

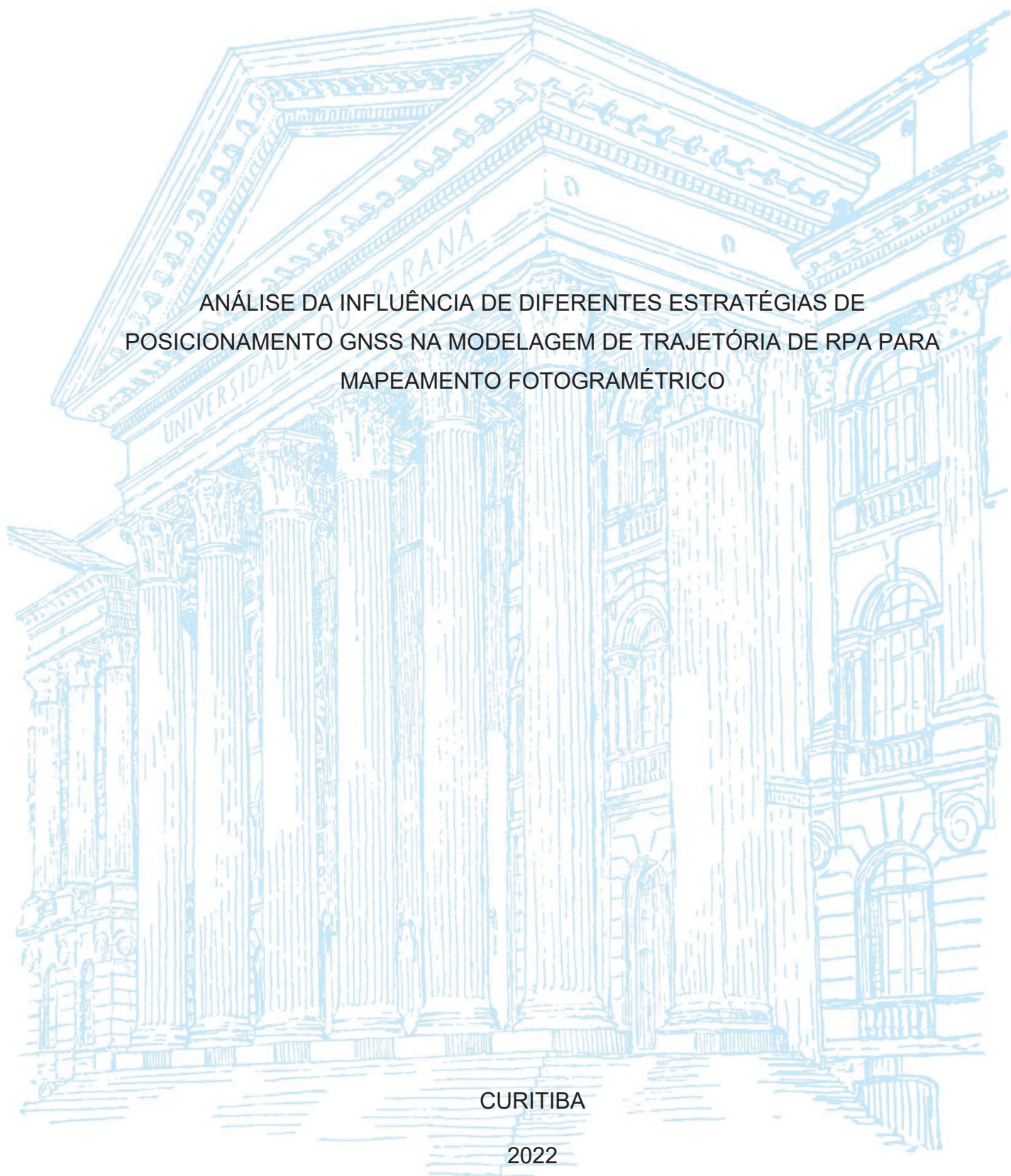
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PATRICK OTTO BUSCH

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE
POSICIONAMENTO GNSS NA MODELAGEM DE TRAJETÓRIA DE RPA PARA
MAPEAMENTO FOTOGRAMÉTRICO

CURITIBA

2022



PATRICK OTTO BUSCH

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE
POSICIONAMENTO GNSS NA MODELAGEM DE TRAJETÓRIA DE RPA PARA
MAPEAMENTO FOTOGRAMÉTRICO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra,, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador(a): Prof. Dr. Tiago Lima Rodrigues

Coorientador(a): Prof. Dr. Leonardo Ercolin Filho

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Busch, Patrick Otto

Análise da influência de diferentes estratégias de posicionamento GNSS na modelagem de trajetória de RPA para mapeamento fotogramétrico / Patrick Otto Busch. – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Orientador: Tiago Lima Rodrigues

Coorientador: Leonardo Ercolin Filho

1. Sistema de Posicionamento Global. 2. Aeronaves pilotadas remotamente. 3. Fotogrametria. 4. Drone. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. III. Rodrigues, Tiago Lima. IV. Ercolin Filho, Leonardo. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS
GEODÉSICAS - 40001016002P6

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **PATRICK OTTO BUSCH** intitulada: **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE POSICIONAMENTO GNSS NA MODELAGEM DE TRAJETÓRIA DE RPA PARA MAPEAMENTO FOTOGRAMÉTRICO**, sob orientação do Prof. Dr. TIAGO LIMA RODRIGUES, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 06 de Setembro de 2022.

Assinatura Eletrônica

14/09/2022 09:24:11.0

TIAGO LIMA RODRIGUES

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

12/09/2022 09:16:02.0

JOSE MARCATO JUNIOR

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL)

Assinatura Eletrônica

12/09/2022 10:39:01.0

PAULO SERGIO DE OLIVEIRA JUNIOR

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico este trabalho a Deus, minha
esposa Bárbara e minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e meus familiares que sempre me apoiam.

Agradeço à minha esposa, Bárbara, que está sempre ao meu lado me apoiando e incentivando.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Tiago Lima Rodrigues pela compreensão, apoio e toda orientação dada ao longo do processo, que certamente contribuíram para meu crescimento profissional e pessoal.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Leonardo Ercolin Filho pelas orientações, disponibilidade e todo suporte e cooperação.

À banca, Prof. Dr. José Marcato Junior e Prof. Dr. Paulo Sergio de Oliveira Junior, pela disponibilidade e apoio no aprimoramento da pesquisa.

A toda equipe do CEPAG (Centro de Pesquisas Aplicadas em Geoinformação) pelas trocas e convivência, em especial à Prof.^a Dra. Luciene Stamato Delazari.

Aos amigos Christian, Elias, Jorge, Laís e Sérgio, sempre presentes nesse processo e em especial ao amigo Marciano pela força e acolhimento em minha chegada na cidade de Curitiba.

Agradeço à empresa Guandalini Posicionamento, na figura de seu diretor Marcos Guandalini, por investir no incentivo à pesquisa e desenvolvimento técnico e científico, pela bolsa de estudos e todo auxílio que viabilizou a operacionalização do estudo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, e ao próprio programa em si, por tudo que agrega a mim e toda a comunidade científica.

“Ora, a fé é a certeza daquilo que esperamos e a prova das coisas que não vemos.”

(Hebreus 11.1)

RESUMO

Com o avanço nos estudos do uso de aeronave remotamente pilotada (RPA – do inglês *Remotely-Piloted Aircraft*) e visando sua utilização em projetos de mapeamento fotogramétrico, fatores inerentes aos processos, métodos e técnicas empregadas merecem a devida atenção, como as relacionadas ao posicionamento geodésico da plataforma e sensor através da tecnologia de Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS – do inglês *Global Navigation Satellite System*) durante o processo de aquisição das imagens para o voo apoiado. Tal aspecto ganhou aprofundamento com a utilização de métodos de posicionamento como o RTK (do inglês *Real Time Kinematic*) e o PPK (do inglês *Post Processed Kinematic*) para a estimativa de trajetórias RPAs, uma vez que estes possibilitam uma redução de tempo e custo. Em um esforço industrial e acadêmico o Centro de Pesquisas Aplicadas em Geoinformação da UFPR (CEPAG-UFPR) vem desenvolvendo estudos nessa área em parceria com a empresa Guandalini Posicionamento. A empresa tem desenvolvido uma solução denominada GPPK (Guandalini *Post-Processed Kinematic*), a qual faz uso de um receptor coletando dados GNSS em mono ou dupla frequência (L1 ou L1/L2) e um sistema fotosensor para a identificação do exato instante de aquisição das imagens. Neste projeto de pesquisa, utilizando-se o GPPK, analisou-se a influência de diferentes estratégias de processamento do posicionamento GNSS cinemático pós-processado, no provimento das trajetórias e do posicionamento geodésico tridimensional do centro perspectivo da câmera embarcada no contexto de levantamentos aerofotogramétricos. Foram definidos experimentos baseados na utilização do método com a utilização de diferentes portadoras. Também foram analisadas extensões de linha de base longa e curta, e diferentes frequências de aquisição de observáveis. Mediante análises estatísticas observou-se que as trajetórias podem ser consideradas estatisticamente iguais, pois não houve tendência significativa no conjunto amostral de discrepâncias entre as coordenadas dos pares de experimentos e os testes indicam concordância perfeita entre as trajetórias. Foi realizada, também, a calibração em serviço da câmera do RPA para determinação dos parâmetros de orientação interior e avaliação das discrepâncias encontradas em solo. Uma análise dos resultados obtidos nos pontos de verificação implantados em campo, indica que a utilização de linha de base curta apresenta melhores resultados do que linha de base longa, possivelmente devido ao tempo de ocupação e a restrição dos receptores Emlid (que compõe o GPPK) em trabalhar apenas com a observável L2C. A inclusão da portadora L2 em linha de base curta não influenciou de forma significativa a exatidão. Relativo à frequência de aquisição dos dados, o aumento não produz ganho significativo da acurácia, sendo o cenário mais vantajoso o uso de receptor monofrequência em linha de base curta a uma taxa de 0,2 segundos. A avaliação da exatidão geométrica com o uso de sete pontos de controle trouxe melhores resultados se comparado ao uso de apenas um ponto, principalmente para os experimentos em linha de base longa.

Palavras-chave: Posicionamento GNSS. Trajetória de RPA. Levantamento fotogramétrico.

ABSTRACT

With the advancement in the studies of the use of remotely piloted aircraft (RPA) and aiming its use in photogrammetric mapping projects, factors inherent to the processes, methods and techniques employed deserve due attention, such as those related to positioning geodesic of the platform and sensor through the Global Navigation Satellite System (GNSS) technology during the image acquisition process for the supported flight. This aspect gained depth with the use of positioning methods such as RTK (Real Time Kinematic) and PPK (Post Processed Kinematic) for the estimation of RPA trajectories, since they allow a reduction in time and cost. In an industrial and academic effort, the Center for Applied Research in Geoinformation at UFPR (CEPAG-UFPR) has been developing studies in this area in partnership with the company Guandalini Positioning. The company has developed a solution called GPPK (Guandalini Post-Processed Kinematic), which makes use of a receiver collecting GNSS data in mono or dual frequency (L1 or L1/L2) and a photosensor system to identify the exact moment of acquisition of the images. In this research project, using GPPK, the influence of different post-processed kinematic GNSS positioning processing strategies was analyzed in the provision of trajectories and three-dimensional geodetic positioning of the perspective center of the embedded camera in the context of aerophotogrammetric surveys. Experiments were defined based on the use of the method with the use of different carriers. Long and short baseline lengths and different frequencies of acquisition of observables were also analyzed. Through statistical analysis, it was observed that the trajectories can be considered statistically equal, as there was no significant trend in the sample set of discrepancies between the coordinates of the pairs of experiments and the tests indicate perfect agreement between the trajectories. In-service calibration of the RPA camera was also carried out to determine the parameters of interior orientation and evaluation of discrepancies found on the ground. An analysis of the results obtained in the checkpoints deployed in the field, indicates that the use of a short baseline presents better results than a long baseline, possibly due to the occupation time and the restriction of Emlid receivers (which make up the GPPK) in working only with the observable L2C. The inclusion of the L2 carrier in a short baseline did not significantly influence the accuracy. Regarding the frequency of data acquisition, the increase did not propose a significant gain in accuracy, the most advantageous scenario being the use of a monofrequency receiver in a short baseline at a rate of 0.2 seconds. The evaluation of geometric accuracy with the use of seven control points brought better results compared to the use of only one point, mainly for experiments with a long baseline.

