com boa visibilidade nas imagens a fim de validar a acurácia posicional dos dados.

4.3.2 Coleta de dados, processamentos do apoio terrestre e correção do PPK

Para a coleta de dados no levantamento aerofotogramétrico foi utilizado o UAS DJI Phantom 4 Advanced acoplado com o Kit PPK 2 da Guandalini (Figura 4), onde foram obtidas as coordenadas da tomada das fotos fazendo uso de um fotosensor que identifica o disparo dessas fotos e relacionando esse as coordenadas obtidas.

Para realizar o levantamento aerofotogramétrico PPK, foi instalada uma estação base GNSS Polaris S100. Esta é a referência para utilização na etapa do pós-processamento. Ela foi posicionada num ponto definido na área de voo conforme

apresentado na Figura 5. Este procedimento é realizado com o método de levantamento relativo estático, onde ficou realizando rastreo por uma hora.

Figura 4 – DJI Phantom 4 Advanced com Kit PPK2



Fonte: Autor (2025).

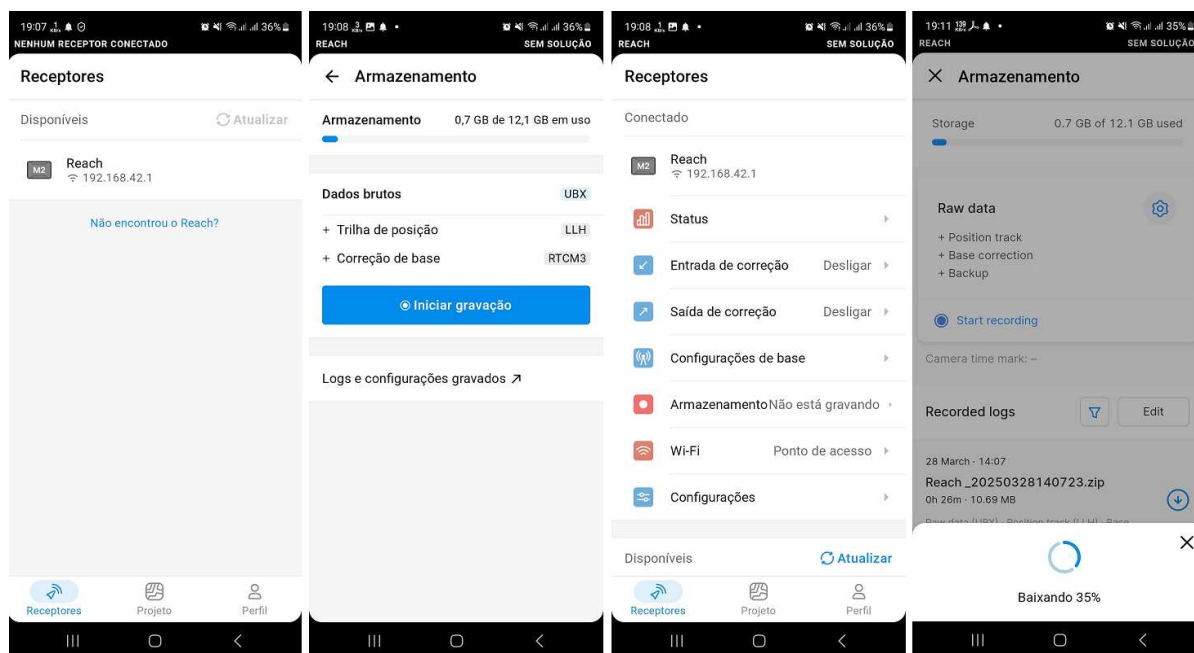
Figura 5 – POLARIS S100 utilizado como Estação Base



Fonte: Autor (2025).

A aquisição dos dados brutos das observações GNSS do UAS com o suporte do kit PPK2 foi realizada com Emlid Flow, cuja Figura 6 apresenta as janelas de abertura e suas funcionalidades do aplicativo.

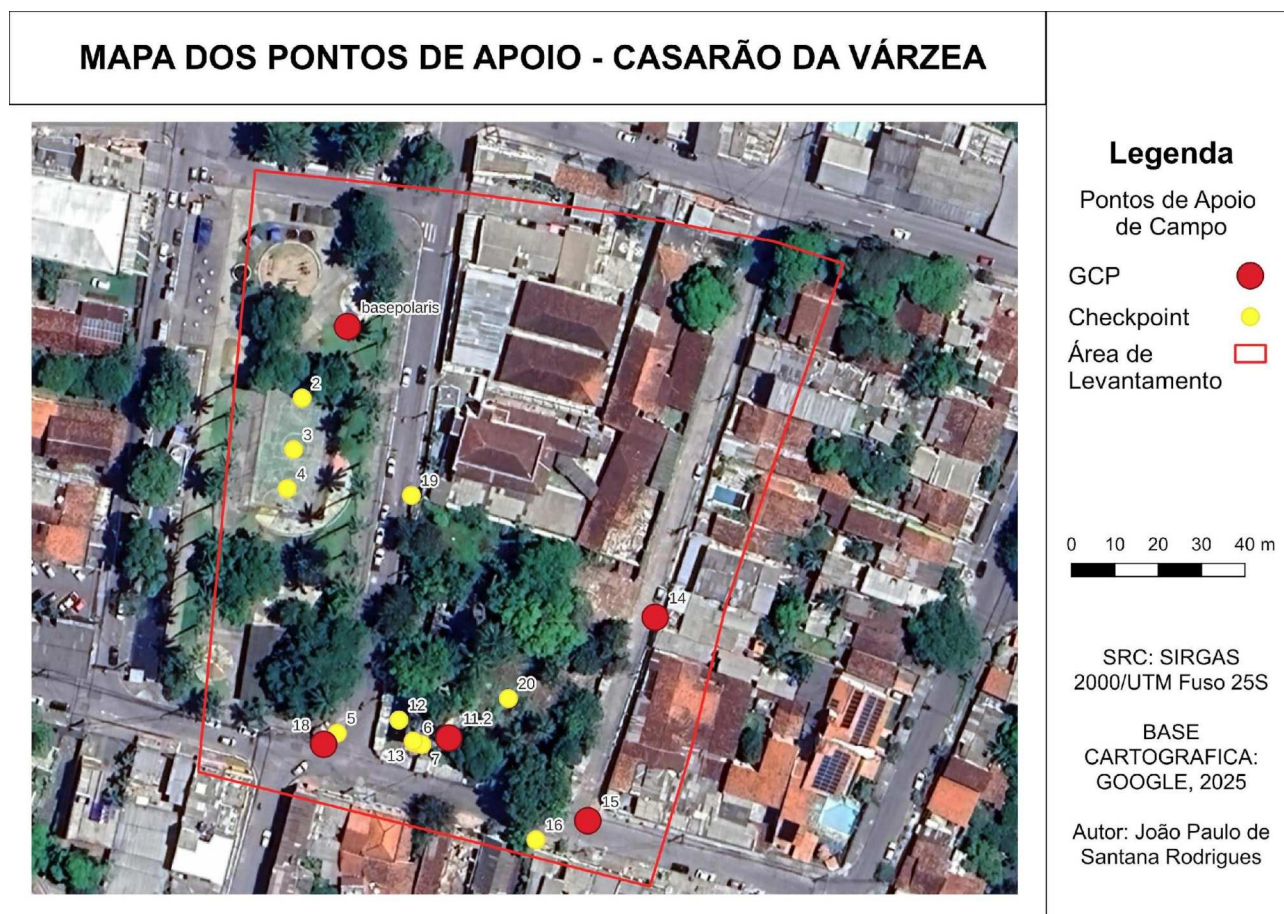
Figura 6 – Emlid Flow



Fonte: Autor (2025).

Para a etapa de controle de qualidade dos produtos fotogramétricos de ambas as técnicas a serem comparadas, foram levantados 15 pontos de apoio terrestre utilizando método RTK via NTRIP, com os receptores Polares S100 conforme apresentado na figura 7. Como base para esse levantamento foi utilizado a base do IBGE-RBMC, PERC (IBGE, 2025), localizada no Instituto Federal de Pernambuco, as componentes verticais de todos os pontos foram transformadas de altitude geométrica para altitude normal utilizando o modelo HGEOHNOR2020. Dos 15 pontos, 5 deles foram separados e usados como GCPs para a realização do georreferenciamento indireto.

Figura 7 – Planejamento do Apoio de Campo



Fonte: Autor (2025).

4.3.3 Processamento de dados do Voo

Nesta etapa foram realizados dois tipos de processamento: uso de pontos de controle e georreferenciamento direto. Ambos os processamentos, utilizou-se o software Pix4dMapper. Neles, foram configurados os parâmetros do processamento das três etapas: *innitial processing*, *Point Cloud and Mesh* e *DSM Orthomosaic and Index*, conforme Tabela 2, com os parâmetros configurados.

Tabela 2 – Parâmetros de processamento – Pix4DMapper.

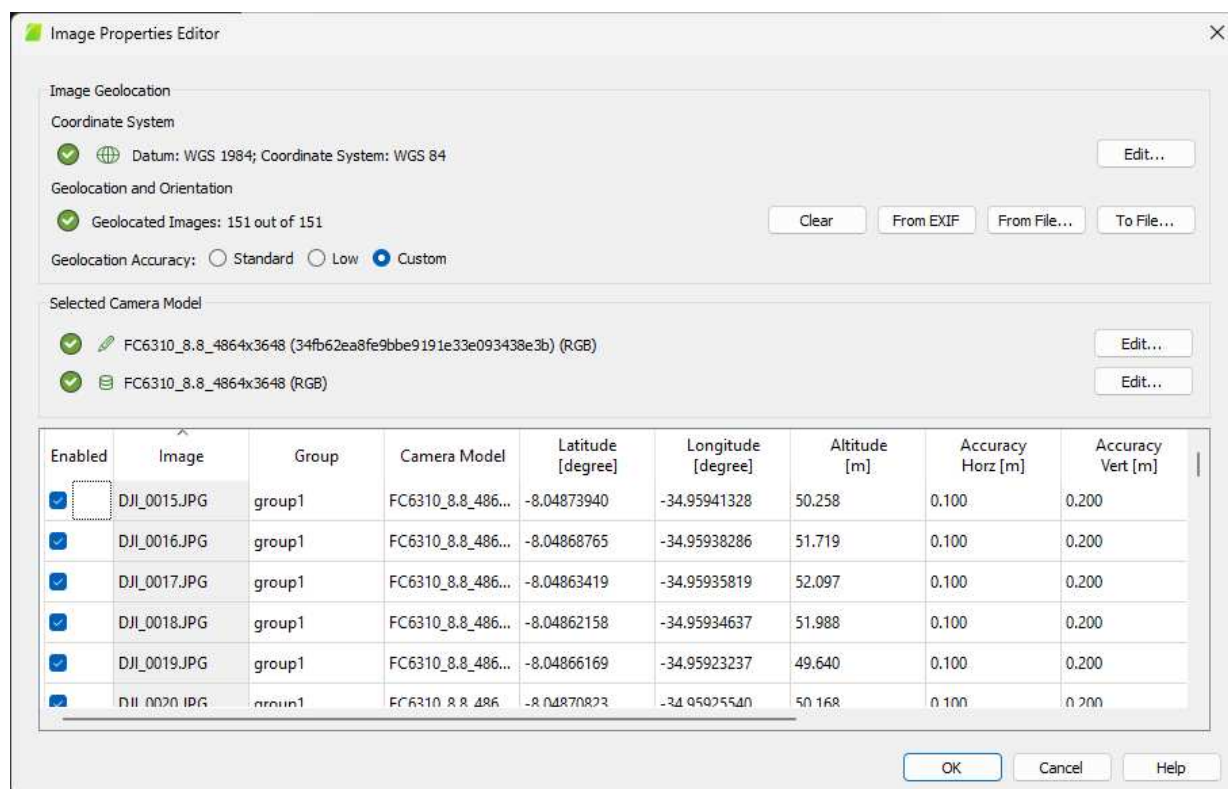
ETAPA	PARÂMETRO	VALOR SELECIONADO
Initial Processing	Keypoint Image Scale	Full
	Matching Image Pairs	Aerial Grid
	Targeted Numbers Keypoints	Automatic
	Calibration Method	Standart

	Internal parameters optimization	All
	External parameters optimization	All
Point Cloud and Mesh	Image Scale	Original Size
	Point Density	Optimal
	Minimum Number of Matches	4
	3D Texture Mesh	High Resolution
	Point Cloud Matching Windows Size	9x9
DSM, Orthomosaic and Index	Resolution	Automatic
	DSM Filters – Noise Filtering	Yes
	DSM Filters – Surface Smoothing	Sharp
	DSM Raster – Method	inverse Distance Weighting

Fonte: Autor (2025).

No processamento, as acurácias das coordenadas das imagens utilizadas foram automaticamente definidas pelos softwares utilizando como base os metadados das mesmas. No processamento com 5 GCPs, a acurácia horizontal foi de 5 metros e a vertical de 10 metros. Já para o processamento PPK, a acurácia horizontal foi de 10 centimétricos e a vertical de 20 centimétricos, conforme figura 8.

Figura 8 – Parâmetros das imagens utilizadas para processamento com PPK.

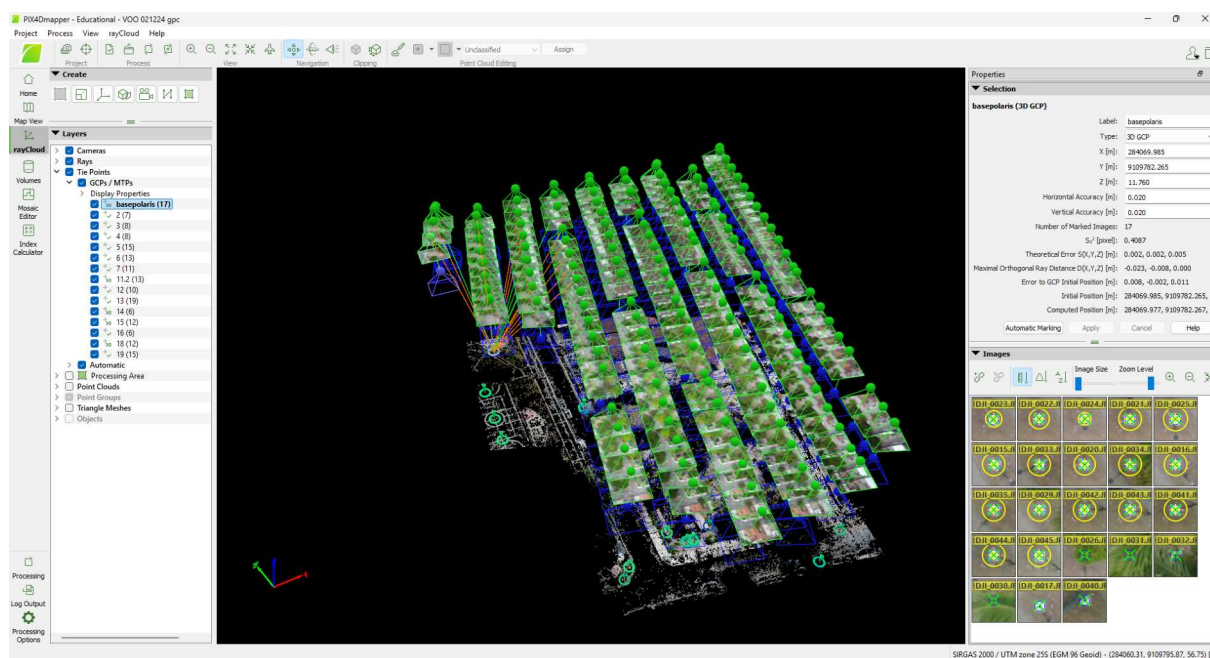


Fonte: Autor (2025).