Keywords: GNSS Positioning. RPA trajectory. Photogrammetric survey.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PRINCÍPIO DO FUNCIONAMENTO DO GNSS	29
FIGURA 2 – MÉTODOS E TÉCNICAS DO POSICIONAMENTO GNSS	31
FIGURA 3 – FASE DA ONDA PORTADORA.....	34
FIGURA 4 – CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE	45
FIGURA 5 – FLUXO DE ETAPAS DA METODOLOGIA	58
FIGURA 6 – ÁREA DE ESTUDO E LINHA DE BASE CURTA.....	60
FIGURA 7 – ÁREA DE ESTUDO E LINHA DE BASE LONGA	60
FIGURA 8 – PHANTOM 4 ADVANCED DA DJI, COM O KIT PPK2 DA GUANDALINI ACOPLADO	62
FIGURA 9 – EXEMPLO DA INTERFACE DO SOFTWARE GTOPO PARA O PROCESSAMENTO DOS PONTOS DE APOIO	64
FIGURA 10 – EXEMPLO DE RASTREIO EM CAMPO	64
FIGURA 11 – EXEMPLO DA INTERFACE DO SOFTWARE GPPK COM O MÓDULO RTKCONV PARA A CONVERSÃO DO FORMATO UBX PARA O FORMATO UNIVERSAL RINEX V 3.03.....	65
FIGURA 12 – ÁREA DE CALIBRAÇÃO	72
FIGURA 13 – EXEMPLO DE AMBIENTE DE TRABALHO DO AGISOFT METASHAPE	74
FIGURA 14 – TRAJETÓRIAS E SUAS PRECISÕES PARA OS EXPERIMENTOS DE 1 A 6.....	77
FIGURA 15 – TRAJETÓRIAS E SUAS PRECISÕES PARA OS EXPERIMENTOS DE 7 A 10 COM LINHA DE BASE LONGA.....	82
FIGURA 16 – MARCADORES EXPERIMENTO 1	118
FIGURA 17 – MARCADORES EXPERIMENTO 2	118
FIGURA 18 – MARCADORES EXPERIMENTO 3	119
FIGURA 19 – MARCADORES EXPERIMENTO 4	119
FIGURA 20 – MARCADORES EXPERIMENTO 5	120
FIGURA 21 – MARCADORES EXPERIMENTO 6	120
FIGURA 22 - MARCADORES EXPERIMENTOS 7 E 8	121
FIGURA 23 – MARCADORES EXPERIMENTOS 9 E 10.....	122

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CONSTELAÇÕES QUE COMPÕEM O GNSS.....	29
TABELA 2 - ERROS SISTEMÁTICOS NO POSICIONAMENTO GNSS.....	43
TABELA 3 – EXPERIMENTOS DE TRAJETÓRIA E SUAS CARACTERÍSTICAS ...	57
TABELA 4 – COORDENADAS GEODÉSICAS ESPACIAIS DAS BASES.....	61
TABELA 5 – COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO FOTOGRAFÉTICO ...	63
TABELA 6 – CONFIGURAÇÕES DE PROCESSAMENTOS NO MÉTODO PPK NO RTKLIB V. 2.4.3 EMLID B33.....	67
TABELA 7 – VALORES DE LEVER-ARMS UTILIZADOS.	68
TABELA 8 – VALORES DOS TESTES ESTATÍSTICOS PARA EXPERIMENTOS COM LINHA DE BASE CURTA.....	79
TABELA 9 - PRECISÃO DO POSICIONAMENTO RELATIVO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OBSERVAÇÃO, EQUIPAMENTO UTILIZADO E COMPRIMENTO DA LINHA DE BASE.....	81
TABELA 10 - VALORES DOS TESTES ESTATÍSTICOS PARA EXPERIMENTOS COM LINHA DE BASE LONGA.	84
TABELA 11 – ACURÁCIA PLANIMÉTRICA, ALTIMÉTRICA E ENQUADRAMENTO PEC-PCD COM 1 PONTO DE CONTROLE.....	100
TABELA 12 – ACURÁCIA PLANIMÉTRICA, ALTIMÉTRICA E ENQUADRAMENTO PEC-PCD COM 0 PONTOS DE CONTROLE.....	101
TABELA 13 - ACURÁCIA PLANIMÉTRICA, ALTIMÉTRICA E ENQUADRAMENTO PEC-PCD COM 7 PONTOS DE CONTROLE.....	102

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – PRECISÃO DAS COORDENADAS DOS CPS PARA EXPERIMENTO 1	86
GRÁFICO 2 – PRECISÃO DAS COORDENADAS DOS CPS PARA EXPERIMENTO 2	87
GRÁFICO 3 – PRECISÃO DAS COORDENADAS DOS CPS PARA EXPERIMENTO 3	88
GRÁFICO 4 – PRECISÃO DAS COORDENADAS DOS CPS PARA EXPERIMENTO 4	89
GRÁFICO 5 – PRECISÃO DAS COORDENADAS DOS CPS PARA EXPERIMENTO 5	89
GRÁFICO 6 – PRECISÃO DAS COORDENADAS DOS CPS PARA EXPERIMENTO 6	90
GRÁFICO 7 – PRECISÃO DAS COORDENADAS DOS CPS PARA EXPERIMENTOS 7 E 10	91
GRÁFICO 8 – PRECISÃO DAS COORDENADAS DOS CPS PARA EXPERIMENTOS 8 E 9	92
GRÁFICO 9 – REQM MÉDIO NOS EXPERIMENTOS EM BASE CURTA	94
GRÁFICO 10 – REQM MÉDIO NOS EXPERIMENTOS EM BASE LONGA	96
GRÁFICO 11 – ACURÁCIA DOS EXPERIMENTOS	99

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BBA	- <i>Bundle Block Adjustment</i>
GLONASS	- <i>Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GNSS	- <i>Global Navigation Satellite System</i>
GPPK	- <i>Guandalini Post Processed Kinematic</i>
GPS	- <i>Global Positioning System</i>
IGR	- <i>IGS Rapid</i>
IGS	- <i>International GNSS Service</i>
PPK	- <i>Post Processed Kinematic</i>
PPP	- <i>Posicionamento por Ponto Preciso</i>
PPS	- <i>Posicionamento por Ponto Simples</i>
RPA	- <i>Remotely-Piloted Aircraft</i>
RTK	- <i>Real Time Kinematic</i>
SfM	- <i>Structure from Motion</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. JUSTIFICATIVA	20
1.2. OBJETIVOS	22
1.2.1. Objetivo geral	22
1.2.2. Objetivos específicos	22
2. REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1. ESTADO DA ARTE DO MAPEAMENTO FOTOGRAFÉTICO COM RPA....	24
2.2. MÉTODOS DE POSICIONAMENTO GNSS.....	28
2.2.1. Pseudodistância	32
2.2.2. Fase da onda portadora	33
2.2.3. Posicionamento por Ponto Simples.....	35
2.2.4. Posicionamento por Ponto Preciso	36
2.2.5. <i>Post-Processed Kinematic</i>	37
2.2.6. <i>Real Time Kinematic</i>	39
2.3. ERROS SISTEMÁTICOS NO POSICIONAMENTO GNSS	41
2.4. FOTOTRIANGULAÇÃO DE IMAGENS AÉREAS	44
2.4.1. Condição de colinearidade.....	44
2.4.2. Injunções no sistema de equações	47
2.4.3. Parâmetros de Orientação Interior	48
2.4.4. Parâmetros de Orientação Exterior.....	49
2.4.5. Sistema de orientação e posicionamento.....	50
2.4.6. Georreferenciamento direto e indireto.....	50
2.4.7. Structure-from-Motion/ Multi-view Stereo (SfM-MVS)	51
2.5. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS DIGITAIS	
52	
3. METODOLOGIA	56

3.1. MATERIAIS	56
3.2. EXPERIMENTOS	57
3.3. ÁREAS DE ESTUDO, LEVANTAMENTOS FOTOGRAMÉTRICOS E DE PONTOS EM CAMPO.....	59
3.4. PROCESSAMENTO DAS TRAJETÓRIAS.....	65
3.4.1. Análise estatística	69
3.5. PROCESSAMENTOS FOTOGRAMÉTRICOS.....	71
3.5.1. Calibração em serviço da câmera.....	71
3.5.2. Fototriangulação nos experimentos e avaliações	73
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
4.1. RESULTADOS DAS ESTIMATIVA DAS TRAJETÓRIAS A PARTIR DAS ESTRATÉGIAS DE PROCESSAMENTO GNSS	76
4.2. ESTIMATIVA DOS POE	85
4.3. ANÁLISE DA ACURÁCIA NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO	93
4.4. PEC-PCD	99
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	104
5.1. CONCLUSÕES	104
5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	107
REFERÊNCIAS.....	109
ANEXOS	117
ANEXO A – MARCADORES PLOTADOS PELO RTKLIB E SUAS PRECISÕES ..	118

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de se obter informações geoespaciais de qualidade cada vez maior e de maneira rápida e confiável, torna crescente o estudo relativo a técnicas e equipamentos utilizados na aquisição de dados espaciais. Como exemplos, pode-se citar os estudos voltados à estimativa do posicionamento utilizando o Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS – do inglês *Global Navigation Satellite System*), seja em levantamentos terrestres ou no contexto de levantamentos aéreos, como por exemplo no provimento das coordenadas da trajetória de RPA (do inglês *Remotely-Piloted Aircraft*) (HUANG et al., 2002; LOPES, 2019; SILVA, 2018; SILVA e GASPAR, 2020).

Muitas vezes os RPAs são utilizados para fins recreativos, porém, o uso profissional tem crescido bastante. A utilização desse tipo de equipamento tem sido bastante difundida em diferentes áreas e com diferentes finalidades, como em Colomina e Molina (2014), Nex (2022) e Osco et al. (2021), em parte por sua facilidade de uso, como também por vezes objetivando um melhor custo-benefício e um ganho no tempo dispensado para a aquisição dos produtos finais.

No avanço das tecnologias associadas aos processos de aquisição de imagens, a utilização de plataformas como as RPAs, veio trazer uma gama de possibilidades, uma vez que sua estrutura possibilita um bom controle e planejamento na aquisição de dados, bem como o embarque de câmeras e sensores que impulsionam a diversidade dos produtos gerados.

No contexto das câmeras ou sensores imageadores embarcados, as possibilidades são grandes, a exemplo das câmeras digitais RGB (*Red, Green and Blue*), convertidas para infravermelho, multiespectrais, com foco automático ou fixo, termais, sistemas LiDAR (do inglês *Light Detection And Ranging*) de baixa potência e muitas outras combinações (EMBRAPA, 2018). Já no contexto dos sensores de posicionamento e orientação, pode-se ter embarcado receptores GNSS de navegação, geodésicos e sistemas inerciais. A utilização do GNSS+INS (*Inertial Navigation System*) proporciona um incremento nos processos fotogramétricos, pois possibilita, por exemplo, a obtenção da posição e orientação do centro perspectivo (CP) da câmera no instante de tomada das fotos.

O uso cada vez mais frequente do GNSS+INS conectado a câmeras fotogramétricas digitais equipados com uma câmera ou um sistema multi-câmeras, permite obter a posição e orientação das imagens de forma direta e assim reduzir a quantidade de pontos de controle necessários na aerotriangulação (AT) ou até mesmo eliminar o uso de pontos de controle em algumas aplicações de mapeamento (ERCOLIN FILHO, 2017). Em vista disso, tais aplicações estão cada vez mais presentes nas Ciências Geodésicas, principalmente nas áreas de Topografia e Fotogrametria, onde por vezes se apresenta a necessidade de projetos mais dinâmicos, como o levantamento de pequenas áreas, bem como a geração de modelos tridimensionais da superfície e ortoimagens.

Como exemplos de trabalhos científicos que abordaram o uso de RPA em mapeamentos fotogramétricos pode-se citar: Espinhosa (2006), Vidal (2013), Viana (2017), Silva (2018), Lopes (2019), Garcia (2019), Pedreira et al. (2020), Amorim (2020), Garcia (2020), dentre outros.

Em todos estes trabalhos foi utilizado o método mais tradicional e difundido, onde as imagens registradas são introduzidas em software específico, juntamente com as respectivas coordenadas do CP da(s) câmera(s) que são estimadas por receptor GNSS (ou GPS – do inglês, *Global Positioning System*) de navegação embarcado na RPA e gravado para pós-processamento fotogramétrico.

Em geral, as RPAs possuem um receptor GNSS de navegação embarcado, que fornece informações de posicionamento geodésico tridimensional em modo de navegação, permitindo executar a missão programada, e estimar e gravar a posição onde as coordenadas de posição geodésica tridimensional de cada imagem foram tomadas (SILVA, 2018). Porém, a precisão do posicionamento é da ordem métrica, uma vez que realiza o posicionamento por ponto simples (PPS - SEBEER, 2003), utilizando-se a pseudodistância proveniente do código C/A. Segundo Monico (2007), os principais erros que afetam tal método de posicionamento estão relacionados com a qualidade da observável utilizada (pseudodistância) e a acurácia dos parâmetros transmitidos nas mensagens de navegação. Acrescentam-se ainda os erros advindos da refração troposférica e ionosférica, deslocamento do centro de fase da antena, multicaminhamento do sinal, dentre outros.

A busca por melhores níveis de precisões fez surgir possibilidades de uso da tecnologia RTK (*Real Time Kinematic*), realizando a correção do posicionamento da aeronave, em tempo real, utilizando uma base de referência. Como exemplo, tem-se o eBee RTK da Sensefly PT (ROZE, 2014), o DJI MATRICE 300 RTK (DJI, 2022), o DJI Phantom 4 RTK (DJI, 2021), dentre outros. Porém, o uso do RTK possui algumas limitações tais como o alcance do link de rádio que transmite as correções da estação base, nos casos em que a estação base não puder se localizar próxima à região de levantamento, bem como condições ambientais que proporcionem obstruções (árvores, edificações, desníveis acentuados, etc.).

A fim de contornar tais dificuldades no uso da técnica RTK tanto para fins fotogramétricos quanto para topografia convencional, tem se difundido nos últimos anos o uso do sistema de RTK em rede, onde se utiliza uma rede de estações de referência. Outra possibilidade tem sido a transmissão de dados de correção de estações GNSS base contínuas via internet, utilizando, por exemplo, um servidor NTRIP (do inglês *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) Caster (GUANDALINI, 2012). No Brasil a RBMC-IP é uma opção. Para o uso em RPA começam a despontar opções como o Emlid NTRIP Caster, que possibilita o envio de correções em tempo real do receptor Reach RS2 ao RPA Phantom 4 RTK. No entanto, para todas essas possibilidades tem-se ainda a questão da disponibilidade e da qualidade de sinal de telefonia móvel (3G ou 4G).

Considerando que uma vez que as observáveis da base e do *rover* sejam gravadas no instante do levantamento, o posicionamento pode ser obtido com solução pós-processada. Por isso, Silva e Gaspar (2020), ao proporem o uso de RPA como ferramenta de imageamento e geração de modelo tridimensional em substituição ao laser scanner, fizeram uso de um kit GNSS composto por módulo GNSS Emlid Reach M+ (monofrequência – L1) e Antena multiconstelação Tallysman adaptada (GPS, GLONASS, Beidou e Galileo). Esse kit foi embarcado na RPA modelo Phantom 4 Pro V2.0 da DJI habilitado para gravação de observáveis GNSS, para um pós-processamento pelo método PPK.

Tal solução se assemelha com a encontrada no kit “PPK1” da empresa Guandalini Posicionamento¹, o qual é composto pelo módulo GNSS Emlid Reach M+

¹ Disponível em: <<https://www.guandalinibr.com/>>. Acesso em: 09 de agosto de 2022.

e Antena multi-GNSS Tallysman adaptada. Porém, além do kit PPK1, recentemente, a empresa desenvolveu o kit PPK2, o qual faz uso do módulo GNSS Emlid Reach M2 multifrequência e Antena Multifrequência GNSS helicoidal. Outro desenvolvimento proposto pela empresa é que ambos os kits possuem ainda um fotossensor que, acoplado ao led da RPA, fazem a correlação entre o instante de tomada da foto e suas coordenadas.

As possibilidades de correções e melhorias a serem alcançadas na acurácia do posicionamento da trajetória propõe, conseqüentemente, valores de posição mais acurados para os CPs das câmeras nos momentos de tomadas das imagens. Isso proporciona melhorias no levantamento fotogramétrico com georreferenciamento direto e, no caso de georreferenciamento indireto, a diminuição da quantidade de pontos de controle no terreno, como apontado em Famiglietti (2021). Vale ressaltar que para que as informações de posição e orientação fornecidas pela trajetória do GNSS+INS possam ser determinadas para o centro de perspectiva da câmera com exatidão compatível para uso em aplicações de mapeamento, é fundamental que haja o conhecimento prévio dos parâmetros de montagem que relacionam os referenciais do centro de perspectiva da câmera e da unidade de medição inercial (IMU – do inglês, *Inertial Measurement Unit*) do sistema GNSS+INS (CRAMER, 2001). Como exemplos de trabalhos desenvolvidos utilizando receptor GNSS geodésico embarcado em RPA, com pós-processamento do posicionamento para estimativa de trajetórias RPAs, pode-se citar Dinkov e Kitev (2020) e Ercolin Filho et al. (2020). Este último com testes preliminares utilizando o kit PPK1 da Guandalini.

Diante do exposto, e levando-se em consideração que as pesquisas até então desenvolvidas nesse âmbito não investigaram a influência de diferentes estratégias de processamento GNSS no provimento de trajetória do RPA para o processamento e geração de produtos fotogramétricos, o presente trabalho se propõe a investigar tais aspectos. Posteriormente, será realizada a análise do controle de qualidade posicional conforme preconizado nas normas de controle de qualidade de produtos cartográficos digitais (PEC-PCD).

Neste contexto, foram definidos experimentos baseados na utilização do método PPK, com a utilização de diferentes portadoras, considerando e desconsiderando a correção dos centros de fases da antena GNSS. No caso dos

experimentos utilizando-se o método PPK, serão utilizadas diferentes estações base, com extensões de linha de base longa e curta, e diferentes frequências de aquisição de observáveis. Neste trabalho, para situar o leitor, o conceito de linha de base longa será relacionado à comprimentos maiores que 15 km, segundo os princípios de Monico (2007).

Como hipótese, tem-se: as soluções de trajetórias obtidas com diferentes métodos e configurações de processamento influenciam no resultado dos produtos gerados pelo processamento aerofotogramétrico com RPA.

1.1. JUSTIFICATIVA

Os estudos na utilização de RPAs em projetos de mapeamento têm avançado consideravelmente. Os esforços se concentram em sua validação e aplicações específicas. Porém, a combinação de técnicas na elaboração de produtos cartográficos, demanda análises mais criteriosas quanto a qualidade dos resultados e principalmente quanto a influência de diferentes trajetórias (diferentes estratégias de processamento) no processamento fotogramétrico.

A disponibilidade dos arquivos RINEX (do inglês *Receiver Independent Exchange format*), do receptor instalado a bordo do RPA abre a possibilidade de se analisar diferentes métodos e estratégias de pós-processamento GNSS para provimento da trajetória e sua influência no mapeamento fotogramétrico, principalmente no caso de georreferenciamento direto. Assim, observou-se a importância de se investigar tais questões. Essa observância se dá pelo fato dos usuários dos kits PPK 1 e 2 da Guandalini, demandarem diferentes cenários e possibilidades na aquisição de seus dados para processamento. Algumas dessas opções partem dos próprios receptores que compõe os kits, uma vez que existem nas versões monofrequência L1 e dupla frequência L1/L2.

Outra questão nesse sentido de aquisição dos dados, é que, no contexto de posicionamento relativo, os usuários podem fazer uso de diferentes opções de dados de estações base. Muitas vezes usam dados de uma base local, instalando receptores próprios e os configurando com diferentes taxas de frequência. Uma alternativa

bastante utilizada, vem a ser o uso de informações advindas das estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) dos Sistemas GNSS do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), que proporcionam gratuitamente, uma vez por dia ou em tempo real, observáveis para a estimativa de coordenadas.

O IBGE disponibiliza os dados das estações da RBMC com taxas de 15 segundos para 24h de rastreamento e muitas dessas estações possuem também a opção de dados a 1 segundo em arquivos horários. A taxa de 1 segundo costuma ser escolha recorrente dos usuários, também, para a configuração de suas bases locais. Essa escolha muitas vezes se dá objetivando uma frequência maior de observações e de maneira que o arquivo gerado não se torne muito extenso, possibilitando alternativas de processamento como o PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) do IBGE. Porém, há a necessidade de se juntar os arquivos horários, caso o levantamento exceda 1 hora de duração.

Além desses cenários, existem alternativas de taxa de frequência maiores que 1 segundo que podem ser configuradas pelo usuário, o que possibilita uma maior quantidade de observações. A escolha, por exemplo, de uma taxa de frequência de 5Hz (0,2 segundos) para o receptor a bordo da RPA é indicada para melhor performance no provimento da trajetória, tendo em vista a velocidade média de 15m/s da RPA no deslocamento para mapeamento da trajetória e tomada das fotos. Quanto maior for a amostragem de posicionamento na trajetória, menor serão os erros de interpolação para as posições do CP nos momentos de tomada das imagens.

O desenvolvimento da pesquisa proposta neste trabalho, busca ser, também, um complemento no esforço industrial e acadêmico da parceria entre CEPAG e Guandalini Posicionamento, que tem proporcionado inovação tecnológica e crescimento técnico-científico para a comunidade acadêmica e profissional. Diante disso as análises e discussões propostas neste trabalho visam preencher lacunas nos estudos até então desenvolvidos e contemplar aspectos importantes no que tange às possibilidades de pós processamento de dados GNSS para estimativa de trajetória de RPA para o processamento fotogramétrico, considerando opções que estão ao alcance dos usuários. Dentro desse aspecto estão: as alternativas proporcionadas pelo uso de receptores de frequência simples ou dupla a bordo do RPA; a utilização de receptores para linhas de base curta e longa (sendo essa acima de 100 km), no

caso de posicionamento relativo; e diferentes taxas de atualização das observações para o receptor base. Parte desse escopo está em identificar as características refletidas para cada alternativa.

Por fim, tendo em vista a importância da análise de qualidade dos produtos fotogramétricos gerados, através da Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) e da Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG), disponibilizadas pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (DSG), podemos obter critérios para classificação da qualidade de um produto cartográfico de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). O PEC é um indicador estatístico onde a partir do gráfico probabilístico de distribuição normal, o produto cartográfico pode ser avaliado, em níveis de precisão, com uma probabilidade de 90%, de acordo com a dispersão estatística considerada. Nesse sentido, o presente trabalho busca realizar a análise de tendências no controle de qualidade de um produto cartográfico, bem como o processo de determinação da classificação do produto segundo a normatização vigente (PEC-PCD).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Analisar a influência de diferentes estratégias de pós-processamento GNSS, no provimento de trajetórias de voo de RPA, em levantamentos aerofotogramétricos com os kits PPK-Guandalini.

1.2.2. Objetivos específicos

- Estimar as trajetórias a partir do uso de diferentes métodos e configurações, de posicionamento, para um conjunto de voos;
- Averiguar e identificar fatores de possíveis influências das trajetórias no processamento das imagens;

- Analisar estatisticamente a qualidade dos produtos fotogramétricos gerados, conforme critérios estabelecidos no PEC-PCD;
- Identificar vantagens e desvantagens no uso das diferentes estratégias de processamento dos dados GNSS;

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. ESTADO DA ARTE DO MAPEAMENTO FOTOGRAFÉTRICO COM RPA

O termo *drone* tem sido utilizado pelos usuários e pela imprensa para designar todo objeto voador não tripulado. No Brasil, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) regulamenta, fiscaliza e norteia as características e classificações referentes às aeronaves não tripuladas. Em outros contextos, os veículos aéreos que voam sem a necessidade de tripulantes são conhecidos como VANT, abreviatura em português para o termo Veículo Aéreo Não Tripulado, sendo na literatura mais recorrente o termo em inglês para *Unmanned Aerial Vehicle* ou *Unmanned Airbone Vehicle* – UAV. Porém, de acordo com a regulamentação brasileira, tem-se Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA).

As opções tecnológicas contemplam os modelos multirrotor com quatro, seis e até oito motores, ou de asa fixa com decolagem manual, automática ou com uso de lançadores. Além desses, existe a opção de modelos mistos de asa fixa que decolam da mesma maneira que um multirrotor e, ao atingirem a altura de cruzeiro, assumem a função de uma aeronave com asa fixa.

No Brasil, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) regulamenta, fiscaliza e norteia as características e classificações referentes às aeronaves não tripuladas. Esta agência, a partir do Regulamento Brasileiro Da Aviação Civil Especial (RBAC-E nº 94), estabeleceu definições, requisitos gerais e condições para a operação de aeronaves não tripuladas de uso civil. Porém, ressalta-se, também, a necessidade de se observar as regulamentações de outros entes da administração pública direta e indireta antes do uso, tais como a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e o Ministério da Defesa.

A análise de técnicas e procedimentos para o mapeamento com uso de aeronaves remotamente pilotadas (RPA) têm sido de contínuo pesquisadas e estudadas, visando investigações, consolidações e aprimoramentos. Neste sentido, os produtos gerados por RPA voltados ao mapeamento tem recebido especial atenção pela comunidade científica, podendo citar os trabalhos de Vidal (2013), Viana (2017), Silva (2018), Lopes (2019), Pedreira et al. (2020), entre outros.

Vidal (2013) recorreu à fototriangulação com pontos de controle e georreferenciamento direto para restituição das imagens obtidas por RPA. Para o posicionamento da RPA foi utilizado o receptor GPS monofrequência de navegação e o método PPS. Na avaliação posicional da informação restituída foram utilizadas coordenadas do espaço objeto. No trabalho deste autor foram calculadas as diferenças entre essas coordenadas e suas correspondentes obtidas do processo de triangulação fotogramétrica, bem como a média, a raiz do erro quadrático médio (REQM) e valores de máximo e mínimo. Obtendo um REQM em X de 0,136 m, em Y de 0,18 m e de 0,447 m para a componente vertical, no Sistema Geodésico Local (SGL).

Em outra abordagem, Silva (2018), buscou identificar o potencial do uso de VANTs para o mapeamento e monitoramento costeiro tridimensional considerando informações horizontais através da posição espacial da linha de costa bem como verticais com a extração do Modelo Digital do Terreno - MDT tendo como estudo de caso a Ilhota Coroa do Avião, localizada próximo à Ilha de Itamaracá, mas pertencente ao município de Igarassu, em Pernambuco. Nesta, foi realizada a comparação do mapeamento da linha de costa, realizada através do método relativo cinemático através do Posicionamento por Ponto Preciso – PPP com as informações altimétricas obtidas pelo MDT gerado pelo VANT e a coleta das coordenadas planialtimétricas de diversas amostras ao longo da superfície da praia com receptores GNSS.

Aspectos como estes, são importantes para avaliar métodos de integração de dados oriundos do uso de RPAs e dados coletados por posicionamento GNSS, para o posicionamento da mesma. Ao longo desse processo há de se considerar a necessidade de um refinamento desta integração.

Relacionados ao uso de receptor GNSS embarcado para posicionamento de RPA durante o mapeamento fotogramétrico, pode-se citar Stöcker (2017), o qual analisou a influência das observações angulares e da precisão das observações GNSS/IMU. Neste trabalho foram considerados o movimento angular excessivo e problemas de sincronização de tempo durante o voo. A precisão geométrica final foi avaliada usando georreferenciamento direto com correções IMU/GNSS e PPK pós-processadas de alta qualidade. Tendo sido os erros avaliados a nível de pixel, obteve,

no geral, uma precisão (REQM) em torno de 0,028 m para os pontos de verificação em solo (SGL).

Daakir (2017), apresenta um sistema composto por um receptor GPS de frequência única, coletando dados à uma taxa de 1s, e uma câmera leve de qualidade fotogramétrica embarcados em RPA. Foram analisados o PPK da trajetória utilizando uma linha de base curta, como também o uso de um sistema de orientação e a calibração dos *lever-arms* para posicionamento da câmera. Com o intuito de verificar o comparativo de diferentes abordagens para a calibração do posicionamento e orientação da câmera, o estudo identificou uma precisão entre 0,005 m e 0,02 m usando georreferenciamento direto com base nos parâmetros de calibração (deslocamento dos *lever-arms* e parâmetros internos da câmera) calculados em uma primeira aquisição. E uma precisão alcançada, usando 1 ponto de controle, entre 0,004 m e 0,017 m.

Uma considerável abordagem do tema proposto, foi feita por Grayson (2018), que analisou a possibilidade de uso do PPP cinemático na provisão de trajetória utilizando RPA do tipo “asa fixa”. Foi utilizado um receptor dupla frequência a bordo do RPA, registrando observações a uma taxa de 0,1 s. Considerando as variações das coordenadas UTM nos pontos de verificação, à nível de pixel, foram alcançadas exatidões em torno de 0,02 a 0,03 m para as coordenadas planimétricas dos pontos da trajetória e de 0,10 m para a componente altimétrica. A trajetória foi comparada com o pós processamento realizado utilizando um receptor dupla frequência, multi constelação à uma taxa de 0,2 s de observação, que obteve exatidões na faixa de 0,03 m.

Dinkov e Kitev (2020) avaliaram a precisão geoespacial de produtos fotogramétricos, obtidos pelo método PPK embarcado em RPA, para o georreferenciamento direto. Utilizando um receptor GNSS (Emlid M+) na RPA modelo Phantom 4 Pro da DJI, os resultados obtidos foram comparados com a abordagem tradicional de georreferenciamento pelo uso de pontos de controle.

O estudo de Dinkov e Kitev (2020) identificou que a AT com GCP (do inglês *Ground Control Points*) para georreferenciamento fornece melhor precisão no processamento digital dos produtos. Ainda assim, os valores de exatidão nos pontos de verificação obtidos nos estudos do método PPK para georreferenciamento direto

se mostraram estáveis, não ultrapassando 3 vezes o valor do GSD (do inglês *Ground Sample Distance*). O estudo mostrou, também, que o uso de um ponto de controle possibilita a redução dos erros apresentados nos valores de altura devido a erros sistemáticos, atingindo o mesmo nível de exatidão na AT.

Ercolin Filho et al. (2020), analisaram a integração do kit PPK-Guandalini em RPA, tendo como um dos pontos iniciais a possibilidade de redução na quantidade de pontos de controle a serem levantados em campo. Os pontos de controle atuam no sentido de possibilitar o refinamento dos Parâmetros de Orientação Interior (POI) e refinamento das posições dos CPs do conjunto de imagens, no georreferenciamento indireto.