4.3.3.1 Processamento utilizando 5 GCPs

Para o processamento das imagens usando GCPs, foram importadas o arquivo TXT das coordenadas, sendo N, E e H. Esse arquivo, é usado no software Pix4D para a devida marcação/medição dos pontos, conforme Figura 9 que mostra que no canto esquerdo, pode verificar a lista de pontos. São selecionados os 5 pontos como GCPs e os demais como pontos de verificação denominada como o georreferenciamento indireto. Essa abordagem visa obter os parâmetros de orientação exterior ajustadas, e um relatório de estatística gerado automaticamente pelo *software* onde contém informações sobre a qualidade do processamento, apresentando, por exemplo, o desvio padrão, média de erro e o RMSE de cada componente da coordenada (N, E e H) resultante do ajustamento usando os GCPs e as diferenças de coordenadas dos pontos de verificação e do resultado do processamento.

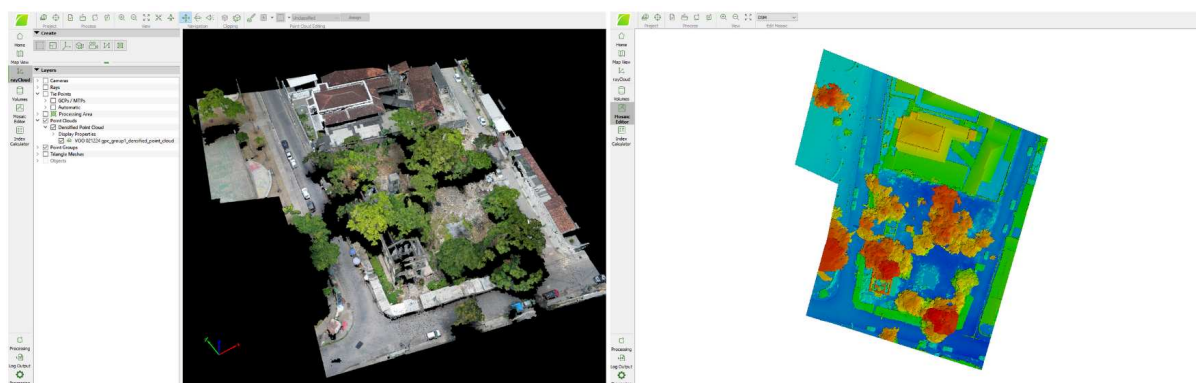
Figura 9 – Exemplo de marcação dos GCPs no Pix4DMapper.



Fonte: Autor (2025).

O processamento continua, após a verificação da qualidade da etapa, gerando-se a nuvem densa de pontos, como ilustrado na Figura 10. Nela, tem-se do lado esquerdo apresenta-se o modelo 3D texturizado (*Mesh*) importante para aferições de feições das fachadas da edificação, e a direita o MDS que é produzido na terceira etapa e última etapa do processamento, que também é obtido o ortomosaico.

Figura 10 – Nuvem de Pontos e MDS apresentados Pix4DMapper.



Fonte: Autor (2025).

4.3.3.2 Processamento utilizando método PPK

No processamento utilizado o Kit PPK 2, antes da entrada dos dados no software Pix4DMapper, foram realizados os seguintes procedimentos:

- a) Após o levantamento de campo, os dados brutos do GNSS da estação base Polaris S100, foram processados utilizando o método de Posicionamento por Ponto Preciso - serviço online gratuito para o pós-processamento de dados (IBGE-PPP, 2025) e são obtidas as coordenadas da estação base.
- b) Em seguida, usando o *software* GPPK, ajustou-se às coordenadas obtidas no PPK. Ambos os dados/coordenadas do Kit PPK 2 exportados utilizando o Emlid Flow e da estação base utilizando o Polaris Connect, foram utilizados para ajustamento das coordenadas de cada uma das imagens obtidas no voo, ou seja, nesta operação, foram obtidas as coordenadas dos centros perspectivos (X_c , Y_c , Z_c) ajustadas em relação a base de referência, portanto, cada imagem possui seus parâmetros de orientação exterior. No ambiente do *software* GPPK, as coordenadas ficam indexadas na forma de metadados.

As Figuras 11 e 12 mostram as interfaces do software utilizado. Na Figura 9, são apresentados os dados tabulares que podem ser verificados a qualidade do processamento GNSS: desvio padrão (DP) de cada componente da coordenada, X, Y, Z, a correção da ondulação geoidal e se a ambiguidade da fase portadora foi resolvida ou não, isto é, se indicar solução fixa, significa maior precisão na solução. Na Figura 10, apresenta o gráfico da situação das posições dos centros de perspectivos ajustados.

Figura 11 – Interface do software GPPK, processamento e ajustamento das imagens aéreas utilizando o método PPK.

GUANDALINI PPK - Versão 2.1.0.105

Abrir Projeto Ajuda

Tipo de Montagem | Processamento GPS | Resultado do Processamento | Imagens do drone | Gráfico | Sobre

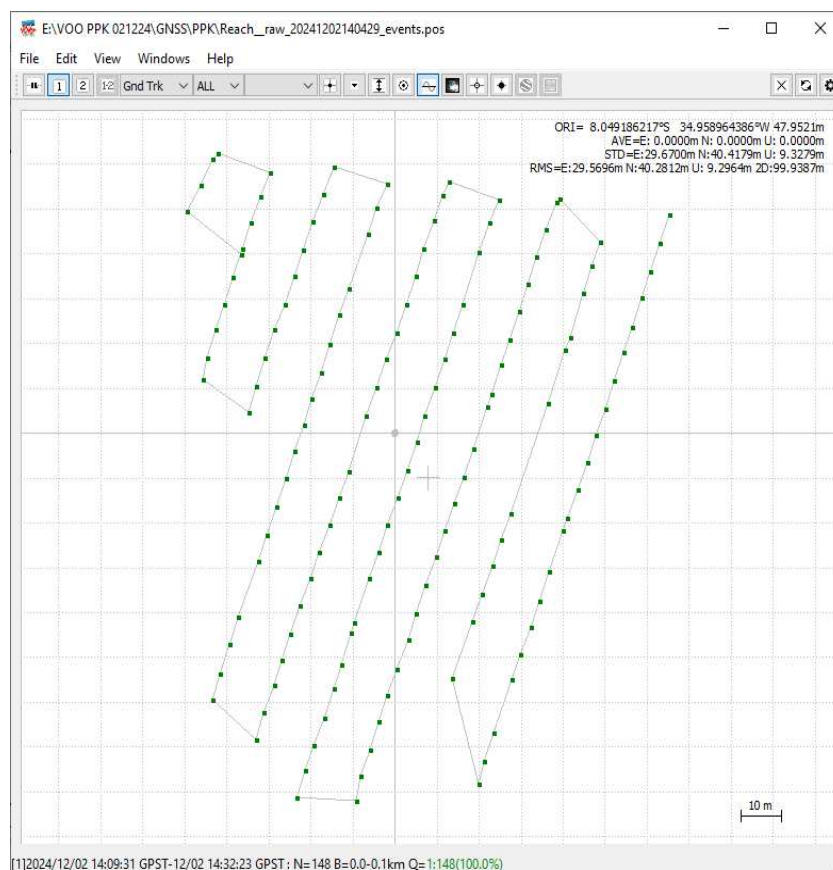
Próximo passo >>> | Abrir RTK PLOT | Abrir RTK CONV | Abrir RTK POST | Abrir events.pos | Carrega Resultados

Id	Latitude	Longitude	Cota	Data e Hora	UTM E	UTM N	DP N	DP E	DP U	GEOIDE	Qualidade
1	-8.000741959	-34.938608659833	164.9685	2025/07/15 16:14:14.222	286327.8305	9115116.8492	0.0032	0.0030	0.0104	-5.6100	Fixo
2	-8.000774531	-34.9386139079833	164.7855	2025/07/15 16:14:16.189	286327.2685	9115113.2434	0.0034	0.0030	0.0104	-5.6100	Fixo
3	-8.000875808	-34.9386127039833	164.3504	2025/07/15 16:14:18.135	286327.4540	9115102.0415	0.0034	0.0030	0.0104	-5.6100	Fixo
4	-8.00102495100833	-34.9386104029833	163.9168	2025/07/15 16:14:20.132	286327.7855	9115085.5456	0.0034	0.0027	0.0104	-5.6100	Fixo
5	-8.00116682700833	-34.9386073509833	163.631	2025/07/15 16:14:22.116	286328.1959	9115069.8539	0.0034	0.0030	0.0104	-5.6100	Fixo
6	-8.00131139500556	-34.9386086179833	163.2931	2025/07/15 16:14:24.113	286328.1316	9115053.8622	0.0033	0.0025	0.0103	-5.6100	Fixo
7	-8.00145440900555	-34.9386087239833	162.8796	2025/07/15 16:14:26.108	286328.1944	9115038.0429	0.0033	0.0031	0.0104	-5.6100	Fixo
8	-8.00159674100556	-34.9386088499833	162.3955	2025/07/15 16:14:28.094	286328.2548	9115022.2991	0.0034	0.0032	0.0104	-5.6100	Fixo
9	-8.00174013900555	-34.9386075429833	161.9189	2025/07/15 16:14:30.085	286328.4735	9115006.4381	0.0033	0.0033	0.0104	-5.6100	Fixo
10	-8.00188301000278	-34.9386089109833	161.3565	2025/07/15 16:14:32.088	286328.3972	9114990.6341	0.0033	0.0027	0.0104	-5.6100	Fixo
11	-8.00202577400278	-34.9386086179833	160.6564	2025/07/15 16:14:34.084	286328.5039	9114974.8427	0.0035	0.0034	0.0104	-5.6100	Fixo
12	-8.00216839400556	-34.9386087909833	160.0436	2025/07/15 16:14:36.067	286328.5591	9114959.0670	0.0033	0.0032	0.0103	-5.6100	Fixo
13	-8.002311119	-34.9386088819833	159.3916	2025/07/15 16:14:38.056	286328.6235	9114943.2797	0.0032	0.0028	0.0104	-5.6100	Fixo
14	-8.002455647	-34.9386092179833	158.859	2025/07/15 16:14:40.053	286328.6618	9114927.2929	0.0031	0.0029	0.0104	-5.6100	Fixo
15	-8.002598576	-34.9386086699833	158.4354	2025/07/15 16:14:42.032	286328.7967	9114911.4834	0.0033	0.0028	0.0104	-5.6100	Fixo
16	-8.00274083400555	-34.9386063449833	158.163	2025/07/15 16:14:44.028	286329.1272	9114895.7491	0.0031	0.0031	0.0104	-5.6100	Fixo
17	-8.00288305500833	-34.9385786599833	157.6716	2025/07/15 16:14:46.041	286332.2499	9114880.0320	0.0033	0.0027	0.0104	-5.6100	Fixo
18	-8.00301792400556	-34.9385338699833	157.1099	2025/07/15 16:14:48.026	286337.2627	9114865.1370	0.0031	0.0027	0.0103	-5.6100	Fixo
19	-8.00315422000555	-34.9384878899833	156.5507	2025/07/15 16:14:50.021	286342.4035	9114850.0848	0.0036	0.0030	0.0104	-5.6100	Fixo
20	-8.00328966400555	-34.9384418529833	156.344	2025/07/15 16:14:52.015	286347.5501	9114835.1269	0.0032	0.0031	0.0104	-5.6100	Fixo
21	-8.003424474	-34.9383961739833	156.1178	2025/07/15 16:14:53.991	286352.6569	9114820.2389	0.0033	0.0030	0.0104	-5.6100	Fixo
22	-8.00356241800555	-34.9383487659833	155.9036	2025/07/15 16:14:56.023	286357.9559	9114805.0052	0.0033	0.0030	0.0103	-5.6100	Fixo

Licença: 0296

Fonte: Autor (2025).

Figura 12 – Interface do software GPPK, janela de visualização da situação do ajustamento das imagens aéreas utilizando o método PPK.



Fonte: Autor (2025).

Ainda no *software* GPPK, uma vez verificada a qualidade do processamento, na aba “imagens do drone”, conforme Figura 13, pôde-se verificar as imagens com as coordenadas ajustadas e devidamente inseridas no seu metadado. Esses dados ficam armazenados numa pasta chamada “ajustadas”. Nela, são encontrados todos os arquivos de imagens com seus centros de perspectivas corrigidos.

Figura 13 – Interface do software GPPK, correção das coordenadas no centro de perspectivas das imagens.