Nesta pesquisa, os autores analisaram as discrepâncias tridimensionais de pontos de verificação no terreno, considerando diferentes abordagens para a obtenção dos ângulos de orientação e parâmetros de calibração da câmera, bem como fazendo uso tanto da posição geodésica tridimensional original fornecida pela RPA, como da posição geodésica tridimensional fornecida pela trajetória do Kit PPK com injeção relativa. Tais análises resultaram na identificação da possibilidade de determinação da calibração em serviço utilizando apenas um ponto de controle e também um aumento significativo da acurácia dos resultados obtidos com a utilização das informações de posição fornecidas pelo PPK se comparado com a posição original fornecida pelo GPS de navegação monofrequência original do RPA.

Kalacska (2020), testou 14 RPAs para avaliar a precisão posicional dentro do modelo de reconstruções SfM-MVS de paisagens de baixo relevo sem GCPs, identificou em 8 desses RPAs a possibilidade de atingir uma precisão posicional (REQM) entre 0,5 m e 2 m. Identificou então que a alta precisão posicional não está necessariamente relacionada ao custo ou grau da plataforma, mas o aspecto mais importante é o uso de soluções PPK ou RTK para geotagging das fotografias.

Tem-se também, Padró (2019), que em sua pesquisa verificou que o georreferenciamento direto usando dados gnss brutos do RPA renderam uma exatidão horizontal na ordem de 1,062 m e 4,209 m de exatidão vertical, nos pontos de verificação; para o uso do PPK com receptor monofrequência a exatidão horizontal foi de 0,256 m e vertical igual a 0,238; já no uso do PPK com receptor dupla frequência foi de 0,036 na horizontal e vertical.

Já Teppati Losè et al. (2020), investigou as possibilidades oferecidas por um sistema comercial multirrotor equipado com um receptor GNSS habilitado para RTK, com foco na precisão da fase de georreferenciamento. Vários testes foram realizados explorando diferentes soluções de georreferenciamento, utilizando o método PPK e RTK. Para o PPK, utilizando o RPA Phantom 4 RTK da DJI, foram testados os processamentos das trajetórias utilizando como base, um receptor Geomax Zenith 35 posicionado à menos de 1 km da área do levantamento, um RINEX virtual gerado no centro da área e dados de estações CORS (do inglês, *Continuous Operating Reference Stations*) estando à distâncias entre 8 km e 68 km da área. Analisando as coordenadas tridimensionais dos CPs, houve uma variação do REQM alcançado em cada experimento, entre 0,03 m e 3 m, sendo a melhor exatidão obtida com a utilização de estação base posicionada a menos de 1km da área de levantamento, utilização de 3 pontos de controle, auto-calibração da câmera feita na mesma área e utilização de uma combinação de fotos nadirais e oblíquas.

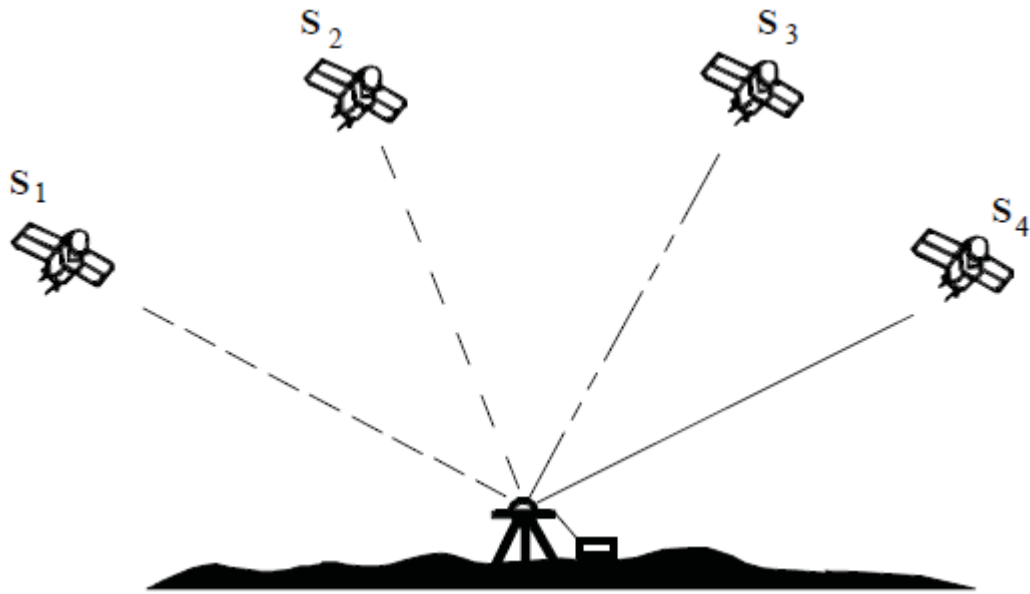
Podemos citar ainda, trabalhos como Darren et al. (2014), Daakir et al. (2017), Zimmermann et al. (2017), Atunggal (2018), Štroner (2020), dentre outras pesquisas que vêm sendo realizadas no mesmo âmbito e merecem melhor averiguação, uma vez que esse assunto possui crescente demanda na área das Geociências.

2.2. MÉTODOS DE POSICIONAMENTO GNSS

Quando o ICAO (*International Civil Aviation Organization*), em 1991, na 10ª Conferência de Navegação Aérea, reconheceu que o sistema de navegação do século XXI seria um sistema global de navegação por satélites, surgiu então o termo GNSS.

O princípio de navegação pelo sistema de posicionamento GNSS consiste em medir as distâncias, entre os centros de fase das antenas transmissora, à bordo do satélite e receptora do usuário, de pelo menos quatro satélites acima do horizonte do observador. Conhecidas as coordenadas dos satélites, referenciadas à um Sistema de Referência Terrestre, é possível estimar as coordenadas de um ponto na superfície terrestre ou acima dela (SEEBER, 2003). A Figura 1 ilustra esse princípio.

FIGURA 1 – PRINCÍPIO DO FUNCIONAMENTO DO GNSS



FONTE: Adaptado de Leick (2004).

A realização do posicionamento GNSS utilizando-se o conceito de distância pode ser feita a partir do uso exclusivo da observável chamada pseudodistância, ou desta juntamente com a observável chamada fase da onda portadora. Sendo a segunda cem vezes mais precisa.

A Tabela 1 apresenta algumas características das principais constelações de satélites artificiais que compõem o GNSS.

TABELA 1 – CONSTELAÇÕES QUE COMPÕEM O GNSS

(continua)

CONSTELAÇÃO	<i>GPS</i>	<i>GLONASS</i>	<i>GALILEO</i>	<i>BEIDOU/COMPASS</i>
DESENVOLVIMENTO	EUA	Rússia	União Européia	China
SATÉLITES OPERACIONAIS	31	24	22	42
ÓRBITAS	6	3	3	3

TABELA 1 – CONSTELAÇÕES QUE COMPÕEM O GNSS

(conclusão)

CONSTELAÇÃO	GPS	GLONASS	GALILEO	BEIDOU/COMPASS
INCLINAÇÃO	55°	64,8°	56°	55°
ALTITUDE (KM)	20200	19100	23222	21500
FREQUÊNCIAS (MHz)	L1: 1575,42 L2: 1227,60 L5: 1176,45	L1: 1597-1617 L2: 1240-1260 L3: 1202,025	E1: 1575,42 E5a: 1176,45 E5b: 1207,14 E5: 1191,795 E6: 1278,75	B1: 1561,098 B2: 1207,14 B3: 1268,52

FONTE: O autor (2021).

NOTA: Busca realizada em janeiro de 2022.

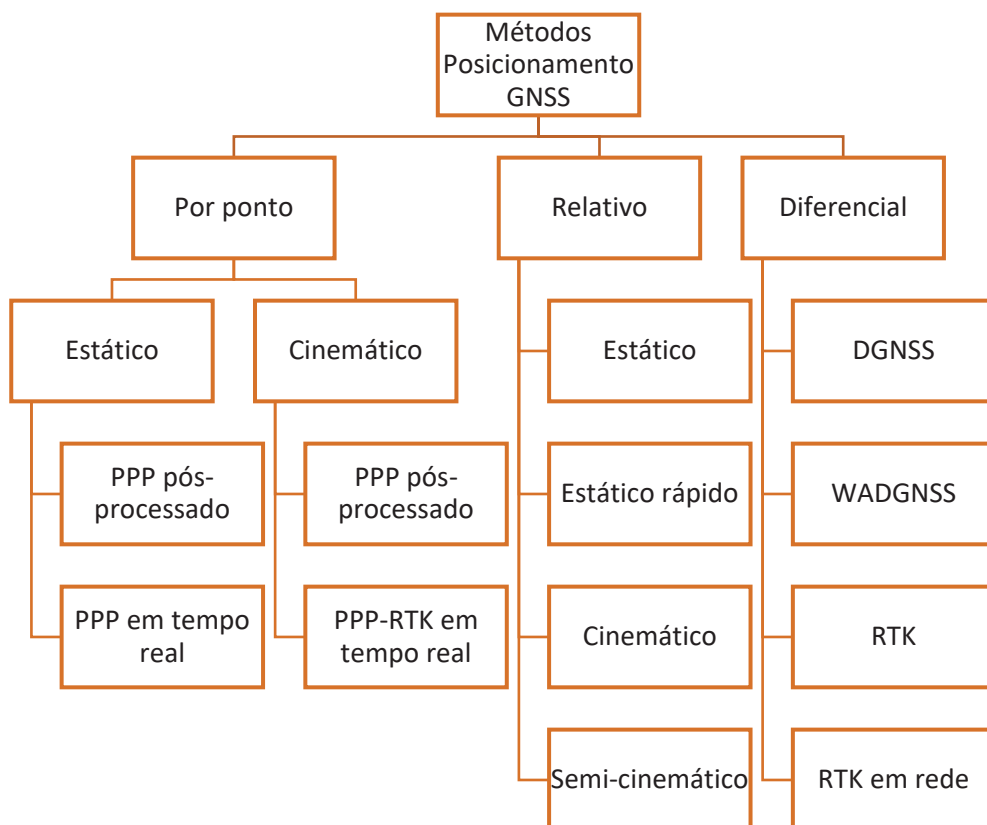
De acordo com Monico (2007), o método de posicionamento GNSS pode ser absoluto, quando as coordenadas estão associadas diretamente ao geocentro, e relativo, quando as coordenadas são determinadas com relação a um referencial materializado por um ou mais vértices com coordenadas conhecidas, denominadas de estação (ões) base. Pode-se usar ainda o método DGNSS (*Differential GNSS*), onde um receptor é estacionado em uma estação de referência e suas diferenças são calculadas, seja entre as coordenadas estimadas (posicionamento por ponto) e as conhecidas ou entre as pseudodistâncias observadas e as determinadas a partir das posições dos satélites e da estação. Sendo a pseudodistância mais utilizada na prática.

Quanto à técnica de posicionamento, em uma classificação simples, o posicionamento pode ser estático, quando o receptor se encontra em repouso ou cinemático quando o receptor se encontra em movimento. Outras técnicas são possíveis aproveitando-se da capacidade do receptor coletar de forma ininterrupta as observáveis, ou limitando-se a precisão de posicionamento. Como exemplo, pode-se citar a técnica estático rápido, que é um posicionamento estático com menor tempo de duração em relação ao estático, e o semi-cinemático (*stop and go*) na qual a

gravação de observáveis é cortada no deslocamento de uma estação para outra (LEICK, 2004).

Outro conceito importante trata da solução do posicionamento, em tempo real e pós-processado. Enquanto no primeiro o posicionamento da estação de interesse é estimado praticamente no mesmo instante em que as observações são coletadas, no segundo a estimativa ocorre em um processamento posterior à coleta. Na Figura 2 é apresentado um esquema gráfico dos diferentes métodos, técnicas e soluções de posicionamento GNSS. Nos sub-itens a seguir são apresentadas as observáveis pseudodistância de fase da onda portadora, bem como os detalhes dos métodos PPS, PPP, PPK e RTK que são mais diretamente citados nesta pesquisa.

FIGURA 2 – MÉTODOS E TÉCNICAS DO POSICIONAMENTO GNSS



FONTE: O autor (2021).

2.2.1. Pseudodistância

No contexto do uso das pseudodistâncias, as medidas de distância entre o satélite e o receptor são baseadas na diferença entre o código gerado no oscilador à bordo do satélite e sua réplica gerada no oscilador instalado no receptor. Percorrendo-se o caminho entre o satélite e o receptor, há um retardo entre o código gerado no satélite e aquele gerado no receptor. Esse retardo é o tempo de propagação do sinal nesse trajeto Δt (MONICO, 2007).

A distância entre o satélite e o receptor é o produto de Δt pelo módulo da velocidade da luz no vácuo (c). No entanto, há um não sincronismo entre o Sistema de Tempo adotado como referência, particular de cada sistema de posicionamento (Sistema de Tempo GPS, Sistema de Tempo GLONASS, etc) com o Sistema de Tempo do relógio contido no receptor do usuário e com os Sistemas de Tempo definidos em cada satélite com seu relógio atômico embarcado. No caso do GPS, tem-se o Sistema de Tempo GPS. Como as medidas de distância são calculadas com essa falta de sincronia e com outros erros sistemáticos envolvidos, as distâncias são denominadas pseudodistâncias. Dessa forma, os Sistemas de Tempo do satélite (t^s) e do receptor (t_r), aos quais os sinais gerados e transmitidos são referenciados, são relacionados com o Tempo do Sistema em questão (GPS, GLONASS ou Galileo), subtraindo-se um erro nos relógios dos satélites (dt^s) e no relógio do receptor (dt_r), ($t_{GNSS} = t^s - dt^s$ e $t_{GNSS_r} = t_r - dt_r$), respectivamente (SEEBER, 2003).

A pseudodistância (PD) pode ser obtida através de uma correlação cruzada entre o sinal emitido e sua réplica, para que se possa calcular essa diferença de tempo entre a emissão no satélite e sua chegada ao receptor. A medida de pseudodistância não consiste, de fato, na distância geométrica entre satélite e receptor. Isto se deve ao fato de que o sinal não se propaga com velocidade constante, podendo sofrer refrações específicas na atmosfera sobretudo da troposfera e da ionosfera. Por esta razão, a observável pseudodistância pode ser melhor descrita pelo seguinte modelo matemático (MONICO, 2007):

$$PD_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + I_r^s + \varepsilon_r^s, \quad (01)$$

na qual PD_r^s refere-se à pseudodistância em metros entre as antenas do satélite s , no instante de transmissão, e do receptor r , no instante de recepção; ρ_r^s refere-se à distância geométrica entre as antenas do satélite s , no instante de transmissão, e do receptor r , no instante de recepção; c é a velocidade da luz no vácuo; dt_r é o erro do relógio do receptor no instante de recepção; dt^s é o erro do relógio do satélite s no instante de transmissão; T_r^s e I_r^s referem-se respectivamente aos atrasos troposférico e ionosférico; e ε_r^s refere-se a outros efeitos não modelados.

Segundo Hofmann, Lichtenegger e Collins (2001) a distância geométrica (ρ_r^s) pode ser dada por:

$$\rho_r^s = \sqrt{(x^s - x_r)^2 + (y^s - y_r)^2 + (z^s - z_r)^2} + \varepsilon_r^s, \quad (02)$$

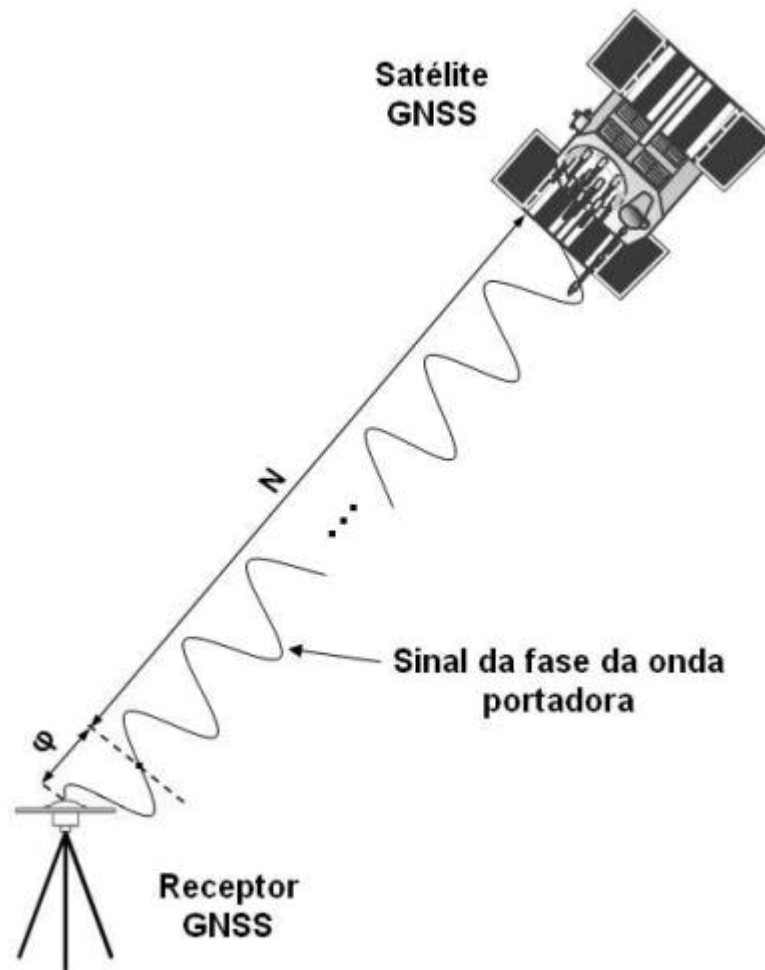
na qual x^s , y^s e z^s são as coordenadas cartesianas do satélite; x_r , y_r e z_r as coordenadas cartesianas do receptor; e ε_r^s refere-se a erros de medida devido a efeitos externos.

2.2.2. Fase da onda portadora

A maioria das atividades geodésicas se utiliza da fase da onda portadora como observável básica, sendo mais precisa que a pseudodistância. Essa observável é obtida a partir da diferença entre a fase gerada pelo receptor no momento da recepção, e a fase gerada no satélite no tempo de transmissão. Quando a fase chega ao receptor, este mede apenas a parte fracional da onda, restando um número inteiro de ciclos no instante inicial do rastreo, denominado de ambiguidade da fase (N). A ambiguidade é única para cada par satélite-receptor, desde que a contagem dos ciclos não seja interrompida (se tal acontecer dá-se um salto de ciclo). Quando há perda momentânea do sinal do satélite, é introduzida uma nova ambiguidade.

A Figura 3 ilustra a propagação do sinal, a ambiguidade da fase.

FIGURA 3 – FASE DA ONDA PORTADORA



FONTE: Monico (2007).

A equação de observação da fase da onda portadora, em metros, pode ser escrita como (adaptada de MONICO, 2008):

$$\lambda \Delta \phi_r^s(t_r) = (\rho_r^s - I_r^s + T_r^s + dm_r^s) + c[dt_r(t_r) - dt^s(t_t)] + \lambda[\phi^s(t_{r_0}) - \phi_r^g(t_{r_0})] + \lambda \bar{N}_r^s + \varepsilon_{\phi_r^s}, \quad (03)$$

na qual c é a velocidade da luz no vácuo em m/s, ρ_r^s é a distância geométrica, em metros, entre o centro de fase da antena transmissora dos sinais no satélite e o centro de fase da antena do receptor, I_r^s é o erro devido ao atraso da Ionosfera, T_r^s é o erro devido ao atraso da Troposfera, dm_r^s é o efeito causado pelo multicaminho na fase,

dt_r , é o erro do relógio do receptor, dt^s é o erro do relógio do satélite, $\phi^s(t_{r_0})$ a fase gerada no satélite, $\phi_r^g(t_{r_0})$ a fase gerada no receptor, \bar{N}_r^s trata da ambiguidade inteira e dos componentes do atraso de hardware e $\varepsilon_{\phi_r^s}$ refere-se a outros erros não modelados na fase da onda portadora.

2.2.3. Posicionamento por Ponto Simples

O método de posicionamento por ponto simples faz uso das pseudodistâncias, normalmente em uma única frequência, e necessita apenas de um receptor. Em geral é utilizado em levantamentos de baixa acurácia para fins de localização aproximada e de navegação. Também, em geral, não é realizado um ajustamento sequencial com as observáveis coletadas em diferentes épocas, uma vez que não há gravação de dados. Por exemplo, usando a pseudodistância derivada do código C/A do GPS presente na portadora L1, a precisão do método para é de cerca de 10m após a eliminação da técnica de Disponibilidade Seletiva (AS – do inglês *Selective Availability*), em 02/05/2000 (SEEBER, 2003).

A medida simultânea de quatro distâncias para quatro satélites permite a montagem de um sistema de quatro equações de observação, com quatro incógnitas, desde que se disponha dos erros dos relógios dos satélites. A partir da recepção do sinal de um quinto satélite ou mais, com um sistema de cinco ou mais equações a quatro incógnitas, pode-se realizar o ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) em uma dada época e dispor das precisões das coordenadas. O modelo matemático funcional do método PPS é dado por:

$$PD(\tau) = \sqrt{[x^s(t) - x_r]^2 + [y^s(t) - y_r]^2 + [z^s(t) - z_r]^2} + c[a_0 + a_1(\tau - \tau_0) + a_2(\tau - \tau_0)^2] - cdt_r, \quad (04)$$

na qual x^s , y^s e z^s são coordenadas do satélite no instante t ; x_r , y_r e z_r as coordenadas da antena do receptor; t é o instante GPS da transmissão; c é a

velocidade da luz; a_0 o estado do relógio do receptor no instante τ_0 do primeiro grupo de observações; a_1 é a marcha do relógio do receptor; a_2 a variação da marcha do relógio do receptor; τ_0 é o instante do primeiro grupo de observações; τ é o instante de cada grupo de observações; e dt_r é o erro do relógio do receptor no instante de recepção;

2.2.4. Posicionamento por Ponto Preciso

O Posicionamento por Ponto Preciso tem sido amplamente utilizado por diversos usuários, tendo em vista a sua praticidade no processamento e o fato de que apenas um receptor é empregado em campo, ao invés de um par, como ocorre nos métodos de posicionamento relativo e diferencial. A aplicação do PPP está presente em monitoramento de deformações da crosta terrestre, GPS-meteorologia, determinação de campo de velocidades, agricultura de precisão e determinação de órbitas de satélites de órbitas baixas.

Além disso, no Brasil, a terceira edição da Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais (NTGIR) indicou o uso do PPP na estimativa de coordenadas de vértices de apoio ou de referência (estação base), para fins de levantamentos relativos dos vértices que definem o imóvel rural a ser georreferenciado (INCRA, 2013). Existem também, formatos on-line de processamento PPP, como os do IBGE e do *Jet Propulsion Laboratory* (JPL). Tem-se ainda formatos off-line como os softwares científicos RTKLIB, gLAB, GIPSY-OASIS e Bernese GPS software.

Nesse método são empregadas as observáveis pseudodistância e fase da onda portadora em conjunto com informações precisas sobre a órbita e relógios de satélites, além de efeitos atmosféricos (ZUMBERGE et al., 1997), além dos erros sistemáticos envolvidos no processo de coleta das observações e efeitos geodinâmicos que afetam a estação são considerados no processamento. Faz-se uso então de modelos matemáticos ou estimativa de parâmetros de ajustamento no momento do processamento. Como exemplo, podem-se citar os deslocamentos dos centros de fase das antenas do receptor e do satélite, a refração troposférica e

ionosférica, a fase Wind-up, o efeito da relatividade, a rotação da Terra, as marés terrestres e a carga oceânica.

No que diz respeito às observáveis envolvidas no PPP, é comum que se utilizem dados de receptores de dupla frequência (L1/L2), muito embora o uso de dados de simples frequência também tenha sido inserido nesse método. Para o primeiro caso a observável combinada livre de ionosfera (*ion-free*) pode ser utilizada, tanto para a fase quanto para a pseudodistância e para suprimir os efeitos de 1ª ordem da refração ionosférica. Já no segundo caso é comum empregar algum modelo para reduzir os efeitos da ionosfera.

Geralmente, com o método tradicional do PPP, são necessários aproximadamente 30 minutos para que uma solução de posição possa ser alcançada em um nível de acurácia da ordem do decímetro, em um processamento estático (ALVES et al., 2011; IBGE, 2020). No PPP, quando todos os erros forem adequadamente tratados e se for usado um período longo de observações de receptores de dupla frequência, obtém-se alto nível de acurácia (MONICO, 2007; ZUMBERGE *et al.*, 1997).

2.2.5. *Post-Processed Kinematic*

O PPK é o posicionamento relativo cinemático pós-processado, onde um ou mais receptores GNSS ocupam uma ou mais estações base de referência com coordenadas conhecidas, enquanto um outro receptor móvel (*rover*) se desloca sobre as feições de interesse. Neste método, embora a antena esteja em movimento, a trajetória é descrita pelo posicionamento de uma série de pontos.

Segundo Seeber (2003), a recepção de observações simultâneas nos dois receptores possibilita calcular as duplas diferenças (DD) de pseudodistâncias e fases das ondas portadoras, onde vários erros sistemáticos envolvidos nas observáveis são eliminados matematicamente ou reduzidos. 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. Em caso de linha de base curta, isto é, menor que 15 km (MONICO, 2007), tem-se a possibilidade de minimização dos

erros de refrações troposférica e ionosférica, de efeitos geodinâmicos, como marés terrestres, e de deslocamentos de centro de fase das antenas receptores, desde que os receptores base e móvel sejam do mesmo fabricante/modelo e que sejam orientadas em uma direção comum em campo. No caso de linhas de base longas, isto é, maiores que 15 km, estes erros devem ser modelados matematicamente. No caso da refração ionosférica, os erros de primeira ordem são eliminados com a combinação linear das observáveis em duas frequências diferentes chamada livre de ionosfera (LEICK, 2004).

Para a solução do vetor de ambiguidades, deve-se realizar um período de inicialização, onde o receptor móvel fica parado por um período de tempo em um ponto antes de se deslocar cinematicamente. De forma alternativa, pode-se solucionar a ambiguidade durante o trajeto, desde que este tenha tempo suficiente e que não haja perdas de ciclo em excesso. A desvantagem neste último caso é que as soluções no início da trajetória podem apresentar menor precisão.

É necessário que haja um número suficiente de satélites para que exista redundância e seja possível obter uma solução. No caso de serem rastreados quatro satélites, por exemplo, serão obtidas três DDs a cada época de dados (sem a utilização de combinações lineares nas observáveis), número igual às correções das coordenadas a serem determinadas. Acrescentam-se ainda as três ambiguidades, o que resulta em um grau de liberdade negativo igual a -3. No caso de cinco satélites e k posições, o número de graus de liberdade é $(k - 4)$. O número de graus de liberdade neste caso é dado por:

$$GL = k(n^s - 4) - n^s + 1, \quad (05)$$

na qual GL é o número de graus de liberdade e n^s é o número de satélites rastreados.

Por sua característica dinâmica, esse método é ideal para o estudo das trajetórias obtidas. Nesse sentido, temos diferentes trabalhos utilizando diferentes metodologias e aparelhos, como Morton et al. (1993) que utilizou o GNSS no método de posicionamento cinemático adaptado em um veículo traçado comparando-os com dados de levantamento tradicional com teodolito na praia arenosa de Galvestone no

Golfo do México; Huang, Jackson e Cooper (2002) comparou resultados de dados obtidos por GNSS no método de posicionamento RTK e por perfis obtidos por estação total com uma precisão planimétrica de 0,010m e altimétrica de 0,019m na praia de Runkerry no nordeste da Irlanda; Baptista et al. (2008) realizou o monitoramento de diversas praias no litoral de Portugal com GNSS em um sistema multiantena adaptado em um quadriciclo e em um monociclo obtendo precisão de 0,03m planimétricos e 0,04m altimétricos gerando MDE (Modelo Digital de Elevação).

2.2.6. *Real Time Kinematic*

O *Real-Time Kinematic* (RTK) é a técnica de posicionamento relativo cinemático em tempo real que tem sido muito utilizada, pois permite ao usuário determinar a sua posição, com acurácia centimétrica na maioria dos casos, em tempo real (SILVA, 2015).

Para realizar o posicionamento pela técnica RTK são utilizados no mínimo dois receptores coletando dados contínua e simultaneamente. Um dos receptores é a estação de referência (base) e fica posicionado sobre um ponto de coordenadas conhecidas. A base é responsável por enviar correções ao receptor móvel através de um link (sinal de rádio ou internet). O receptor móvel é posicionado no ponto de interesse para fornecer suas coordenadas em tempo real considerando as correções recebidas através do link (BARBOSA et al., 2010).

A tecnologia é baseada na transmissão em tempo real dos dados da fase da onda portadora e pseudodistância da estação base para estação móvel juntamente com as correções das mesmas. Para a resolução da ambiguidade deve-se ter um tempo de inicialização, assim como no caso do PPK. A transmissão dos dados do receptor base para o receptor móvel se dá no formato de mensagem RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) e os receptores podem ser de simples ou dupla frequência. Como mencionado essa transmissão pode ser feita via link de rádio ou algum outro meio de comunicação, como a internet por exemplo.