GUANDALINI PPK - Versão 2.1.0.107

Abrir Projeto Ajuda

Tipo de Montagem | Processamento GPS | Resultado do Processamento | **Imagens do drone** | Gráfico | Sobre

Método de Mesclagem
☐ Sequencial ☐ Diferença de Tempo ☐ Diferença de Coordenadas ☒ Interpolação de Distância Média
 Ordenar Fotos:
☒ Por Nome ☐ Por Data/hora

Tolerância (Seg) 1.5 Tolerância Dist 15 ☒ Aplicar correções das inclinações do drone ☐ Interpolar até 3 falhas seguidas na marcação GPS
 Precisão a ser exportada:
☒ Rígidez ☐ Desvio Padrão do GPS

Arquivo de Calibração da Câmera

Abrir diretório das Imagens E:\V00 PPK 021224\IMG\Nova pasta

Gravar coordenada para Ponto de Controle Exportar Arquivo KML (Google Earth) Copiar e Atualizar Coordenadas das Imagens Exportar Arquivo de Coordenadas

Arquivo Foto	Latitude Foto	Longitude Foto	Cota Foto	Data e Hora foto	ID GPS	Data e Hora GPS	Latitude GPS	Longitude GPS	Cota GPS	Rígidez	DP
DJI_0014.JPG	-8.0487815	-34.9592513055556	-5.6840	2024/12/02 11:22:32	1	2024/12/02 14:09:31	-8.048825962452	-34.95929589764	11.8211	0.10	0.00
DJI_0015.JPG	-8.0487144444444	-34.9593954444444	39.5670	2024/12/02 11:23:30	2	2024/12/02 14:13:01	-8.048826568191	-34.95929609630	11.8063	0.10	0.00
DJI_0016.JPG	-8.04866786111111	-34.9593655555556	39.3670	2024/12/02 11:23:33	3	2024/12/02 14:14:27	-8.048826262561	-34.95929599934	11.8219	0.10	0.00
DJI_0017.JPG	-8.04860480555556	-34.9593379166667	39.7670	2024/12/02 11:23:37	4	2024/12/02 14:18:24	-8.048826326233	-34.95929606062	11.8150	0.10	0.00
DJI_0018.JPG	-8.04858952777778	-34.9593292222222	39.6670	2024/12/02 11:23:38	5	2024/12/02 14:20:10	-8.048826117236	-34.95929634343	11.8250	0.10	0.00
DJI_0019.JPG	-8.0486205	-34.9592081388889	38.6670	2024/12/02 11:23:45	6	2024/12/02 14:22:00	-8.04882584565	-34.95929556861	11.8119	0.10	0.00
DJI_0020.JPG	-8.04865663888889	-34.9592271111111	39.1670	2024/12/02 11:23:47	7	2024/12/02 14:22:51	-8.048825897852	-34.95929600258	11.8097	0.10	0.00
DJI_0021.JPG	-8.04872619444444	-34.9592523611111	39.3670	2024/12/02 11:23:50	8	2024/12/02 14:23:48	-8.048738818288	-34.95941330727	55.9042	0.10	0.00
DJI_0022.JPG	-8.04877891666667	-34.9592714166667	39.5670	2024/12/02 11:23:53	9	2024/12/02 14:23:51	-8.048687380380	-34.95938305558	57.3577	0.10	0.00
DJI_0023.JPG	-8.04883447222222	-34.9592896666667	39.2670	2024/12/02 11:23:57	10	2024/12/02 14:23:55	-8.048633990816	-34.95935830219	57.7339	0.10	0.00
DJI_0024.JPG	-8.04888561111111	-34.9593080277778	39.3670	2024/12/02 11:24:00	11	2024/12/02 14:23:56	-8.048621584783	-34.95934622380	57.5994	0.10	0.00
DJI_0025.JPG	-8.04893852777778	-34.9593271388889	39.4670	2024/12/02 11:24:03	12	2024/12/02 14:24:03	-8.048661634191	-34.95923289878	55.2748	0.10	0.00
DJI_0026.JPG	-8.04899225	-34.9593453888889	39.3670	2024/12/02 11:24:06	13	2024/12/02 14:24:06	-8.048708199225	-34.95925544992	55.7941	0.10	0.00
DJI_0027.JPG	-8.04904658333333	-34.9593626666667	39.4670	2024/12/02 11:24:09	14	2024/12/02 14:24:09	-8.048762304180	-34.95927491796	55.6450	0.10	0.00

Licença: 0296

Fonte: Autor (2025).

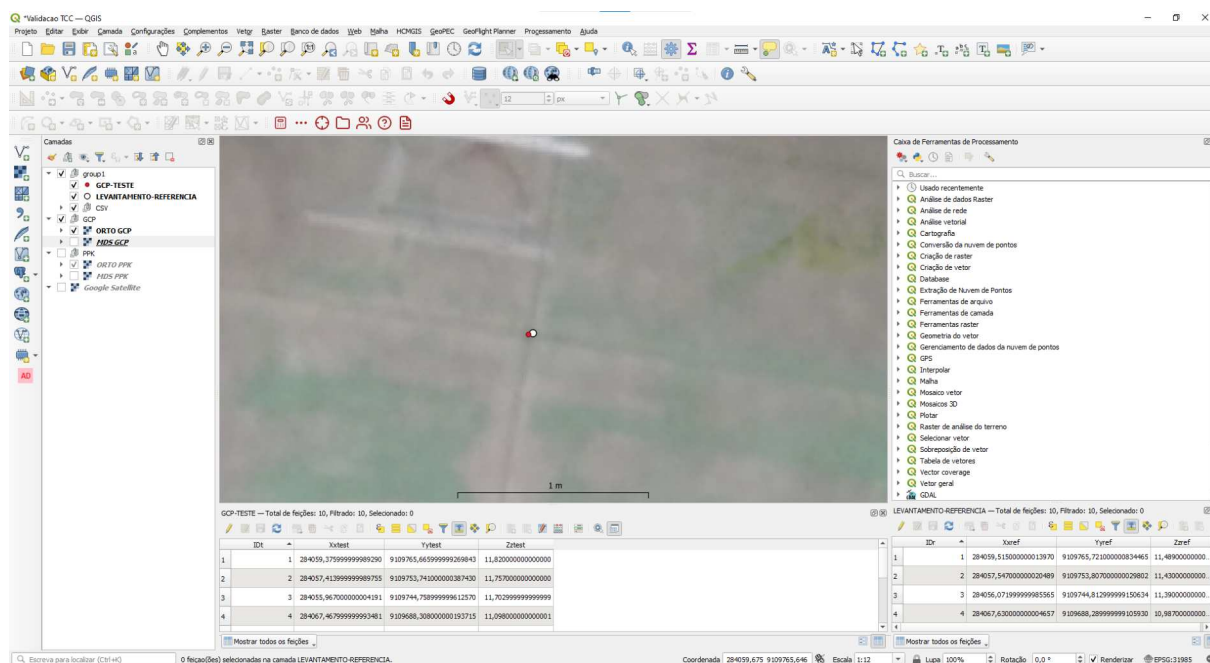
Após obtidas as imagens corrigidas, utiliza-se os mesmos parâmetros de processamento citados anteriormente na seção 4.3.3.1 no *software* Pix4DMapper para gerar todos os insumos cartográficos, como nuvem de pontos, MDS e ortomosaico. Durante o processamento foram inseridos os pontos levantados, marcados como pontos de verificação para a produção do relatório de estatística, onde verifica-se a qualidade dos produtos.

4.3.3.3 Análise de qualidade

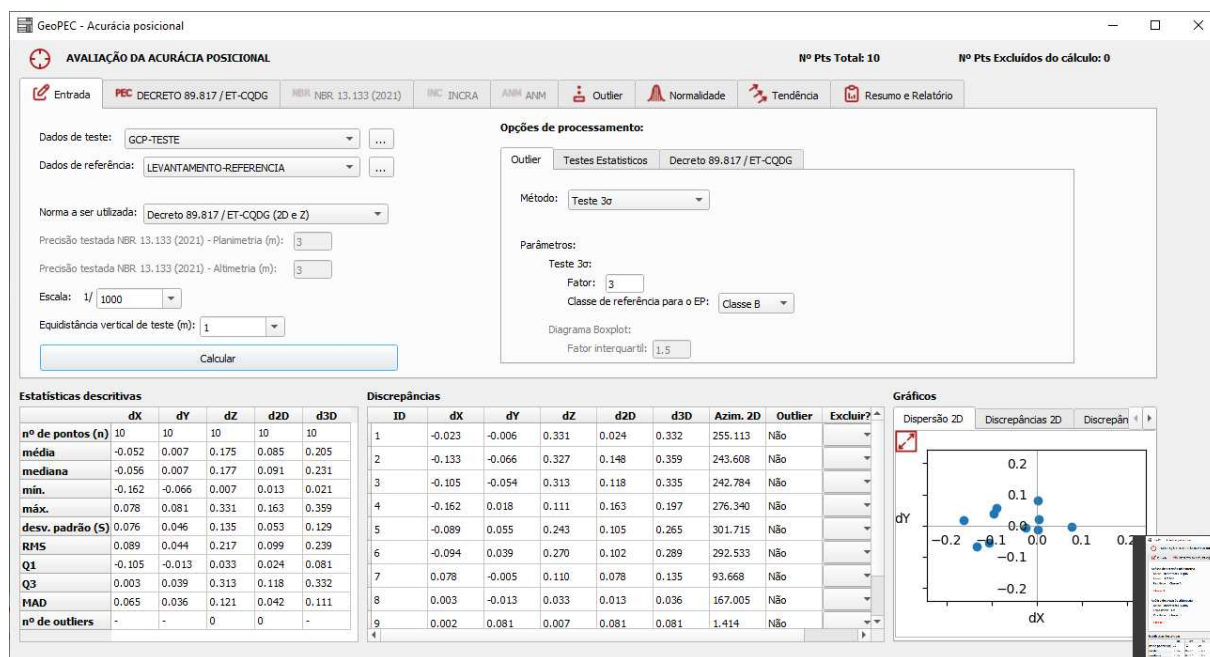
Ao final dos dois processamentos, utilizando 5 GCPs e o PPK, foram obtidos os insumos e produtos geoespaciais gerados, verificou-se a qualidade posicional dos mesmos, utilizando o *plugin* GeoPEC versão 1.0, onde foram usados 10 pontos de verificação medidos em campo são usados para avaliar a qualidade do conjunto de insumos e produtos geoespaciais resultantes do método PPK. Já nos produtos gerados por meio do método PPK, todos os pontos de apoio foram utilizados como pontos de verificação. Essa verificação de qualidade posicional, foi apoiada na especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (Brasil, 2016), visando analisar a acurácia do produto para a escala de 1/1000, seguindo todas as especificações dela. é definido na norma que os pontos de verificação devem ter precisão três vezes superior ao produto avaliado (Brasil, 2016).

Contudo, o *plugin* GeoPEC versão 1.0, foi testado com Software QGIS versão 3.40.8 com o intuito de aplicá-lo durante o procedimento. Após ser obtidas as coordenadas dos pontos a serem aferidos a partir dos produtos geoespaciais oriundos do processamento, isto é, ortomagem e MDS, foi utilizado o *plugin* para realizar o cálculo das estatísticas e geramos o relatório de qualidade de acordo com a norma, como é representado nas figuras abaixo. A Figura 14 apresenta um exemplo de um dos momentos da utilização da ferramenta de vetorização de camadas para gerar os pontos de testes, onde as componentes das coordenadas E e N foram obtidas através do ortomosaico e a componente H é extraída a partir do MDS. Esses pontos são salvos em uma camada *shapefiles*. As figuras 15 e 16 demonstram a interface do *plugin* GEOPEC para avaliar estatisticamente a qualidade dos produtos. Após, a verificação da acurácia posicional e verificação da classe de enquadramentos dos produtos, é realizada a exportação dos dados resultantes em formato PDF.

Figura 14 – Vetorização dos pontos de teste no QGIS.

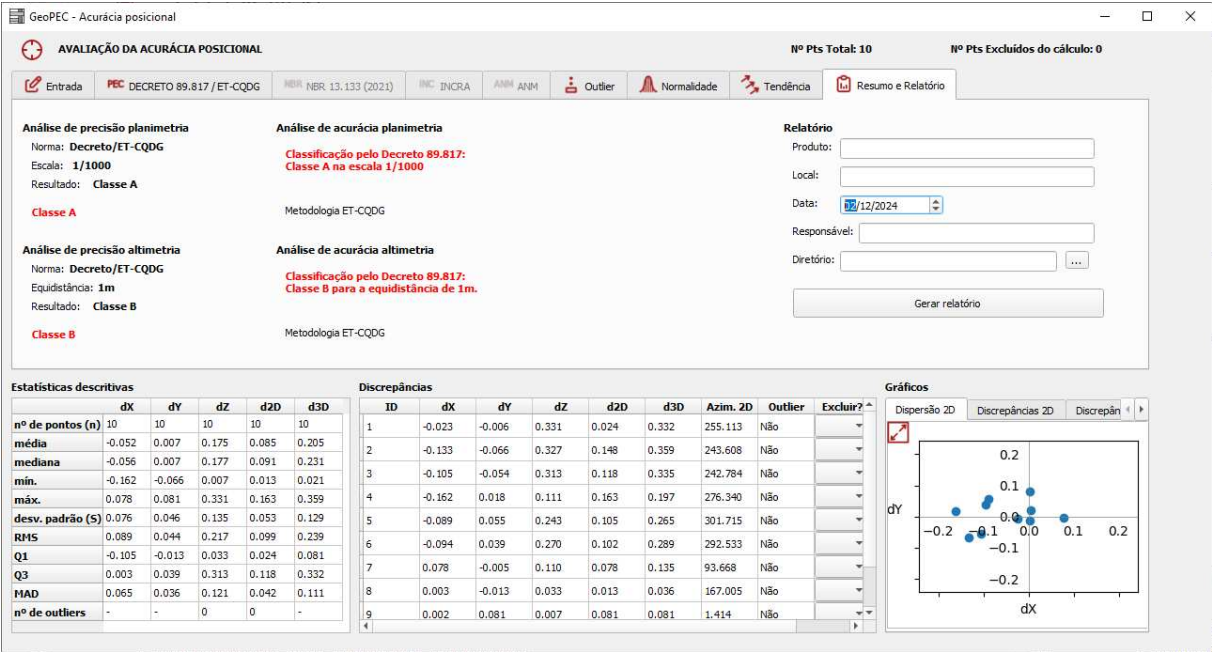


Fonte: Autor (2025).

Figura 15 – Avaliação da Acurácia utilizando *plugin* GeoPEC no QGIS.

Fonte: Autor (2025).

Figura 16 – Resultado da avaliação de Acurácia utilizando o GeoPEC.



Fonte: Autor (2025).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados deste trabalho, onde encontra-se a acurácia posicional dos dois tipos de levantamentos utilizados comparando-os. O procedimento desenvolvido neste trabalho buscou realizar todas as etapas de forma a obter a melhor acurácia possível limitados a altura de voo e a precisão da coleta dos pontos. O levantamento geodésico foi realizado de acordo com a seção 4.3.2. Após o processamento dos dados GNSS pelo serviço IBGE-PPP, como pelos dados resultando nas coordenadas da estação base, bem como os dados de coordenadas dos pontos de apoio obtidos através de método RTK via NTRIP. A tabela 3 apresenta a totalidade dos pontos levantados na área de estudo e as suas coordenadas no sistema de referência SIRGAS 2000 projeção UTM Fuso 25S.