A cobertura de telefonia móvel do tipo GSM/GPRS (*Global System of Mobile/General Packet Radio Services*) tem avançado, possibilitando assim o acesso

à internet móvel 3G ou 4G também nos receptores GNSS. Segundo Guandalini (2012), a transmissão das observações de fases por meio da conexão GSM pode ser realizada de quatro formas distintas:

- Os receptores GNSS base e móvel são configurados com conexão GSM, obtida pela inserção do dispositivo microeletrônico chip SIM (*Subscriber Identity Module*). Estes poderão se comunicar diretamente entre si utilizando a conexão GSM, quando disponível, possibilitando a sua instalação em qualquer local ou ponto de coordenadas conhecidas ou a serem determinadas. A comunicação entre os receptores base imóvel será estabelecida através de ligação telefônica feita a partir do número identificador do SIM do receptor base;
- A comunicação entre uma única estação de referência que disponibiliza o RTCM diretamente em um IP (*Internet Protocol*) sem nenhum controle de acesso dos receptores móveis;
- A conexão entre o receptor móvel e um conjunto de estações de referência denominado de rede NTRIP através de um software de gerenciamento que recebe os dados e controla os acessos. Neste método é utilizado apenas um chip SIM introduzido no receptor móvel para conexão com a estação de referência mais próximo para a obtenção das observações de fase;
- Um conjunto de no mínimo três estações de referência ligadas a um servidor, que gerencia correções RTK dentro de uma área de trabalho. Este método é o RTK em REDE e um de seus formatos é conhecido como VRS (*Virtual Reference Station*).

A técnica RTK via link de rádio está sujeita à dificuldades na transmissão devido à possibilidade de obstruções em decorrência de objetos, podendo também haver interferência entre os canais de rádio ou ainda pela distância de linha de base. Estes problemas não ocorrem na comunicação via GSM/GPSR. Porém, este tipo de comunicação fica dependente da disponibilidade de cobertura dos serviços de telefonia celular na região do levantamento.

Em geral os efeitos da refração atmosférica não são considerados pois as suas aplicações são limitadas a linhas de base curtas, nas quais efeitos atmosféricos são praticamente idênticos nas duas estações e ficam bastante reduzidos nas equações de duplas diferenças. As redes de estações de referência (CORS:

Continuous Operating Reference Stations), que funcionam em áreas geográficas vastas, reduzem o impacto dos erros dependentes da distância entre a estação de referência e a estação *rover* e fornecem precisão centimétrica no posicionamento para distâncias maiores do que o posicionamento RTK convencional.

A metodologia rede-RTK utiliza uma rede de estações de referência GNSS, com coordenadas conhecidas com precisão. Com o advento das redes de referência ativas, o usuário pode utilizar apenas um receptor e usar os dados destas estações: o conceito fundamental desta técnica de posicionamento é que os dois ou mais receptores envolvidos possam receber dados, simultaneamente, de pelo menos dois satélites comuns. Para obter as correções RTK a fornecer aos usuários há diferentes conceitos, que são sintetizados sob o termo VRS (do inglês *Virtual Reference Station*).

O envio destas correções aos usuários pode ser feita recorrendo a formatos de mensagens, quer do tipo proprietário, quer do tipo padrão. No caso das mensagens com formato padrão, estas obedecem ao formato de mensagens idealizado pela comissão RTCM-SC104 (*Radio Technical Commission for Maritime Services - Special Committee No. 104*). Esta comissão envolve representantes do governo americano e das indústrias e tem por missão desenvolver modelos padronizados de transmissão de dados para técnicas de posicionamento diferencial por satélite. Estas mensagens são, por isso, vulgarmente denominadas de mensagens RTCM (versões RTCM 2.3 e RTCM 3.0, entre outras). O objetivo de uma rede de estações de referência é modelar e estimar os erros causados pela propagação do sinal na ionosfera e na troposfera, assim como os erros orbitais (erros dependentes da distância entre o receptor *rover* e a estação de referência), com base em medições das fases das frequências L1 e L2 a nível local ou regional (ALVES, 2008).

2.3. ERROS SISTEMÁTICOS NO POSICIONAMENTO GNSS

As observáveis utilizadas no posicionamento GNSS estão sujeitas a erros grosseiros, aleatórios e sistemáticos. Enquanto para a questão dos erros grosseiros tem-se processos de detecção, identificação e adaptação, na questão dos erros sistemáticos deve-se ter sempre uma busca pelo total conhecimento e identificação

para receberem o tratamento necessário, visando a obtenção de resultados mais acurados.

A Tabela 2 apresenta alguns desses diversos erros, relacionados às possíveis fontes e tratamentos nos métodos PPK e RTK.

TABELA 2 - ERROS SISTEMÁTICOS NO POSICIONAMENTO GNSS

SATÉLITE										
FONTE	Orbital	Relatividade	Atraso entre as duas portadoras no hardware do satélite	Atraso no hardware do satélite	Deslocamento do centro de massa para o centro de fase da antena do satélite	Variação do centro de fase da antena do satélite	Fase Wind-up	Relógio do satélite		
ERRO										
TRATAMENTOS PPK	Efemérides precisas, dupla diferença de fase		Sem combinação - modelagem matemática / Arquivo .DCB. Com combinação Ion-free - cancelado. Efeito nas efemérides e relógios - modelagem matemática / Arquivo .DCB		Modelagem matemática / Valores IGS	Modelagem matemática / Valores IGS	Modelagem matemática	Efemérides precisas, combinação linear de fase observada		
TRATAMENTOS RTK	Dupla diferença de fase							Combinação linear de fase observada		
TRAJETO DO SINAL										
FONTE	Ionosférico	Troposférico	Rotação da Terra (Sagnac)	Perda de sinal	Perda de ciclos	Multicaminho				
ERRO										
TRATAMENTOS PPK	Ion-free, modelos, combinação das portadoras L1 e L2	Modelos, máscara de elevação	Modelagem matemática	Identificação e estimação no processamento	Deteção com combinação linear de observáveis / Modelagem matemática	Máscara de elevação ou SNR, tecnologia adequada, planejamento, antenas especiais				
TRATAMENTOS RTK				Identificação e estimação no processamento		Planejamento, antenas especiais				
RECEPTOR										
FONTE	Relógio do receptor	Centro de fase da antena	Erro entre os canais	Atraso no hardware do receptor	Fase Wind-up	Atraso entre as duas portadoras no hardware do receptor	Ruído			
ERRO										
TRATAMENTOS PPK		Parâmetros de calibração da antena, uso de receptores de mesmo modelo e orientação	Calibração na inicialização / Efeito residual estimado junto com o erro do relógio do receptor	Estimado junto com o erro do relógio do receptor	Modelagem matemática	Sem combinação - Estimado junto com o erro do relógio do receptor para uma das duas portadoras ou calibrados de forma independente. Com combinação Ion-free - cancelado.	Tecnologia do receptor, uso da pseudodistância filtrada pela fase ou da fase da onda portadora			
TRATAMENTOS RTK		Uso de receptores de mesmo modelo e orientação	Calibração na inicialização / Efeito residual estimado junto com o erro do relógio do receptor	Estimado junto com o erro do relógio do receptor		Sem combinação - Estimado junto com o erro do relógio do receptor para uma das duas portadoras ou calibrados de forma independente.	Tecnologia do receptor, uso da pseudodistância filtrada pela fase ou da fase da onda portadora			
ESTAÇÃO										
FONTE	Tectónica de placas	Multicaminho	Movimento do polo	Carga oceânica	Pressão da atmosfera	Maté terrestre				
ERRO										
TRATAMENTOS PPK	Modelos de velocidades, uso de dois receptores situados sobre a mesma região da placa tectónica	Planejamento / Antenas especiais	Modelagem matemática - Boletim A e B do IERS / Arquivo .erp	Modelagem matemática + Arquivos .blq ou .HARPOS	Modelos, uso de dois receptores; efemérides do Sol/Lua					
TRATAMENTOS RTK	Uso de dois receptores situados sobre a mesma região da placa tectónica	Planejamento / Antenas especiais			Combinação linear de fase observada					

FONTE: O autor (2021).

Demais explicações a respeito dos mais variados tipos de erros sistemáticos no posicionamento GNSS podem ser encontradas em Seeber (2003), Leick (2004), Monico (2007) e Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008). Em seguida é descrito o erro devido aos deslocamentos dos centros de fases das antenas GNSS o qual está mais diretamente relacionado com o contexto do presente trabalho.

2.4. FOTOTRIANGULAÇÃO DE IMAGENS AÉREAS

Segundo Andrade (1998), a Fotogrametria é a ciência e tecnologia de obter informações confiáveis através de processos de registro, interpretação e mensuração de imagens. Pode-se dizer também que tal mensuração se dá em informações bidimensionais e tridimensionais georreferenciadas e ainda que parte dessa tecnologia é responsável por interpretar objetos e fenômenos a partir de análises sistemáticas das imagens. A relação existente entre imagem e objeto pode ser estabelecida por meio analógico ou digital, onde este se utiliza de imagens digitais e modelos matemáticos e o primeiro faz uso de equipamentos mecânicos e imagens analógicas.

Contudo, a formação geométrica de uma imagem é sustentada pela condição teórica de um modelo determinístico, que descreve com aproximação a realidade da projeção de pontos entre os espaços do objeto para o da imagem. Esta relação é dada pela condição de colinearidade, propriedade que permite, teoricamente, traçar uma reta que contenha o ponto objeto, centro de projeção e o ponto imagem (AROCHA BARRIOS, 2013).

2.4.1. Condição de colinearidade

Atualmente, algumas etapas do processamento fotogramétrico são realizadas de maneira semiautomática pelos principais softwares de processamento de imagens. Algumas dessas etapas são: a correspondência de imagens por meio de algoritmos

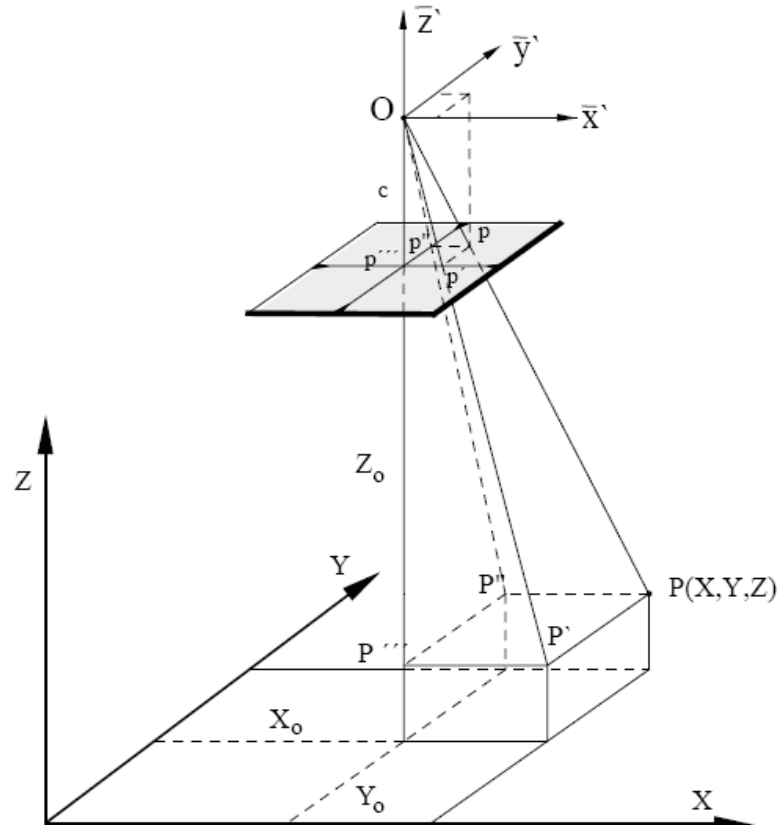
de visão computacional, calibração de câmera, fototriangulação, geração de nuvem de pontos georreferenciada e ortomagens.

Nesse sentido, um importante tema largamente estudado na Fotogrametria e áreas correlatas, é a calibração dos sistemas fotogramétricos. Segundo Andrade (2003), a calibração de uma câmera necessita de um modelo matemático. Os modelos mais conhecidos são: modelo fotogramétrico, com equações de colinearidade e o modelo de transformação linear direta (DLT). Através do modelo matemático das equações de colinearidade é possível conhecer a geometria projetiva das imagens e reconstruir corretamente os feixes de raios (ANDRADE, 1998).

A geometria perspectiva pode ser estabelecida pela condição de colinearidade, que rege que o ponto no espaço imagem (p), o CP e o respectivo ponto no espaço objeto (P) são colineares.

A Figura 4 ilustra essa correlação.

FIGURA 4 – CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE



FONTE: Wolf e Dewitt (2000).

As equações de colinearidade (6) e (7), apresentadas a seguir, definem a relação entre os referenciais do espaço objeto e o espaço imagem (DEBIASI, 2012).

$$x = -f \frac{r_{11}(X-X_{CP})+r_{12}(Y-Y_{CP})+r_{13}(Z-Z_{CP})}{r_{31}(X-X_{CP})+r_{32}(Y-Y_{CP})+r_{33}(Z-Z_{CP})}, \quad (06)$$

$$y = -f \frac{r_{21}(X-X_{CP})+r_{22}(Y-Y_{CP})+r_{23}(Z-Z_{CP})}{r_{31}(X-X_{CP})+r_{32}(Y-Y_{CP})+r_{33}(Z-Z_{CP})}, \quad (07)$$

nas quais f é a distância focal; X , Y e Z são as coordenadas cartesianas no sistema de coordenadas do objeto; X_{CP} , Y_{CP} e Z_{CP} são as coordenadas do centro perspectivo no sistema de coordenadas do espaço objeto; x e y são as coordenadas no sistema de imagem, corrigidas dos erros sistemáticos; r_{ij} são os elementos da matriz M de rotação.

A matriz de rotação (M) contém os seguintes elementos:

$$r_{11} = \cos(\phi)\cos(\kappa); \quad (08)$$

$$r_{12} = \sin(\omega)\sin(\phi)\cos(\kappa) + \cos(\omega)\sin(\kappa); \quad (09)$$

$$r_{13} = -\cos(\omega)\sin(\phi)\cos(\kappa) + \sin(\omega)\sin(\kappa); \quad (10)$$

$$r_{21} = -\cos(\phi)\sin(\kappa); \quad (11)$$

$$r_{22} = -\sin(\omega)\sin(\phi)\sin(\kappa) + \cos(\omega)\cos(\kappa); \quad (12)$$

$$r_{23} = \cos(\omega)\sin(\phi)\sin(\kappa) + \sin(\omega)\cos(\kappa); \quad (13)$$

$$r_{31} = \sin(\phi); \quad (14)$$

$$r_{32} = -\sin(\omega)\cos(\phi); \quad (15)$$

$$r_{33} = \cos(\omega)\cos(\phi); \quad (16)$$

nas quais ω , ϕ e κ são os ângulos de Euler ou os ângulos de orientação da câmera.

Quando as coordenadas fotogramétricas anteriormente apresentadas não são depuradas dos erros sistemáticos, as equações de colinearidade podem

incorporar parâmetros adicionais. As equações de colinearidade incluindo parâmetros adicionais correspondentes aos erros sistemáticos, tomam a seguinte forma (GALO, 1993):

$$x = x_0 + \Delta x - f \frac{r_{11}(X-X_{CP})+r_{12}(Y-Y_{CP})+r_{13}(Z-Z_{CP})}{r_{31}(X-X_{CP})+r_{32}(Y-Y_{CP})+r_{33}(Z-Z_{CP})}, \quad (17)$$

$$y = y_0 + \Delta y - f \frac{r_{21}(X-X_{CP})+r_{22}(Y-Y_{CP})+r_{23}(Z-Z_{CP})}{r_{31}(X-X_{CP})+r_{32}(Y-Y_{CP})+r_{33}(Z-Z_{CP})}, \quad (18)$$

nas quais x_0 e y_0 são as coordenadas do ponto principal (PP) em relação ao centro da imagem e Δx e Δy são as correções das distorções das lentes e os demais elementos definidos anteriormente.

2.4.2. Injunções no sistema de equações

Segundo Espinhosa (2006), as injunções são relações que se mantêm fixas entre parâmetros e estas podem ser exploradas para melhorar a rigidez do sistema de equações e produzir resultados mais confiáveis. Para se injuncionar um sistema é necessário impor uma condição (restrição) a uma variável, de modo a não deixar livre para assumir qualquer valor no seu campo de existência ou também estabelecer uma relação entre variáveis e fazê-las serem ajustadas obedecendo a esta relação.

As injunções podem ser do tipo absoluta ou relativa, onde a influência da observação pode ser controlada por meio de pesos, que podem ou não incorporar informação de correlação, e do tipo funcionais em que os parâmetros do ajustamento podem ter uma ou mais relações funcionais, sendo elas explícitas ou implícitas (ANDRADE, 1998).

Os casos mais comuns de aplicação de injunção são: injunção de posição, injunção de distância e injunção de altitude. A injunção de posição é aplicada para fixar os pontos de controle e/ou o posicionamento do CP, de acordo com o seu desvio padrão.

Segundo Andrade (1998), a injunção de distância, por envolver dois pontos, cria uma correlação entre eles, ou seja, existirá covariância. As demais injunções que se aplicam a um ponto apenas, seja qual for, incluindo os CP das aerofotos quando tiverem suas coordenadas medidas por GNSS, têm todas as características, no que se refere a sua aplicação, das injunções de posição. O mesmo pode se dizer dos ângulos de Euler - a sua aplicação é idêntica a aplicação das injunções de posição. Mais detalhes do uso de injunções na Fotogrametria podem ser vistos em Andrade (1998).

2.4.3. Parâmetros de Orientação Interior

Distância focal, coeficientes de distorção radial simétrica e descentrada e deslocamento do ponto principal são exemplos de Parâmetros de Orientação Interior (POI) que representam as características da geometria do sensor relacionada ao momento de aquisição da imagem. Esses parâmetros são fundamentais para a correta calibração das distorções geradas pelo conjunto de lentes das câmeras digitais e variam de acordo com o modelo utilizado.

A distância focal (f) é a distância entre o centro de projeção do sensor e o ponto principal do plano, no espaço imagem. Os coeficientes de distorção radial simétrica são derivados das componentes ópticas e são usados para a correção das distorções relativas ao acabamento e material das lentes. Os coeficientes são conhecidos por K_1 , K_2 e K_3 , e são relacionados a distância entre o ponto medido na imagem e o ponto principal. Já os coeficientes de distorção descentrada (P_1 e P_2) são usados para a correção da distorção causada pelo não alinhamento do conjunto de lentes. Há ainda o deslocamento do ponto principal, que são as coordenadas do ponto principal em um plano x e y , geralmente com a origem no centro do sensor digital.

Os desvios da condição de colinearidade são ocasionados principalmente pela distorção das lentes e pela refração fotogramétrica. A distorção das lentes pode ser dividida em distorção radial simétrica e distorção descentrada. O efeito da distorção radial simétrica pode ser encarada como um deslocamento radial dos pontos na imagem a partir do ponto principal de simetria e sua modelagem foi proposta por

A. E. Conrady em 1929, podendo ser realizada através de um polinômio (GALO e TOMMASELLI, 2011). Já a distorção descentrada vem da impossibilidade do fabricante das lentes em alinhar perfeitamente os eixos ópticos das mesmas. A modelagem deste efeito foi proposta na década de 60 em trabalhos publicados por D. Brown, que adaptou o trabalho realizado por Conrady em 1919 para aplicações fotogramétricas (ANDRADE, 1998). Os desvios da condição de colinearidade causados pela distorção das lentes (radial simétrica e descentrada), podem ser determinados, em suas componentes x e y , pelas equações (19) e (20):

$$\Delta x = (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)x' + [P_1(r^2 + 2x'^2) + 2P_2 x' y']; \quad (19)$$

$$\Delta y = (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)y' + [2P_1 x' y' + P_2(r^2 + 2y'^2)]; \quad (20)$$

nas quais x' e y' são as coordenadas fotogramétricas do ponto; K_1 , K_2 e K_3 os coeficientes da distorção radial simétrica; P_1 e P_2 os coeficientes da distorção descentrada; e r é a distância radial de um ponto até o PP (x_0, y_0).

2.4.4. Parâmetros de Orientação Exterior

Os Parâmetros de Orientação Exterior (POE) são fundamentais para a realização dos processos fotogramétricos pois definem a posição do CP da tomada da imagem, em um sistema de referência no espaço objeto, e a atitude da plataforma, no que diz respeito às rotações em relação aos 3 eixos de referência (X , Y e Z). Os seis parâmetros que compreendem a orientação exterior são descritos como: as coordenadas do centro perspectivo (X_0 , Y_0 e Z_0) no sistema de referência do espaço objeto, e ângulos de Euler (ω , φ e κ) que descrevem a orientação da plataforma nos eixos X , Y e Z , respectivamente (MIKHAIL et al., 2001).

Esses parâmetros podem ser obtidos pelo georeferenciamento direto ou georeferenciamento indireto. Na primeira forma a determinação dos POE é feita a partir dos sensores de posicionamento e orientação (GNSS+INS). No georeferenciamento indireto os POE são estimados a partir de coordenadas medidas nas imagens e das coordenadas dos pontos de controle no terreno por meio da

Fototriangulação. Segundo Garcia (2020) esse método possui alta precisão e pode ser realizado tanto para plataformas nas quais possuem georreferenciamento direto, sendo, neste caso, necessária uma quantidade muito menor de pontos de controle, bem como para plataformas de baixo custo, nas quais os POE são derivados de sensores que possuem erros inerentes à qualidade dos mesmos.

2.4.5. Sistema de orientação e posicionamento

O uso de um sistema composto por receptor/receptores GNSS, antena e por uma unidade de medição inercial - IMU (do inglês *Inertial Measurement Unit*) possibilitam uma melhor performance na obtenção dos parâmetros de posição e orientação do centro perspectivo da câmera no instante de aquisição das imagens.

Conforme Garcia (2020), esse sistema é responsável por auxiliar na realização do plano de voo pré-programado, identificar a atitude e posição da plataforma no momento da tomada da imagem, e além disso, fornecer informações ao piloto automático. Atualmente diversos são os sensores de posicionamento e orientação, no que se refere a confiabilidade dos dados obtidos e também na integração desses sensores, dos quais são capazes de derivar informações à níveis centimétricos. No geral, a IMU é responsável por mensurar a velocidade e aceleração angular nos três eixos da plataforma no momento da tomada da imagem, que por sua vez podem ser transformadas em ângulos de Euler (ω , φ , κ), e os receptores GNSS e antena são responsáveis por fornecer a posição da plataforma nos três eixos em função de um sistema de coordenadas (X_0 , Y_0 e Z_0);

2.4.6. Georreferenciamento direto e indireto

Os GCPs são pontos visíveis nas imagens, cujas coordenadas geográficas são conhecidas. Tais pontos são comumente utilizados na AT com o objetivo de corrigir o erro de posicionamento em levantamentos com RPA. A AT é um processo

em que uma relação matemática é estabelecida entre as fotografias aéreas, a câmera e a superfície da Terra.

O georreferenciamento direto não requer nenhum GCP. No processo de processamento de imagem SfM (do inglês *Structure from motion*) usando o método PPK para georreferenciamento, todos os GCPs são alterados para “Check point”, que são usados para verificar a precisão do método. O método SfM combina um número significativo de imagens tiradas de diferentes perspectivas sobrepostas para recriar um modelo 3D, por meio de algoritmos de visão computacional. O acesso a computadores de maior desempenho e a disponibilidade de fotografia baseada em RPA aumentou o desenvolvimento de atividades em fotogrametria pelo SfM.

Um processamento SfM genérico reconstrói a paisagem como uma nuvem de pontos 3D esparsa a partir de fotografias 2D sobrepostas. Os algoritmos SfM localizam pontos comuns nas múltiplas fotografias 2D tiradas de diferentes posições de visualização (e ângulos) a partir das quais a paisagem é reconstruída em 3D (FERREIRA et. al, 2017). O processo SfM na verdade não requer nenhuma informação geoposicionada para as fotografias. Na ausência de coordenadas, ele recupera os parâmetros da câmera e as estimativas de posição e orientação das fotografias, resultando em mais flexibilidade do que a fotogrametria convencional de pares estéreo (KALACSKA, M. et al., 2020).

2.4.7. Structure-from-Motion/ Multi-view Stereo (SfM-MVS)

Dentre os métodos e tecnologias utilizadas nos processamentos fotogramétricos, tem-se o *Structure-from-Motion/ Multi-view Stereo* (SfM-MVS), onde a visão computacional passa a ser um diferencial no desenvolvimento de automatização dos processos de rastreamento de pontos em sequências de imagens ocupadas de diferentes posições. Para isso, o SfM-MVS aplica algoritmos e modelos matemáticos como a colinearidade e o ajuste de feixe autocalibrado, envolvendo a aquisição de fotografias digitais de diferentes posições em relação ao objeto de interesse.

Conforme Ferreira et al. (2017), nesse processo, uma transformação de recurso invariante de escala identifica recursos distintos que aparecem em várias imagens e estabelece as relações espaciais entre as posições originais da câmera em um sistema coordenado arbitrário e sem escala. Para gerar uma nuvem de pontos de alta resolução, que é codificada por cores usando os dados da imagem original, são usadas técnicas MVS (*Multi-view Stereo*) para correspondência das imagens. Um ajuste de pacote de autocalibração é então usado para calibrar as câmeras usadas e derivar um conjunto esparsa de coordenadas para representar o objeto.

A abordagem SfM então requer várias imagens de uma cena tiradas de diferentes posições e calcula simultaneamente os parâmetros e orientações da câmera, e uma nuvem de pontos 3D esparsa representando os recursos mais proeminentes nas imagens (JAMES e ROBSON, 2012). Temos ainda o recurso do processo MVS que filtra com eficiência os dados ruidosos e normalmente aumenta o número de pontos reconstruídos em duas ou três ordens de magnitude. E o uso de tais abordagens combinadas têm sido exploradas por diferentes softwares de processamento de imagens, tal qual o Agisoft Metashape.

A fotogrametria convencional é a técnica existente mais próxima do SfM-MVS, pois usa o conhecimento preciso da localização 3D e posição das câmeras, ou a localização 3D de um conjunto de pontos de controle localizados na cena de interesse, para reconstruir a geometria da cena. Talvez a maior desvantagem do SfM-MVS seja o fato de que a qualidade do modelo de superfície resultante depende de muitos fatores diferentes relacionados a um levantamento individual. Os dados SfM-MVS normalmente não são tão precisos quanto as nuvens de pontos derivadas de *Terrestrial Laser Scanning* (TLS); no entanto, o SfM-MVS é flexível o suficiente para ser aplicado em uma ampla variedade de escalas (SMITH et al. 2016).

2.5. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS DIGITAIS

O Decreto-Lei nº 243/1967 estabelece as diretrizes e bases das atividades cartográficas e correlatas, em termos de eficiência e racionalidade, no âmbito nacional, por meio da criação de uma estrutura cartográfica em condições de atender

às necessidades do desenvolvimento econômico-social do País e da Segurança Nacional. No art. 2º deste Decreto-Lei está definido que as atividades cartográficas, em todo território nacional, são levadas a efeito por meio de um sistema único, o Sistema Cartográfico Nacional (SCN). Sendo assim esta Norma foi elaborada pelo comitê de normatização da Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (DSG) para atender à legislação em vigor. Utilizando as técnicas encontradas na literatura de avaliação de qualidade para dados geoespaciais, a ET-CQPCDG evoluiu para a Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG).

O Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984 estabeleceu as Instruções Reguladoras das 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.

O surgimento de novas geotecnologias contribuiu para que fosse realizada uma revisão dos padrões estabelecidos no Decreto nº 89.817. Em consequência, a ET-ADGV estabeleceu um novo Padrão de Exatidão Cartográfica destinado a atender os Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) (DSG, 2011). O enquadramento das classes no PEC-PCD baseia-se nas estatísticas de 90% dos pontos coletados no produto cartográfico em relação às coordenadas dos pontos homólogos coletados na fonte de maior precisão. Para que sejam enquadrados nas classes do PEC-PCD, as discrepâncias entre as coordenadas dos pontos homólogos devem resultar em valores iguais ou inferiores de erro máximo (EM) e de erro padrão (EP) previstos para cada produto.