Tabela 3 – Coordenadas dos Pontos do Apoio de Campo em metros

Nome	E	N	H
basepolaris	284069.985	9109782.265	11.760
2	284059.515	9109765.721	11.489
3	284057.547	9109753.807	11.430
4	284056.072	9109744.813	11.390
5	284067.630	9109688.290	10.987
6	284085.275	9109686.124	11.552
7	284087.132	9109685.666	11.595
11	284093.379	9109687.184	12.030
12	284081.873	9109691.325	12.135
13	284085.195	9109686.466	11.884
14	284141.006	9109715.071	10.968
15	284125.460	9109668.043	10.711
16	284113.481	9109663.629	10.818
18	284064.497	9109685.701	11.044
19	284084.743	9109743.247	11.230

Fonte: Autor (2025).

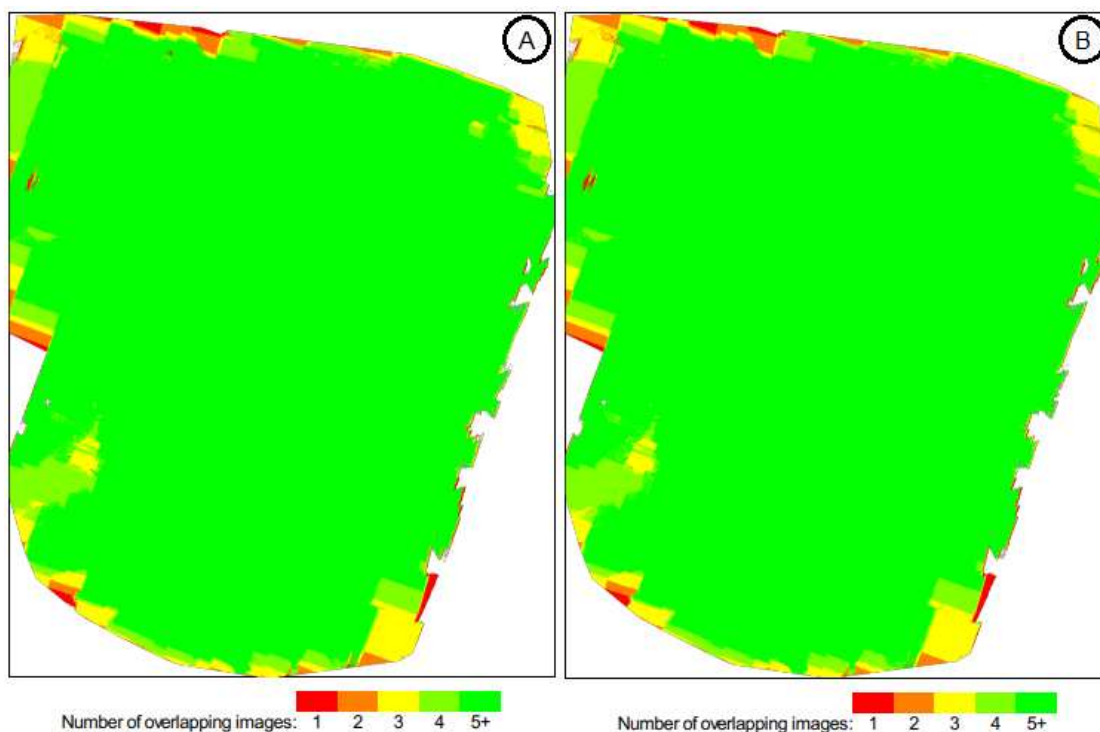
Entre os dois tipos de métodos (GCP e PPK) a diferença fundamental reside na estratégia de georreferenciamento: um processamento adotou 5 GCPs e 10 pontos de verificação, sem uso de dados PPK (posições e rotações dos parâmetros exteriores da câmera), e o outro processamento utilizou exclusivamente coordenadas PPK embarcadas, sem GCPs, apenas pontos de verificação. O sistema de referência adotado foi o SIRGAS 2000 / UTM Fuso 25S, em conformidade com os padrões cartográficos

oficiais do Brasil. Ambos os processamentos aerofotogramétricos foram realizados sobre a mesma área de estudo, mesma câmera RGB embarcada (FC6310_8.8_4864x3648) e os mesmos parâmetros de processamento.

No processamento de ambos os dados, foi obtido um GSD médio de 1,16 cm/pixel. As sobreposições de imagens foram consideradas adequadas em toda área de levantamento como demonstrado na Figura 17, resultante do relatório de qualidade do processamento, que informa que a cobertura de imagens foi satisfatória para a geração dos produtos (área em verde, com mais de 5 imagens sobrepostas).

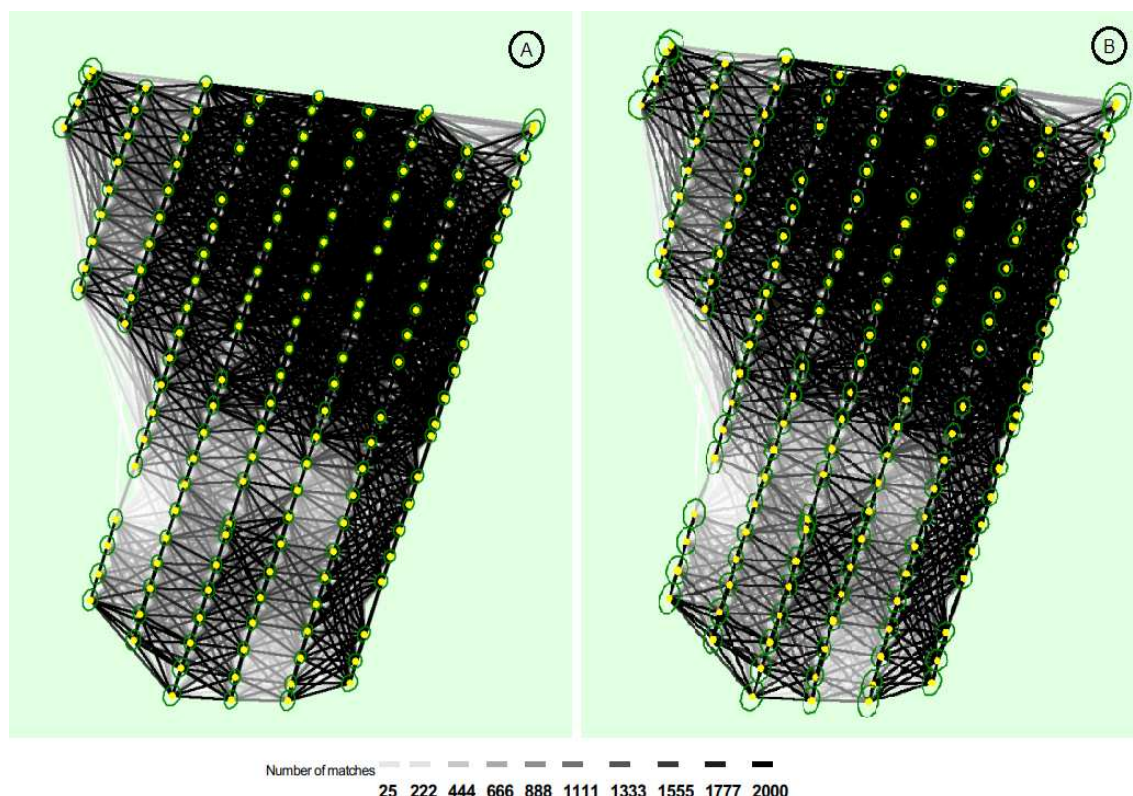
Quanto a correspondência dos pontos-chaves 2D entre imagens, a Figura 18, demonstrou que as quantidades de *pixels* correlacionados entre cada imagens, foram satisfatórias em algumas áreas (quanto mais escuro maior a identificação de pontos/*pixels* correspondentes). Feixes claros representam uma ligação fraca entre as imagens. As áreas em cinza claro, são justamente as áreas encobertas pela vegetação e que foi tratada no trabalho do Waldson Lemos, 2025.

Figura 17 – Número de sobreposições de imagens computadas para cada pixel do ortomosaico, (a) 5 GCPs e (b) PPK.



Fonte: Autor (2025).

Figura 18 – Posições das imagens computadas com ligações entre imagens correspondentes, (a) 5 GCPs e (b) PPK.



Fonte: Autor (2025).

Quanto ao RMSE, essa verificação possibilitou a comparação direta entre a acurácia proporcionada pelos dois métodos, GCPs e a acurácia derivada do PPK, em contextos urbanos, numa área de difícil acesso. A Tabela 4, mostra a comparação da acurácia geral do georreferenciamento utilizando o RMSE por componentes de coordenadas X, Y e Z. Observa-se que entre elas, tem-se diferenças em X de 1,3 cm, em Y de 0,7 cm e em Z de 5 cm.

Tabela 4 – Valores de RMSE dos processamentos

Levantamento/ Georreferenciamento	RMSE _x (m)	RMSE _y (m)	RMSE _z (m)	RMSE _{2D} (m)	RMSE _{3D} (m)
5 GCPs	0,099	0,047	0,217	0,109	0,243
PPK	0,086	0,069	0,271	0,110	0,293

Fonte: Autor (2025).

Quanto a uma análise estatística quanto à acurácia posicional realizado no GeoPEC, na planimetria os insumos cartográficos dos 2 processamentos estão acurados de acordo com a ET-CQDG, classificados como Classe A na planimetria em escala 1/1000 e Classe B na altimetria. Nos dois processamentos apresentam tendência nas componentes Z das coordenadas. No entanto, o processamento com GCPs entregou uma melhor acurácia em relação ao método com PPK, apresentando um aumento de precisão e de acurácia posicional, conforme a Tabela 5. Contudo, essas diferenças de valores podem ser consideradas admissíveis e não interferem no uso do PPK para prover produtos com acurácias confiáveis e sem demandar apoio terrestre, em áreas de estudos com as mesmas características deste trabalho.

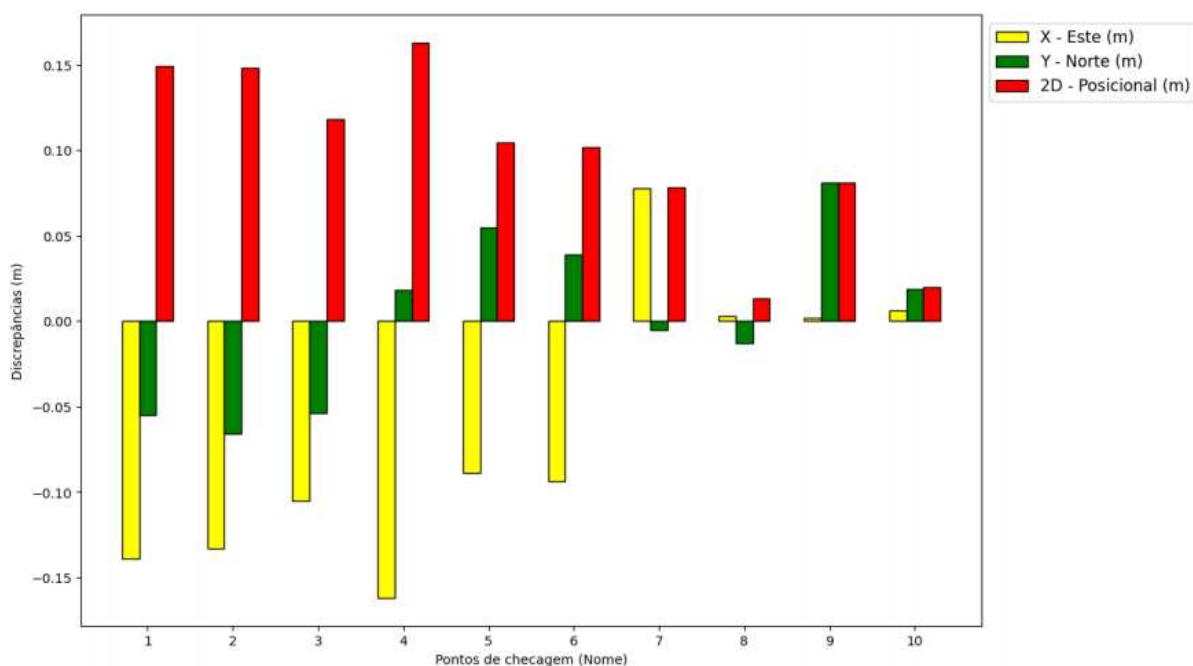
Tabela 5 - Acurácia Posicional

Estatísticas	5 GCPs (m)	PPK (m)	%PPK vs 5 GCPs (m)
RMSE_x	0,099	0,086	-13,13%
RMSE_y	0,047	0,054	14,89%
RMSE_z	0,217	0,271	24,88%

Fonte: Autor (2025).

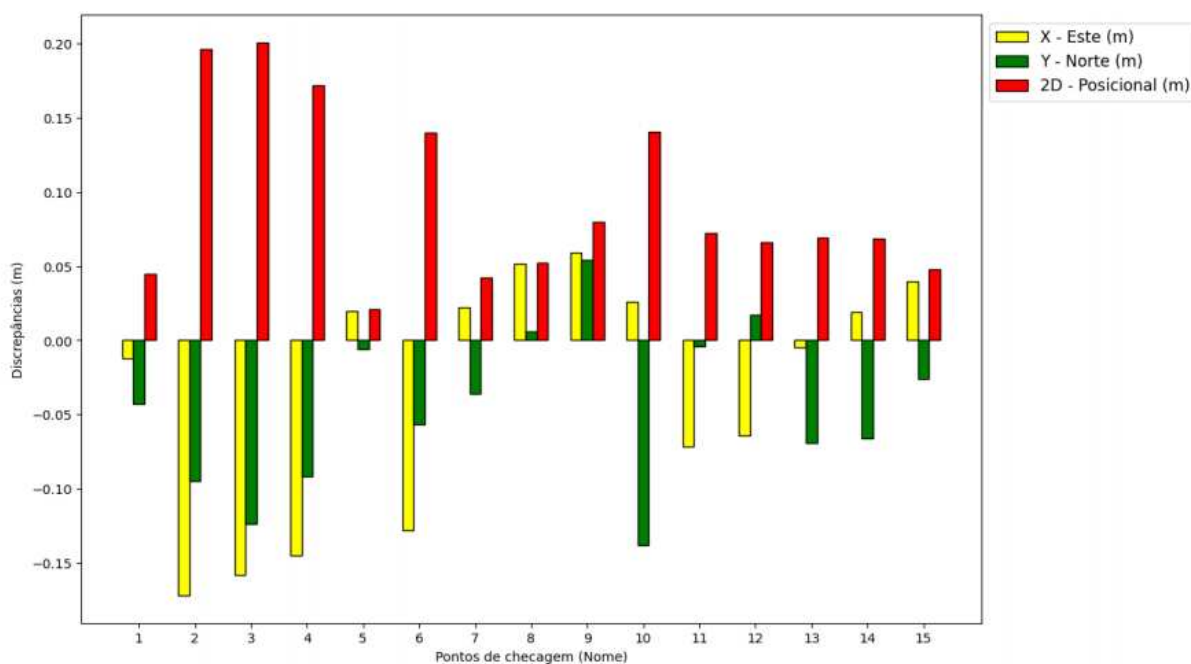
Quando avaliado as discrepâncias nos dois processamentos por meio dos gráficos 1 e 2, observa-se as tendências no eixo X no método GCP já com o PPK, a tendência passa a ser na componente Y. Como o intuito deste trabalho é demonstrar a viabilidade da utilização do levantamento com o PPK, a pesquisa se limitou a não investigação de possíveis correções a respeito. Os resultados descritos são apresentados aplicando o teste t de Student, ele apresenta que os dois processamentos são não tendenciosos quando avaliado espacialmente (2D).

Gráfico 1 – Discrepâncias posicionais planimétricas do processamento com 5 GCPs



Fonte: Autor (2025).

Gráfico 2 – Discrepâncias posicionais planimétricas do processamento com PPK

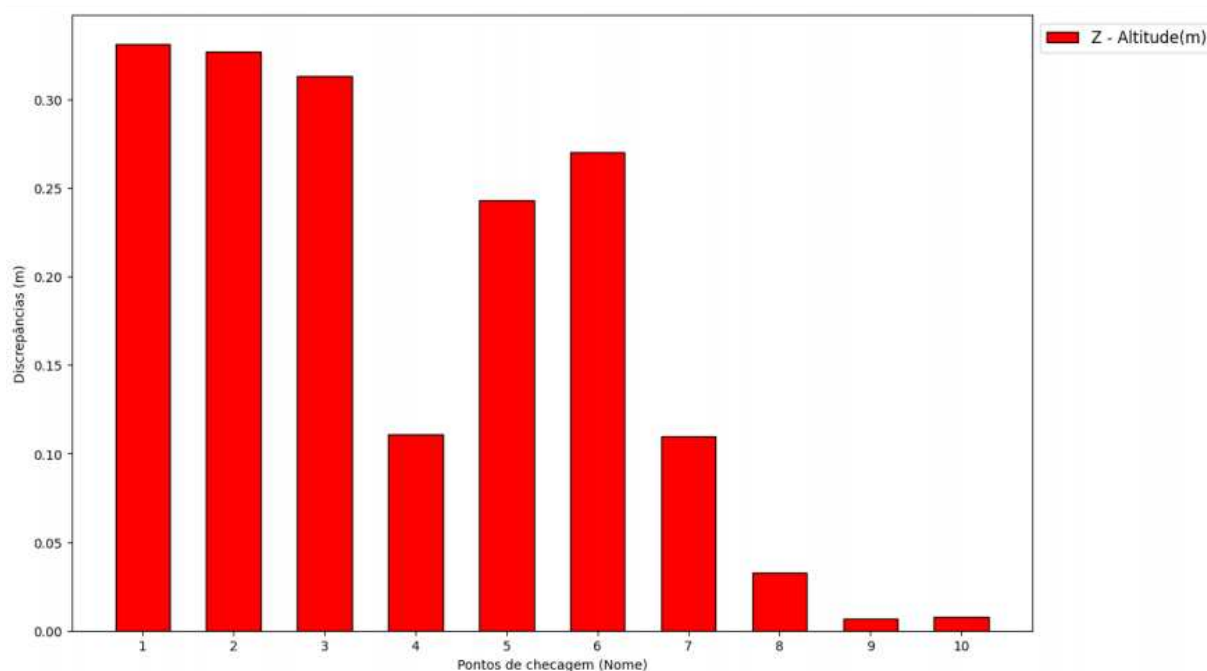


Fonte: Autor (2025).

Quanto a análise das discrepâncias na componente Z, os gráficos 3 e 4 apresentam que ambos dois métodos se encontram tendenciosos, o que mereceria um estudo minucioso. Contudo, o estudo limitou-se a apenas avaliar a acurácia posicional

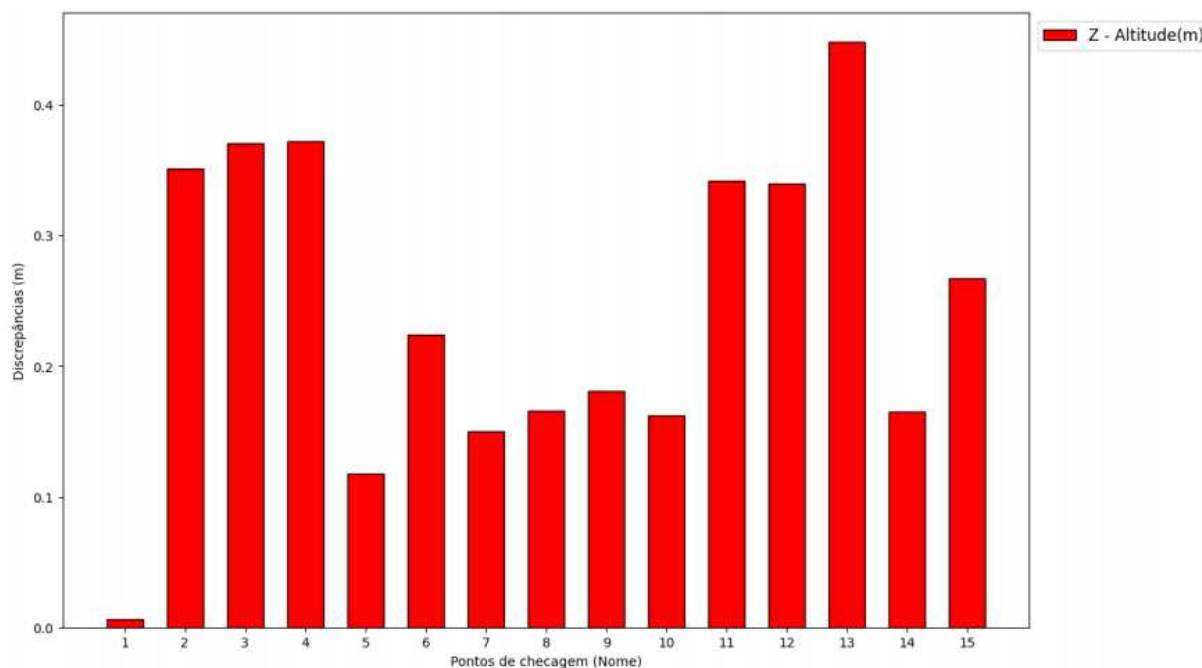
dos dois métodos e compará-la, contribuindo com a análise dos desafios ainda existentes no quesito de visualização de mapeamentos precisos sem a necessidade de múltiplos GCPs.

Gráfico 3 – Discrepâncias posicionais altimétricas do processamento com 5 GCPs



Fonte: Autor (2025).

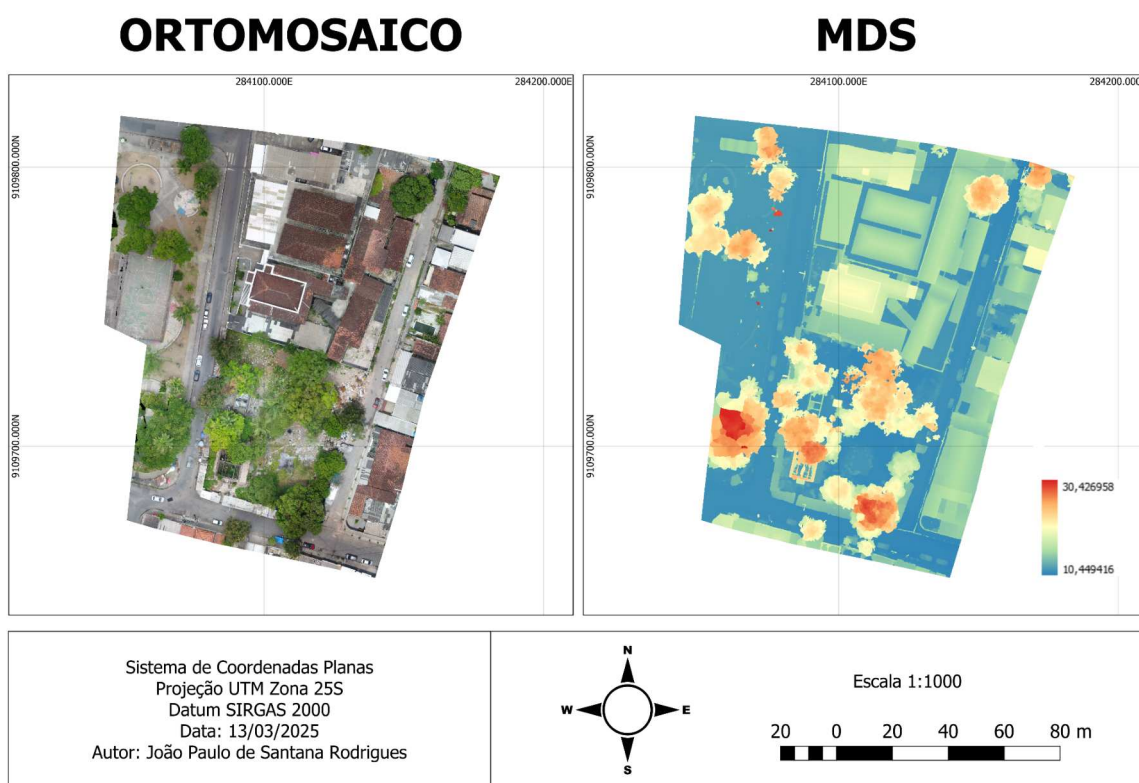
Gráfico 4 – Discrepâncias posicionais altimétricas do processamento com PPK



Fonte: Autor (2025).

Quanto aos produtos gerados, ortomosaico e MDS ilustrados na Figura 19, não houve diferenças significativas visualmente, e neste contexto, os resultados apresentados, indicam, a viabilização do método PPK quanto a tomada de decisão referente a área de levantamento utilizando produtos geoespaciais acurados de acordo com as normas vigentes empregando o procedimento adotado. Pode-se ainda destacar a viabilidade quanto a redução de custo, em vista do tempo necessário para realização do trabalho e da menor quantidade de tecnologia associada, onde não há necessidade de um apoio terrestre robusto, corrobora a iniciativa da utilização do método PPK no UAS.

Figura 19 – Ortomosaico e MDS representado no QGIS

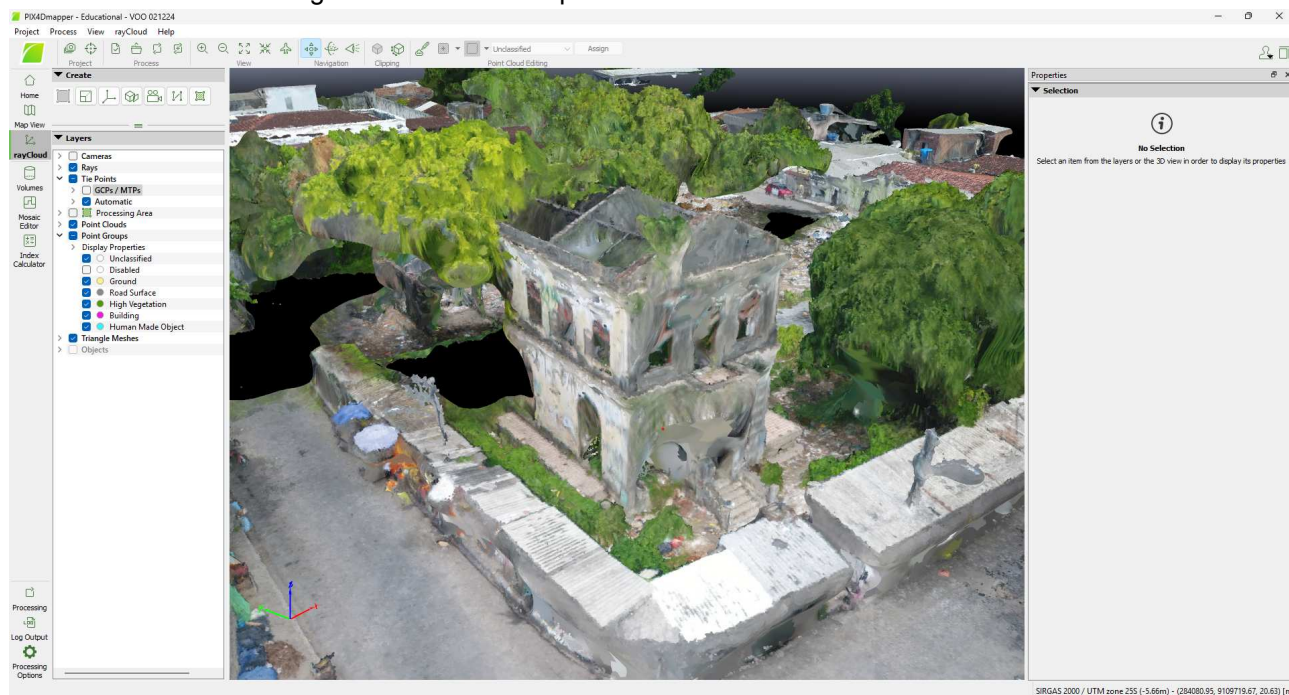


Fonte: Autor (2025).

Já a nuvem de pontos densa e o modelo 3D texturizados são bases para tomadas de decisão da administração do patrimônio. Como representados na figura 20, com esse conjunto de insumos pode-se obter informações precisas e minuciosas sobre a edificação e o seu estado atual. Em estudos de documentação e conservação do patrimônio cultural, tanto nuvem densa de pontos quanto modelos texturizados oferecem benefícios complementares. A nuvem densa fornece uma representação geométrica de alta fidelidade, essencial para análises métricas detalhadas, monitoramento temporal e

reconstrução precisa de superfícies (Özkan et al., 2025). Já os modelos de malha permitem visualização contínua e texturizada, facilitando a interpretação por especialistas, além de serem mais adequados à integração em aplicativos de realidade virtual, BIM e plataformas digitais (Grussenmeyer et al., 2012).

Figura 20 – Nuvem de pontos densa e modelo 3D texturizado



Fonte: Autor (2025).

Outro ponto de relevância neste trabalho, é de que para realização de levantamentos com o PPK, primeiro o levantamento GNSS da estação base deve ser o melhor possível, pois qualquer variação nessa coordenada impactará na acurácia do pós-processamento das imagens e consequentemente na acurácia dos produtos gerados. Os resultados descritos validam a utilização da metodologia de levantamento utilizando UAS com PPK para mapeamento de áreas de difícil acesso. Contudo, adverte-se para a possibilidade de usar um processamento relativo e não PPP em casos da proximidade da RMBC.

Também foi utilizado apenas o RMSE como estatística para a análise do trabalho, pois ela é utilizada como métrica de acurácia e é estabelecida como parâmetro de avaliação pela norma vigente. Para uma melhor análise de todos os parâmetros de qualidade dos produtos é necessário considerar também as médias dos erros e os desvios padrões, onde podem entender melhor as dispersões do erro e tendências ocorridas nas coordenadas.

6. CONCLUSÃO

A partir deste trabalho, conclui-se que é viável o levantamento utilizando UAS equipado com PPK em áreas de difícil acesso, de forma eficiente, visto que no cenário onde não há necessidade de realização do apoio terrestre, haverá uma economia de tempo, equipamento e recurso humano. Essa aplicação em ambiente de difícil acesso, como encostas e morros, demonstra viabilidade da utilização do PPK embarcado em UAS é confiável na obtenção de produtos geoespaciais de alta qualidade posicional.

A acurácia posicional do trabalho foi avaliada em conformidade com a ET-CQDG, os dados gerados atendem aos padrões de qualidades normativos vigentes em sua maior classificação na planimetria obtendo Classe A em escala 1:1000, já na altimétrica o processamento com PPK obteve classificação B.

A análise comparativa entre os métodos de levantamento mostrou que a diferença de qualidade posicional não é significativa, obtendo um $RMSE_{2D}$ de 0,109 metros utilizando GCP e de 0,110 metros utilizando PPK. Em comparação com Z, o $RMSE_Z$ de 0,217 metros com GCP e de 0,271 metros com o PPK, também evidencia que a diferença entre os dois processamentos é baixa.

O aerolevanteamento com UAS é possível obter uma qualidade posicional subcentimétrica, em contraste com as discrepâncias altas, tendências nos dados e utilização de conjuntos de dados diferentes, análise de qualidade utilizando 10 pontos com GCP e 15 pontos com PPK, estabelecem uma prerrogativa para estudos futuros. Por isso um novo estudo visando uma nova análise utilizando métodos de levantamentos para o apoio terrestre mais robustos é recomendado, onde todos os pontos coletados estejam atrelados a mesma base de referência, processamento relativo da base e a conexão NTRIP sendo com a mesma base RBMC.

Diante dos resultados alcançados, recomenda-se que pesquisas futuras ampliem a avaliação da tecnologia PPK em diferentes contextos, como áreas urbanas densamente edificadas, regiões de morros, ambientes costeiros, de modo a verificar a robustez da metodologia frente a condições mais complexas. Sugere-se também a integração com plataformas terrestres para aprimoramento da aplicabilidade dos produtos gerados em análises ambientais e patrimoniais. Além disso, recomenda-se explorar a interoperabilidade entre os modelos fotogramétricos obtidos por PPK e plataformas GeoBIM, como é o caso do projeto de pesquisa em andamento, o que pode potencializar

a gestão integrada do patrimônio cultural, permitindo não apenas documentar, mas também monitorar e planejar intervenções de conservação. Dessa forma, este trabalho abre caminho para estudos interdisciplinares que unam fotogrametria, ciência de dados e gestão patrimonial, consolidando o papel dos UAS com PPK como tecnologia estratégica para o mapeamento e preservação em múltiplos cenários.

No que se refere ao Casarão da Várzea, recomenda-se que estudos futuros avancem também para a aplicação do mapeamento com UAS-PPK aliado a imagens oblíquas, possibilitando maior detalhamento de elementos que não são totalmente visíveis em levantamentos nadirais. Além disso, sugere-se a integração das nuvens de pontos densas com modelos GeoBIM, permitindo o monitoramento digital do estado de conservação do imóvel e subsidiando intervenções de restauro fundamentadas em evidências métricas. Outra linha de investigação relevante seria a análise temporal por meio de levantamentos periódicos, o que possibilitaria identificar deformações estruturais e processos de degradação em andamento. Complementarmente, recomenda-se a comparação da metodologia com outras tecnologias, como o laser scanner terrestre (TLS), a fim de avaliar diferenças na qualidade geométrica e na representação de áreas críticas, como o interior do casarão e setores parcialmente colapsados. Esses estudos poderiam contribuir para a formulação de um protocolo de documentação patrimonial acessível, replicável em outros imóveis históricos em condições semelhantes.

Por fim conclui-se que o uso do UAS com o PPK significa um avanço no que diz respeito ao levantamento aerofotogramétrico e geração de insumos e produtos geoespaciais com alta qualidade posicional. Os resultados obtidos confirmam que a tecnologia atende aos padrões de qualidade da ET-CQDG, garantindo alta precisão posicional mesmo em áreas de difícil acesso e sem necessidade de pontos de apoio. O procedimento demonstrou eficiência operacional e viabilidade técnica, apresentando-se como alternativa moderna e vantajosa para levantamentos aerofotogramétricos, principalmente visando áreas de difícil acesso.

REFERÊNCIAS

- AICARDI, I.; CHIABRANDO, F.; GRASSO, N.; LINGUA, A.; NOARDO, F.; SPANÒ, A. T. **UAV photogrammetry with oblique images: First analysis on data acquisition and processing.** Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. ISPRS Arch., v. 41, p. 835–842, 2016.
- AGÜERA-VEGA, F.; CARVAJAL-RAMÍREZ, F.; MARTÍNEZ-CARRICONDO, P. **Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle.** Meas. J. Int. Meas. Confed., v. 98, p. 221–227, 2017.
- ANDERSON, K.; WESTOBY, M. J.; JAMES, M. R. **Low-budget topographic surveying comes of age: structure from motion photogrammetry in geography and the geosciences.** Prog. Phys. Geogr. Earth Environ., v. 43, p. 163–173, 2019.
- BLEWITT, G. **Carrier phase ambiguity resolution for the Global Positioning System applied to geodetic baselines up to 2000 km.** Journal of Geophysical Research, 1989. v. 94, n. B8.
- BOLKAS, D. **Assessment of GCP Number and Separation Distance for Small UAS Surveys with and without GNSS-PPK Positioning.** J. Surv. Eng., v. 145, p. 1–17, 2019.
- BRASIL. **Norma da Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG).** 1. ed. Brasília, DF: Ministério da Defesa, Exército Brasileiro, Departamento de Ciência e Tecnologia, 2016.
- BUSCH, P. **Análise da influência de diferentes estratégias de posicionamento GNSS na modelagem de trajetória de RPA para mapeamento fotogramétrico.** 2022. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022.
- CHABOT, D. **Trends in drone research and applications as the journal of unmanned vehicle systems turns five.** Journal of Unmanned Vehicle Systems, v. 6, n. 1, p. vi–xv, 2018.
- CHO, J.; LEE, J.; LEE, B. **Application of UAV Photogrammetry to Slope-Displacement Measurement.** KSCE Journal of Civil Engineering, v. 26, n. 4, p. 1904–1913, 2022.
- FAMIGLIETTI, N. A. et al. **A test on the potential of a low cost unmanned aerial vehicle RTK/PPK solution for precision positioning.** Sensors, v. 21, n. 11, 2021.

GAŠPAROVIĆ, M.; GAJSKI, D. **Two-step camera calibration method developed for micro UAV's**. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. ISPRS Arch., v. 41, p. 829–833, 2016.

GRUSSENMEYER, P. et al. **Recording Approach of Heritage Sites Based on Merging Point Clouds from High Resolution Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning**. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012. v. XXXIX-B5, p. 553–558. Disponível em: <<https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XXXIX-B5/553/2012/>>.

HERNANDEZ-LOPEZ, D.; FELIPE-GARCIA, B.; GONZALEZ-AGUILERA, D.; ARIAS-PEREZ, B. **An Automatic Approach to UAV Flight Planning and Control for Photogrammetric Applications**. Photogramm. Eng. Remote Sens., v. 79, p. 87–98, 2013.

ISEJIMA, Jun et al. **Performance Evaluation of the RTK-GPS Positioning with Communication Delay**. J. Jpn. Inst. Navig, v. 119, p. 205–211, 2008.

JAMES, M. R.; ROBSON, S. **Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks**. Earth Surf. Process. Landforms, v. 39, p. 1413–1420, 2014.

JAMES, M. R.; ROBSON, S. **Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: accuracy and geoscience application**. J. Geophys. Res. Earth Surf., v. 117, p. 1–17, 2012.

KOVANIČ, Ľ. et al. **Review of Photogrammetric and Lidar Applications of UAV**. Applied Sciences (Switzerland), v. 13, n. 11, 2023.

LAVRIC, I. et al. **Evaluating BIM and Mesh-Based 3D Modeling Approaches for Architectural Heritage: The Dosoftei House in Iași City, Romania**. Applied Sciences, 2025. v. 15, n. 17. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/15/17/9409>>.

LIMA, C. M. D. A.; MONICO, J. F. G.; MARQUES, H. A. **PPP com solução inteira das ambiguidades da fase da onda portadora: fundamentos envolvidos e análise de acurácia**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 68, n. 5, 2016.

LOSÈ, L. T.; CHIABRANDO, F.; TONOLO, F. G.. **Boosting the timeliness of UAV large scale mapping. Direct georeferencing approaches: Operational strategies and best practices**. ISPRS International Journal of Geo-Information, v. 9, n. 10, 2020.

MARTÍNEZ–CARRICONDO, P.; AGÜERA–VEGA, F.; CARVAJAL–RAMÍREZ, F. **Accuracy assessment of RTK/PPK UAV–photogrammetry projects using differential corrections from multiple GNSS fixed base stations**. *Geocarto International*, v. 38, n. 1, 2023.

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

NEX, F. et al. **UAV in the advent of the twenties: Where we stand and what is next**. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 184, p. 215–242, 2022.

PALANIRAJAN, H. K. et al. **Efficient flight planning for building façade 3D reconstruction**. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. ISPRS Arch.*, v. 42, p. 495–502, 2019.

RANGEL, J. M. G.; GONÇALVES, G. R.; PÉREZ, J. A. **The impact of number and spatial distribution of GCPs on the positional accuracy of geospatial products derived from low–cost UAS**. *International Journal of Remote Sensing*, v. 39, n. 21, p. 7154–7171, 2018.

TOMAŠTÍK, J. et al. **UAV RTK/PPK method–An optimal solution for mapping inaccessible forested areas?** *Remote Sensing*, v. 11, n. 6, 2019.

TOTH, C.; JOZKOW, G.; GREJNER–BRZEZINSKA, D. **Mapping with Small UAS: A Point Cloud Accuracy Assessment**. *J. Appl. Geod.*, v. 9, p. 213–226, 2015.

VITRUVIUS. **Casarão da Várzea: história e transformações**. *Minha Cidade*, n. 198, 2017. Disponível em: <https://vitruvius.com.br/revistas/read/minhacidade/17.198/6389>. Acesso em: 23 nov. 2024.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A.; WILKINSON, B. E. **Elements of photogrammetry with applications in GIS**. 4. ed. New York: McGraw–Hill, 2014.

YUSOFF, A. R. et al. **Camera calibration accuracy at different UAV flying heights**. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. ISPRS Arch.*, v. 42, p. 595–600, 2017.

APÊNDICE A – Relatório GeoPEC do processamento com 5 GCPs

GeoPEC
Software científico para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais



RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO DA ACURÁCIA POSICIONAL

DADOS DO PRODUTO

Produto: VOO CASARÃO GCP
Local: Varzea - RECIFE
Data: 02/12/2024
Responsável Técnico: JPSR

CLASSIFICAÇÃO FINAL DO PRODUTO

Padrão de acurácia utilizado: **Decreto n. 89.817/1984 - Análise Planimétrica**
Metodologia: ET-CQDG

O produto "VOO CASARÃO GCP", foi classificado com PEC-PCD **classe A**, na escala **1/1000**, de acordo com o Decreto n. 89.817 de 20 de junho de 1984, que regulamenta as normas cartográficas brasileiras, aliada às tolerâncias da ET-CQDG.

Pontos de checagem utilizados: 10
RMS das discrepâncias (m): 0.109

Padrão de acurácia utilizado: **Decreto n. 89.817/1984 - Análise Altimétrica**
Metodologia: ET-CQDG

O produto "VOO CASARÃO GCP", foi classificado com PEC-PCD **classe B**, para a equidistância vertical de **1m**, de acordo com o Decreto n. 89.817 de 20 de junho de 1984, que regulamenta as normas cartográficas brasileiras, aliada às tolerâncias da ET-CQDG.

Pontos de checagem utilizados: 10
RMS das discrepâncias (m): 0.217

GeoPEC: Relatório de Processamento da Acurácia Posicional
07/08/2025 - 17:11:37

Página 1

GeoPEC

Software científico para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais



Relatório estatístico

Padrão de acurácia utilizado: Decreto n. 89.817/1984

Análise planimétrica e altimétrica

Processamento

Escala de Referência: 1/1000

Equidistância vertical: 1m

Pontos de checagem inseridos: 10

Pontos de checagem utilizados: 10

Estatísticas descritivas

Estatísticas	dX	dY	dZ	d2D	d3D
nº de pontos (n)	10	10	10	10	10
Média	-0.063	0.002	0.175	0.098	0.208
Mediana	-0.092	0.007	0.177	0.103	0.231
Min	-0.162	-0.066	0.007	0.013	0.021
Max	0.078	0.081	0.331	0.163	0.363
Desv.padrão	0.080	0.050	0.135	0.051	0.133
RMS	0.099	0.047	0.217	0.109	0.243
Q1	-0.133	-0.054	0.033	0.078	0.081
Q3	0.003	0.039	0.313	0.148	0.335
MAD	0.068	0.041	0.121	0.040	0.114

Outliers

Processamento	Método	Classe utilizada	Outliers detectados	Valor limite - detecção
Planimetria	Teste 3 σ	Classe B	0	0.900m
Altimetria	Teste 3 σ	Classe B	0	1.000m

GeoPEC

Software científico para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais



Teste de normalidade

Teste de normalidade Shapiro-Wilk com 95% de nível de confiança

Componente	Estatística W	P-value	Resultado
X	0.909	0.277	Amostra Normal
Y	0.949	0.658	Amostra Normal
Z	0.857	0.071	Amostra Normal
2D	0.922	0.373	Amostra Normal
3D	0.922	0.373	Amostra Normal

Teste de tendência

Teste t de Student com 90% de nível de confiança

Componente	t tabelado	t calculado	Resultado
X	1.833	-2.513	Tendência
Y	1.833	0.121	Não há tendência
Z	1.833	4.097	Tendência

Estatística espacial

Somatório sen(Az)	Somatório cos(Az)	Média direcional	Variância circular	Resultado
-3.934	0.664	279.59°	0.601	Não Tendencioso

Teste de precisão

Processamento	PEC(m)	EP(m)	%di <= PEC	Resultado
Planimetria	0.280	0.170	100.000	Classe A
Altimetria	0.500	0.333	100.000	Classe B

Nota: "%di <= PEC" corresponde a porcentagem de discrepâncias menores ou iguais ao PEC da classe utilizada.

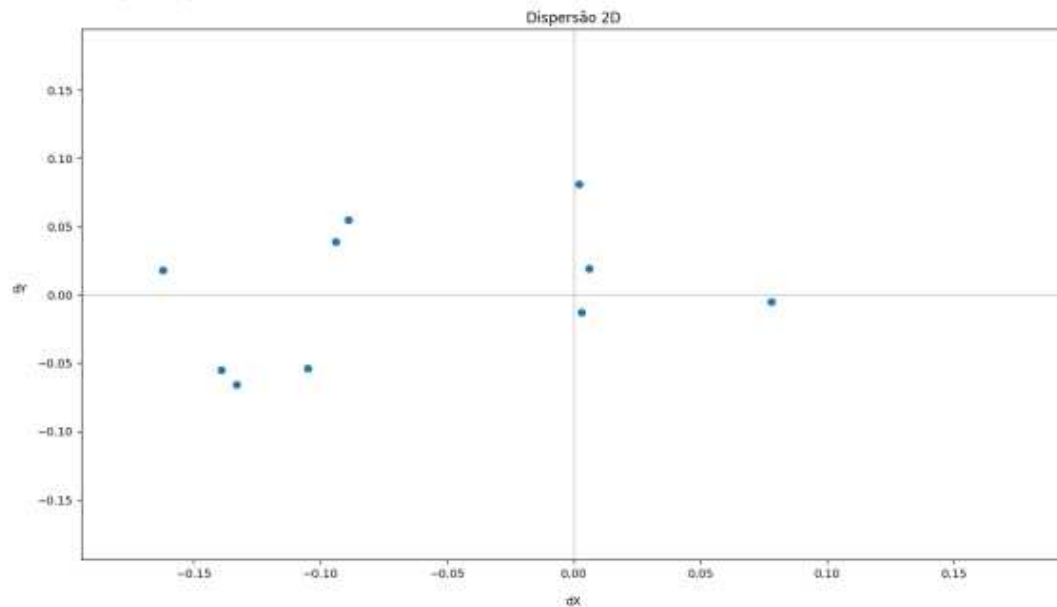
GeoPEC

Software científico para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais



GeoPEC

Software científico para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais

**Gráficos****Dispersão planimetria**

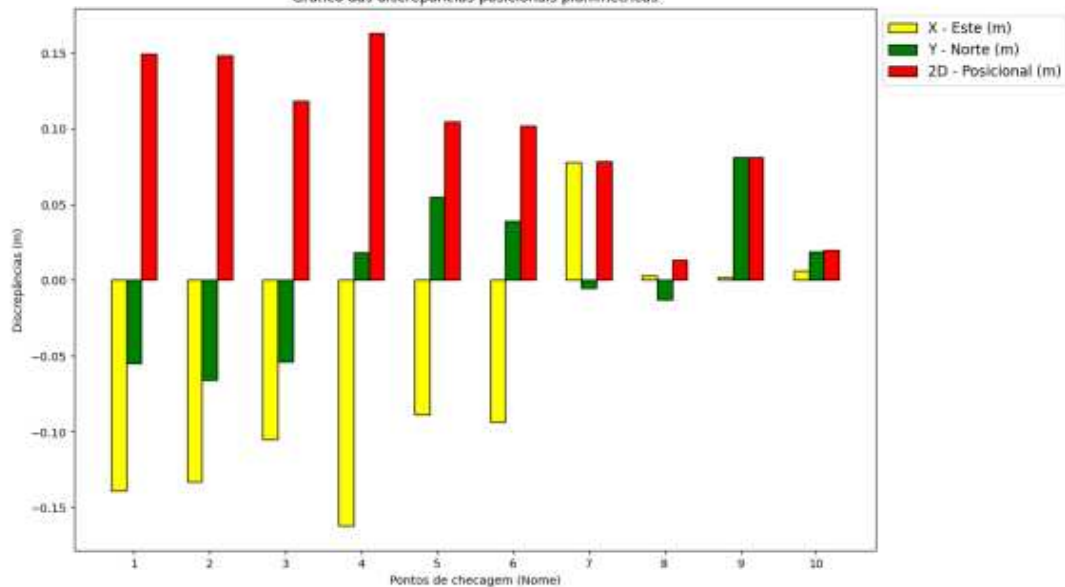
GeoPEC

Software científico para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais



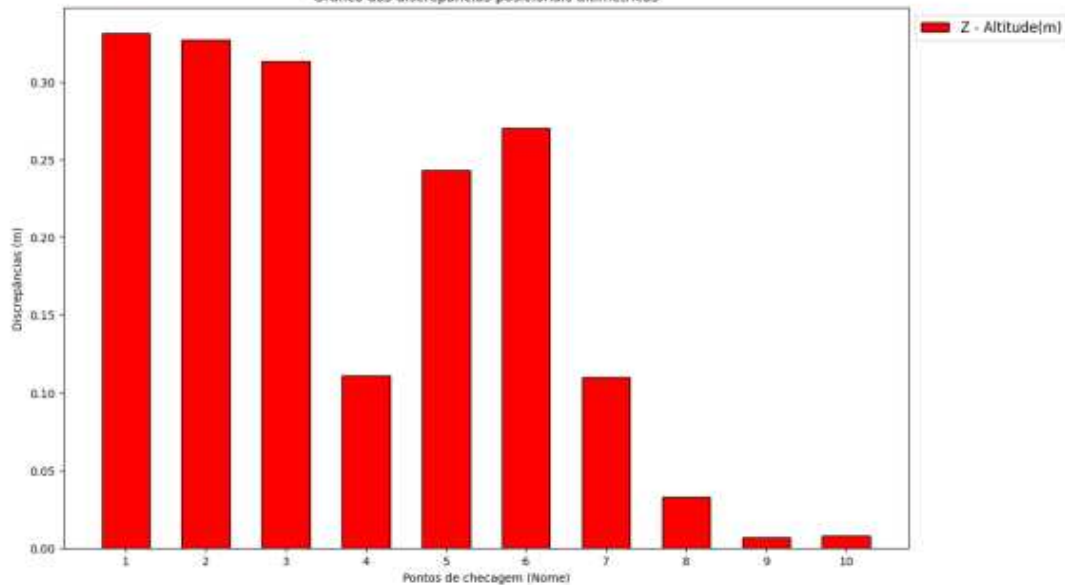
Discrepâncias planimetria

Gráfico das discrepâncias posicionais planimétricas



Discrepâncias altimetria

Gráfico das discrepâncias posicionais altimétricas

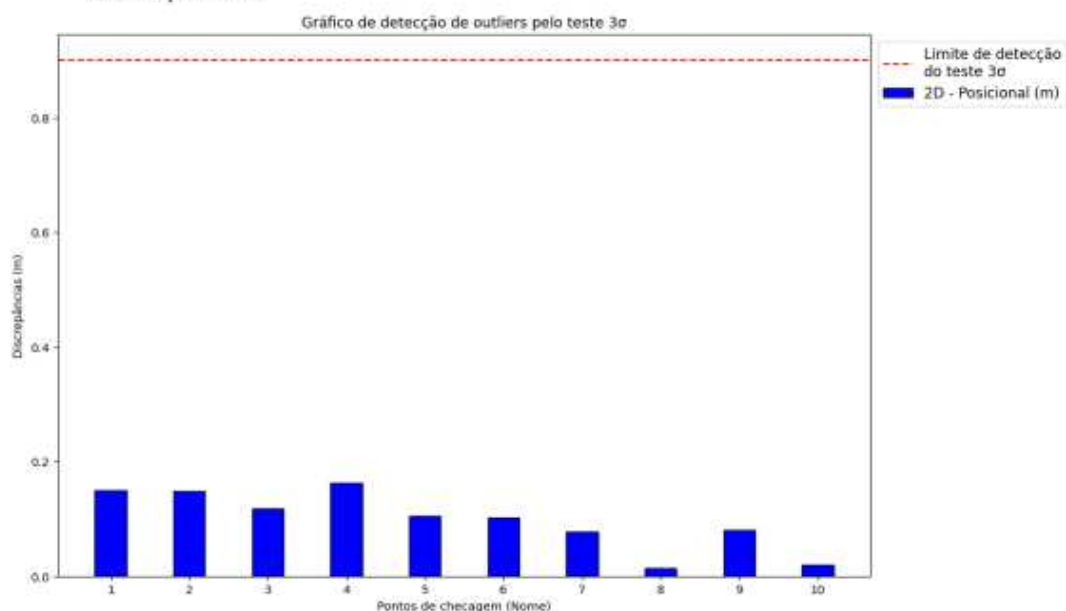


GeoPEC

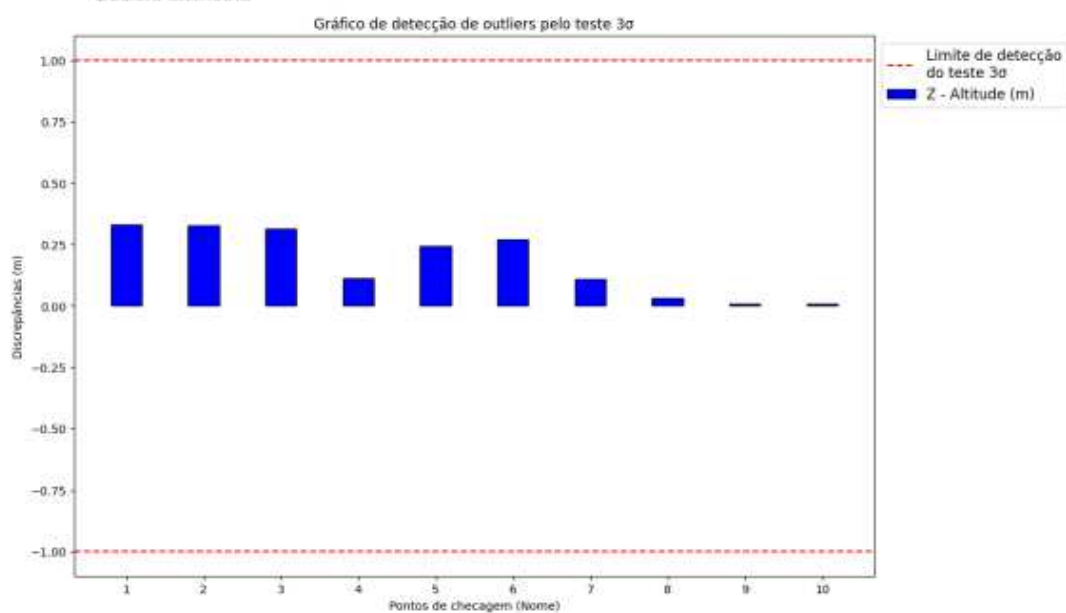
Software científico para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais



Outliers planimetria



Outliers altimetria



GeoPEC

Software científico para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais



Discrepâncias - Pontos de checagem

ID	dX	dY	dZ	d2D	d3D	Azim.2D	Outlier	Excluído
1	-0.139	-0.055	0.331	0.149	0.363	248.412	Não	Não
2	-0.133	-0.066	0.327	0.148	0.359	243.608	Não	Não
3	-0.105	-0.054	0.313	0.118	0.335	242.784	Não	Não
4	-0.162	0.018	0.111	0.163	0.197	276.340	Não	Não
5	-0.089	0.055	0.243	0.105	0.265	301.715	Não	Não
6	-0.094	0.039	0.270	0.102	0.289	292.533	Não	Não
7	0.078	-0.005	0.110	0.078	0.135	93.668	Não	Não
8	0.003	-0.013	0.033	0.013	0.036	167.005	Não	Não
9	0.002	0.081	0.007	0.081	0.081	1.414	Não	Não
10	0.006	0.019	0.008	0.020	0.021	17.526	Não	Não

Relatório gerado em: 07/08/2025 - 17:11:37

Plugin GeoPEC - versão 1.0 - 2024

APÊNDICE B – Relatório GeoPEC do processamento com PPK



RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO DA ACURÁCIA POSICIONAL

DADOS DO PRODUTO

Produto: VOO CASARÃO PPK

Local: Varzea - RECIFE

Data: 02/12/2024

Responsável Técnico: JPSR

CLASSIFICAÇÃO FINAL DO PRODUTO

Padrão de acurácia utilizado: **Decreto n. 89.817/1984 - Análise Planimétrica**

Metodologia: ET-CQDG

O produto "VOO CASARÃO PPK", foi classificado com PEC-PCD **classe A**, na escala **1/1000**, de acordo com o Decreto n. 89.817 de 20 de junho de 1984, que regulamenta as normas cartográficas brasileiras, aliada às tolerâncias da ET-CQDG.

Pontos de checagem utilizados: 15

RMS das discrepâncias (m): 0.110

Padrão de acurácia utilizado: **Decreto n. 89.817/1984 - Análise Altimétrica**

Metodologia: ET-CQDG

O produto "VOO CASARÃO PPK", foi classificado com PEC-PCD **classe B**, para a equidistância vertical de **1m**, de acordo com o Decreto n. 89.817 de 20 de junho de 1984, que regulamenta as normas cartográficas brasileiras, aliada às tolerâncias da ET-CQDG.

Pontos de checagem utilizados: 15

RMS das discrepâncias (m): 0.271

GeoPEC

Software científico para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais



Relatório estatístico

Padrão de acurácia utilizado: Decreto n. 89.817/1984

Análise planimétrica e altimétrica

Processamento

Escala de Referência: 1/1000

Equidistância vertical: 1m

Pontos de checagem inseridos: 15

Pontos de checagem utilizados: 15

Estatísticas descritivas

Estatísticas	dX	dY	dZ	d2D	d3D
nº de pontos (n)	15	15	15	15	15
Média	-0.035	-0.045	0.244	0.094	0.267
Mediana	-0.005	-0.043	0.224	0.069	0.264
Min	-0.172	-0.138	0.006	0.021	0.045
Max	0.059	0.054	0.448	0.201	0.453
Desv.padrão	0.082	0.054	0.122	0.059	0.125
RMS	0.086	0.069	0.271	0.110	0.293
Q1	-0.128	-0.092	0.162	0.048	0.174
Q3	0.026	-0.004	0.351	0.140	0.402
MAD	0.071	0.043	0.104	0.050	0.105

Outliers

Processamento	Método	Classe utilizada	Outliers detectados	Valor limite - detecção
Planimetria	Teste 3 σ	Classe B	0	0.900m
Altimetria	Teste 3 σ	Classe B	0	1.000m

GeoPEC

Software científico para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais



Teste de normalidade

Teste de normalidade Shapiro-Wilk com 95% de nível de confiança

Componente	Estatística W	P-value	Resultado
X	0.871	0.035	Amostra NÃO Normal
Y	0.986	0.995	Amostra Normal
Z	0.945	0.456	Amostra Normal
2D	0.861	0.025	Amostra NÃO Normal
3D	0.861	0.025	Amostra NÃO Normal

Teste de tendência

Teste t de Student com 90% de nível de confiança

Componente	t tabelado	t calculado	Resultado
X	1.761	-1.639	Não há tendência
Y	1.761	-3.253	Tendência
Z	1.761	7.728	Tendência

Estatística espacial

Somatório sen(Az)	Somatório cos(Az)	Média direcional	Variância circular	Resultado
-1.215	-6.642	190.37°	0.550	Não Tendencioso

Teste de precisão

Processamento	PEC(m)	EP(m)	%di <= PEC	Resultado
Planimetria	0.280	0.170	100.000	Classe A
Altimetria	0.500	0.333	100.000	Classe B

GeoPEC

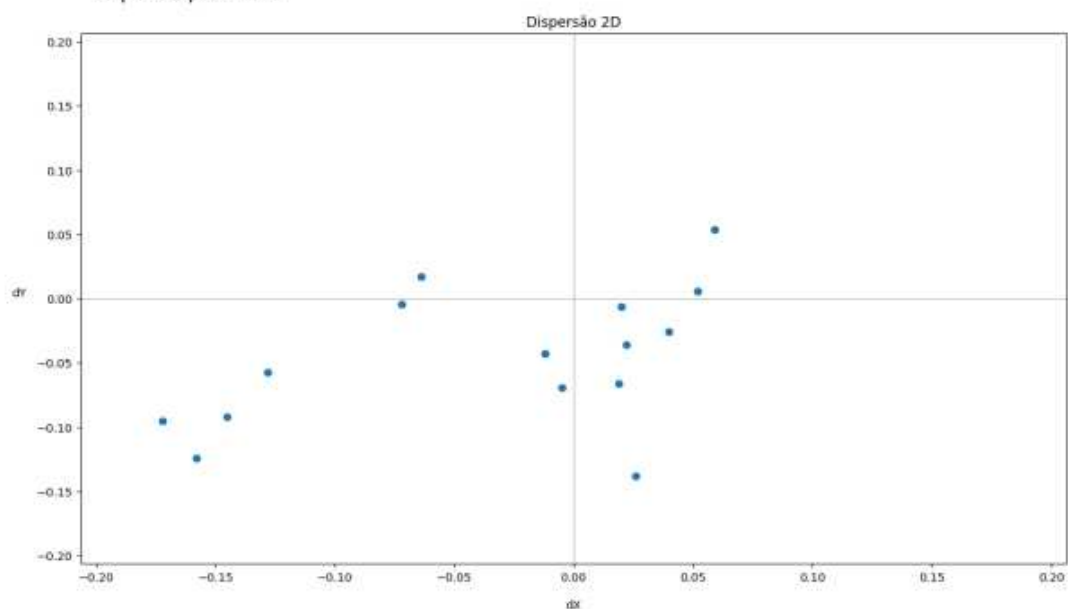
Software científico para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais



Nota: "%di <= PEC" corresponde a porcentagem de discrepâncias menores ou iguais ao PEC da classe utilizada.

GeoPEC

Software científico para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais

**Gráficos****Dispersão planimetria**

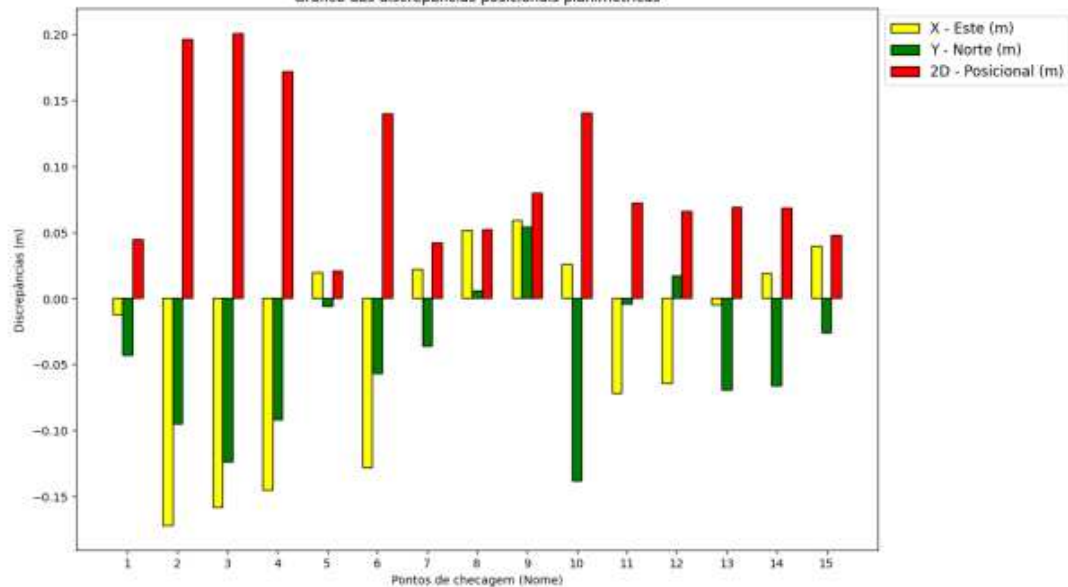
GeoPEC

Software científico para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais



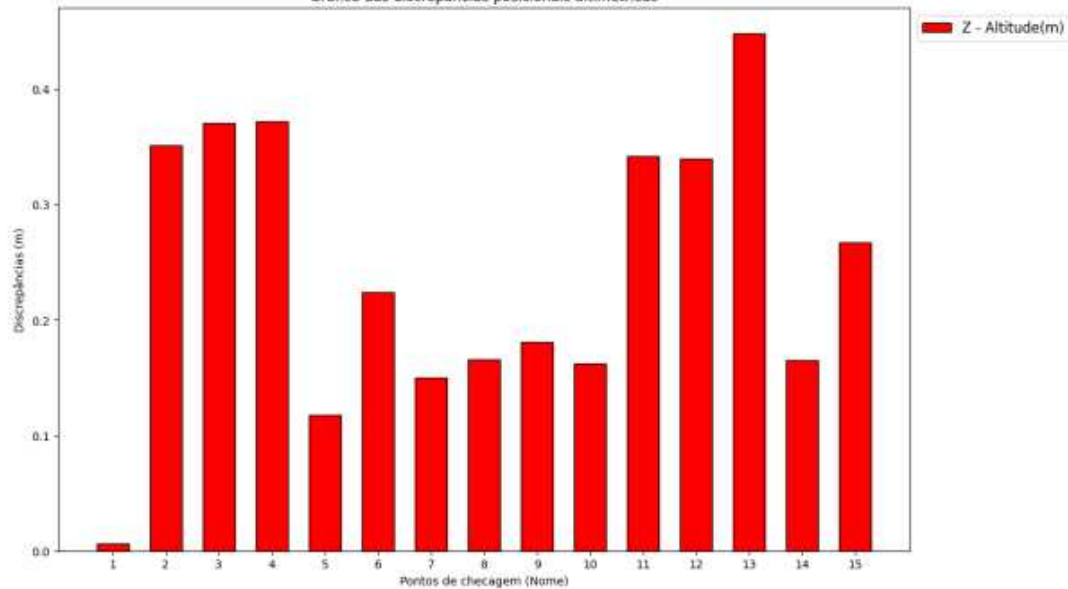
Discrepâncias planimetria

Gráfico das discrepâncias posicionais planimétricas



Discrepâncias altimetria

Gráfico das discrepâncias posicionais altimétricas



GeoPEC

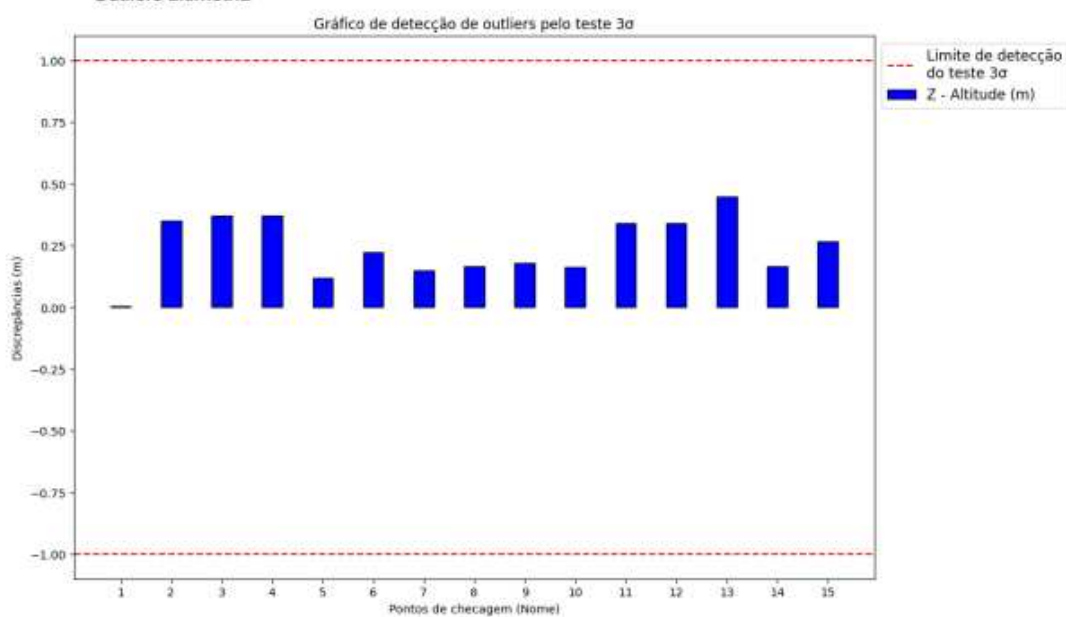
Software científico para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais



Outliers planimetria



Outliers altimetria



GeoPEC

Software científico para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais



Discrepâncias - Pontos de checagem

ID	dX	dY	dZ	d2D	d3D	Azim.2D	Outlier	Excluído
1	-0.012	-0.043	0.006	0.045	0.045	195.593	Não	Não
2	-0.172	-0.095	0.351	0.196	0.402	241.087	Não	Não
3	-0.158	-0.124	0.371	0.201	0.422	231.875	Não	Não
4	-0.145	-0.092	0.372	0.172	0.410	237.606	Não	Não
5	0.020	-0.006	0.118	0.021	0.120	106.699	Não	Não
6	-0.128	-0.057	0.224	0.140	0.264	245.996	Não	Não
7	0.022	-0.036	0.150	0.042	0.156	148.570	Não	Não
8	0.052	0.006	0.166	0.052	0.174	83.418	Não	Não
9	0.059	0.054	0.181	0.080	0.198	47.534	Não	Não
10	0.026	-0.138	0.162	0.140	0.214	169.330	Não	Não
11	-0.072	-0.004	0.342	0.072	0.350	266.820	Não	Não
12	-0.064	0.017	0.340	0.066	0.346	284.876	Não	Não
13	-0.005	-0.069	0.448	0.069	0.453	184.145	Não	Não
14	0.019	-0.066	0.165	0.069	0.179	163.940	Não	Não
15	0.040	-0.026	0.267	0.048	0.271	123.024	Não	Não

Relatório gerado em: 07/08/2025 - 17:12:13

Plugin GeoPEC - versão 1.0 - 2024

APÊNDICE C – Relatório IBGE-PPP



Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Relatório do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

Sumário do Processamento do marco: 0000

Início:AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2024/12/02 13:46:33,00
Fim:AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2024/12/02 14:42:44,00
Modo de Operação do Usuário:	ESTÁTICO
Observação processada:	CÓDIGO & FASE
Modelo da Antena:	POLS100 NONE
Órbitas dos satélites: ¹	RÁPIDA
Frequência processada:	L3
Intervalo do processamento(s):	1,00
Sigma ² da pseudodistância(m):	5,000
Sigma da portadora(m):	0,010
Altura da Antena ³ (m):	2,000
Ângulo de Elevação(graus):	10,000
Resíduos da pseudodistância(m):	3,76 GPS 8,40 GLONASS
Resíduos da fase da portadora(cm):	1,01 GPS 1,20 GLONASS

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	-8° 02' 55,9360"	-34° 57' 33,5397"	6,12	9109782.265	284069.985	-33
Na data do levantamento ⁵	-8° 02' 55,9268"	-34° 57' 33,5424"	6,12	9109782.547	284069.901	-33
Sigma(95%) ⁶ (m)	0,020	0,078	0,097			

Coordenada Altimétrica

Modelo:	hgeoHNOR_IMBITUBA		
Fator para Conversão (m):	-5,64	Incerteza (m):	0,06
Altitude Normal (m):	11,76		

Precisão esperada para um levantamento estático (metros)

Tipo de Receptor	Uma frequência		Duas frequências	
	Planimétrico	Altimétrico	Planimétrico	Altimétrico
Após 1 hora	0,700	0,600	0,040	0,040
Após 2 horas	0,330	0,330	0,017	0,018
Após 4 horas	0,170	0,220	0,009	0,010
Após 6 horas	0,120	0,180	0,005	0,008

¹ Órbitas obtidas do International GNSS Service (IGS) ou do Natural Resources of Canada (NRCAN).

² O termo "Sigma" é referente ao desvio-padrão.

³ Distância Vertical do Marco ao Plano de Referência da Antena (PRA).

⁴ A coordenada oficial na data de referência do Sistema SIRGAS, ou seja, 2000.4. A redução de velocidade foi feita na data do levantamento, utilizando o modelo VEMOS em 2000.4.

⁵ A data de levantamento considerada é a data de início da sessão.

⁶ Este desvio-padrão representa a confiabilidade interna do processamento e não a exatidão da coordenada.

Os resultados apresentados neste relatório dependem da qualidade dos dados enviados e do correto preenchimento das informações por parte do usuário. Em caso de dúvidas, críticas ou sugestões contate: <https://www.ibge.gov.br/atendimento.html> ou pelo telefone 0800-7218181. Este serviço de posicionamento faz uso do aplicativo de processamento CSRS-PPP desenvolvido pelo Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada (NRCAN).

Processamento autorizado para uso do IBGE.

Desvio Padrão e Diferença da Coordenada a Priori
Rover-2024-12-02-13_46_13-CASARAO0212.obs