Faz-se então necessário a análise estatística das diferenças entre as coordenadas observadas sobre o produto e as coordenadas de referência. Para verificar se há tendência nas medidas das coordenadas planimétricas X ou Y , deve-se então determinar as médias das discrepâncias e testá-las, estatisticamente, considerando a hipótese destas discrepâncias serem iguais ou diferentes de zero, a partir de um dado intervalo de confiança. Tem-se então:

$$H_0: \Delta\bar{X} = 0; \quad (21)$$

$$H_1: \Delta\bar{X} \neq 0; \quad (22)$$

e

$$H_0: \Delta\bar{Y} = 0; \quad (23)$$

$$H_1: \Delta\bar{Y} \neq 0. \quad (24)$$

Para o teste de análise de tendência utiliza-se uma análise estatística amostral, podendo ser a t-Student (“t”) ou a Normal – dependendo do número de pontos a serem analisados. Então, para verificar se há ou não tendência no produto a partir do teste de hipótese proposto, é necessário calcular o valor “t” amostral e compará-lo com o valor “t” tabelado, considerando um intervalo de confiança. O valor “t” amostral e o intervalo de confiança podem ser determinados pelo seguinte formulário:

$$t_X = \frac{\Delta\bar{X}}{S_{\Delta X}} \sqrt{n}, \quad (25)$$

$$|t_X| < t_{(n-1, \frac{\alpha}{2})}, \quad (26)$$

$$t_Y = \frac{\Delta\bar{Y}}{S_{\Delta Y}} \sqrt{n}, \quad (27)$$

$$|t_Y| < t_{(n-1, \frac{\alpha}{2})}, \quad (28)$$

nas quais $\alpha = (1 - \text{nível de confiança})$; $\Delta\bar{X}$ é a média das discrepâncias na coordenada X; $\Delta\bar{Y}$ é a média das discrepâncias na coordenada Y; $S_{\Delta X}$ é o desvio padrão das discrepâncias na coordenada X; $S_{\Delta Y}$ é o desvio padrão das discrepâncias na coordenada Y; n é o total de pontos da análise; t_X o valor da estatística “t” para a coordenada X; t_Y o valor da estatística “t” para a coordenada Y; e α é o nível de significância.

Analisando os valores da estatística “t” amostral, para a coordenada X e Y , caso estas estejam fora do intervalo de confiança, ou seja, se o módulo do valor da estatística “t” amostral for maior do que a estatística “t” tabelada, a hipótese nula (H_0) será rejeitada. Já a verificação da precisão do produto cartográfico pode ser constatada a partir da comparação do desvio-padrão das discrepâncias na coordenada (X e Y) com o erro padrão esperado – no caso o erro padrão (EP) especificado pelo PEC-PCD – para a classe na qual se deseja enquadrar o produto.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente foram traçadas as estratégias para os experimentos. Escolhidos os locais de estudo, foram então definidos os procedimentos e selecionado os equipamentos necessários para realização de cada etapa. Após a coleta dos dados, realizou-se o processamento dos mesmos e as análises necessárias.

3.1. MATERIAIS

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram utilizados os seguintes materiais:

- Kit PPK 2 para Phantom 4 ADV/PRO da Guandalini;
- Aeronave remotamente pilotada, modelo Phantom 4 Advanced da DJI;
- Receptor GNSS multiconstelação e multifrequência, modelo Reach RS2 da Emlid;
- Software para processamento de dados GNSS, Guandalini TOPO (GTOPO);
- Software para processamento de dados GNSS, Guandalini PPK (GPPK);
- Software para processamento de dados GNSS, RTKLIB versão 2.4.3 Emlid b33;
- Software para edição e conversão de arquivos do tipo RINEX 3, GFZRNX;
- Software para conversão de arquivos do tipo RINEX, RINEX Converter 5.0.8;
- Software para processamento de imagens, Agisoft Metashape versão 1.5.1.

Foram utilizados, também, dados das seguintes estações da RBMC:

- UFPR, localizada na cidade de Curitiba-PR, composta por receptor TRIMBLE NETR9 e antena ZEPHYR 3 GEODETIC;
- POLI, localizada na cidade de São Paulo-SP, composta por receptor TRIMBLE NETR9 e antena ZEPHYR GNSS GEODETIC II;
- SCAQ, localizada na cidade de Araquari-SC, composta por receptor TRIMBLE NETR5 e antena GNSS CHOKE RING.

3.2. EXPERIMENTOS

Para a realização da pesquisa foi definido um conjunto de experimentos de trajetória RPA a partir das formas de obtenção da mesma utilizando-se os diferentes métodos e configurações de pós-processamento do posicionamento GNSS cinemático pré-definidos. Foram analisadas diferentes extensões de linha de base. Isso, indo de encontro com possíveis cenários para os usuários.

Para linhas de base curtas, as observáveis GPS e GLONASS serão utilizadas, primeiramente somente L1 e posteriormente L1 e L2 juntas. Isso a fim de se analisar o cenário de uso dos Kit PPK1 e PPK2. Para linhas de base longas, a observável livre de ionosfera será utilizada, com as portadoras L1 e L2.

Além da configuração de diferentes extensões de linhas de base no PPK, diferentes intervalos de processamento, simulando diferentes intervalos de gravação de dados serão testados em ambos os métodos. Os intervalos testados serão 0,2 s, 1 s e 15 s. Os intervalos de 1 e 15 s foram definidos de acordo com a possibilidade de uso das observáveis de estações RBMC no caso do uso do método PPK. O intervalo de 0,2 s foi definido empiricamente para analisar o cenário em que o receptor da base consiga gravar dados neste intervalo.

Assim sendo, na Tabela 3 são indicados os experimentos e suas características.

TABELA 3 – EXPERIMENTOS DE TRAJETÓRIA E SUAS CARACTERÍSTICAS

(continua)

Exp.	Métodos	Configurações		
		Intervalo	Extensão de linha de base	Portadoras
1	PPK	0,2 s	Curta	L1
2	PPK	1 s	Curta	L1
3	PPK	15 s	Curta	L1
4	PPK	0,2 s	Curta	L1 e L2
5	PPK	1 s	Curta	L1 e L2
6	PPK	15 s	Curta	L1 e L2

TABELA 3 – EXPERIMENTOS DE TRAJETÓRIA E SUAS CARACTERÍSTICAS

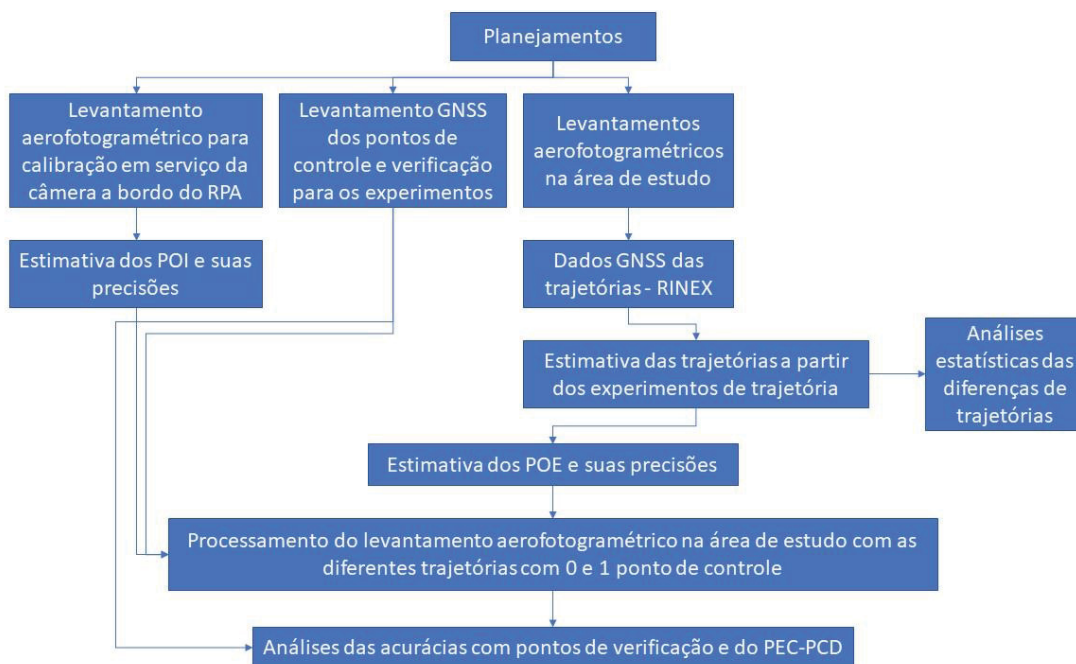
(conclusão)

7	PPK	0,2 s	Longa (330km)	L1/L2 (LI)
8	PPK	1 s	Longa (330km)	L1/L2 (LI)
9	PPK	15 s	Longa (330km)	L1/L2 (LI)
10	PPK	15 s	Longa (115km)	L1/L2 (LI)

FONTE: O autor (2022).

Em cada experimento de trajetória, ter-se-á o fluxo de etapas indicado na Figura 5.

FIGURA 5 – FLUXO DE ETAPAS DA METODOLOGIA



FONTE: O autor (2022).

Para realização das etapas posteriores de processamento dos experimentos com as trajetórias, faz-se necessário a realização do aerolevanteamento da área de estudo e também da área de calibração. Inicialmente para a coleta de dados GNSS de maneira que possam se estimar as trajetórias como também para a realização da calibração dos POI. Em todas as áreas foram coletados pontos de controle e

verificação em campo. Estes, juntamente com os dados estimados das trajetórias e os valores de POI foram utilizados para realização do georreferenciamento direto e indireto. Por fim, realizou-se a etapa de análise estatística das triangulações fotogramétricas e a análise do PEC-PCD.

3.3. ÁREAS DE ESTUDO, LEVANTAMENTOS FOTOGRAFAMÉTRICOS E DE PONTOS EM CAMPO

Para o desenvolvimento do projeto de pesquisa, foi selecionada uma área de estudo localizada no complexo de Educação Física do campus Centro Politécnico da UFPR, conforme indicado na Figura 6. A área contém edificações, solo exposto, vegetação e outros elementos naturais e artificiais, e não apresenta declividade acentuada em termos de relevo.

Para o caso do uso do método PPK, considerando os experimentos com intervalos de processamentos de 1 e 15 s, as estações RBMC UFPR e POLI foram utilizadas para as configurações de linha de base curta e longa, respectivamente. A extensão de linha de base adotando-se como estação base a estação UFPR, é menor que 900 m. Por outro lado, a extensão de linha de base adotando-se como estação base a estação POLI, é de cerca de 330 km. Foi utilizada ainda a estação SCAQ da RBMC para experimento de uma linha de base de aproximadamente 115km à um intervalo de 15s das observações, conforme indicado na Figura 7.

Para o caso do uso do método PPK, considerando os experimentos com intervalo de processamento de 0,2 s foi utilizado o receptor Reach RS2 da Emlid, tanto para base curta (~57m) quanto longa (~330km).

FIGURA 6 – ÁREA DE ESTUDO E LINHA DE BASE CURTA



FONTE: O autor (2022).

FIGURA 7 – ÁREA DE ESTUDO E LINHA DE BASE LONGA



FONTE: O autor (2022).

Para as bases da RBMC foram utilizadas as informações como coordenadas e altura da antena, obtidas em seus respectivos relatórios descritivos constantes no site do IBGE. Na utilização do RS2 optou-se por posicioná-lo em um ponto coletando dados brutos por 2h, com sua antena a uma altura de 2m e posteriormente suas coordenadas foram corrigidas através do IBGE-PPP (Posicionamento por Ponto Preciso). A Tabela 4 apresenta as coordenadas dos vértices bases, juntamente com seus respectivos valores de sigma. Na tabela, RS2_BC representa a utilização do receptor RS2 em linha de base curta e RS2_BL a utilização em linha de base longa.

TABELA 4 – COORDENADAS GEODÉSICAS ESPACIAIS DAS BASES

Ponto	Latitude (gms) +/- sigma (m)		Longitude (gms) +/- sigma (m)		Alt_geo (m) +/- sigma (m)	
RS2_BC	-25° 27' 18,4953"	0.001	-49° 14' 10,3867"	0.002	915,99	0.003
RS2_BL	-23° 32' 52,3496"	0.003	-46° 40' 38,8412"	0.005	775,74	0.008
UFPR	-25° 26' 54,12695"	0.001	-49° 13' 51,43717"	0.001	925,807	0.004
POLI	-23° 33' 20,33228"	0.001	-46° 43' 49,12319"	0.001	730,622	0.004
SCAQ	-26° 23' 37,52429"	0.001	-48° 44' 14,78677"	0.001	17,285	0.009

FONTE: O autor (2022).

Selecionada a área de estudo, o levantamento aerofotogramétrico foi realizado para obtenção dos dados necessários para a realização dos experimentos. Delimitada a área, foi elaborado, no aplicativo *Drone Deploy*, o planos de voo com altura de 90 m, sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 60%. Posteriormente, foram realizados dois voos, cruzados entre si, gerando um total de 111 fotos com uma distância do solo-amostra (GSD) de aproximadamente 2,7 cm/pixel.

A RPA utilizada foi a Phantom 4 Advanced da DJI, com o kit PPK2 da Guandalini acoplado (Figura 8). Além de coletar as observáveis que permitiram estimar as trajetórias dos voos, o sistema de fotossensor presente no kit possibilita a correta correlação das coordenadas com o exato instante de tomada das fotos.

FIGURA 8 – PHANTOM 4 ADVANCED DA DJI, COM O KIT PPK2 DA GUANDALINI ACOPLADO



FONTE: O autor (2022).

Ainda dentro do contexto do levantamento fotogramétrico, ao longo da área de calibração e da área de estudo foram definidos pontos de controle e verificação. Ao todo foram demarcados 13 alvos fotointerferíveis, para servirem como pontos de controle para a AT e de verificação para a AT e o georreferenciamento direto. As coordenadas desses pontos foram coletadas por posicionamento GNSS utilizando a técnica RTK via NTRIP tendo a estação UFPR da RBMC como base de referência enviando correções para o receptor Emlid Reach RS2.

Posteriormente, esses pontos também foram processados no software GTOPO, utilizando como estação base os dados RINEX da estação UFPR da RBMC, tanto com intervalo de gravação a 1s como a 15s, para ajuste das coordenadas. Sendo feita, então, a média dos valores obtidos em cada técnica.

Este procedimento foi utilizando tanto para os pontos coletados na área de calibração, quanto para o levantamento dos pontos localizados na área de estudo, porém, para essa última, com um tempo de rastreamento de 15 minutos para cada ponto na técnica RTK via NTRIP.

A Tabela 5 apresenta os valores resultantes da coleta dos pontos de controle e verificação na área de estudo.

TABELA 5 – COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO FOTOGRAMÉTRICO

Ponto	UTM_E Medio +/- dpE (m)		UTM_N Medio +/- dpN (m)		Alt_geo Medio (m) +/- dpAlt (m)	
PC1B	677224,009	0,001	7183481,535	0,001	912,493	0,033
PC2B	677326,370	0,001	7183442,202	0,002	911,011	0,033
PC3B	677338,486	0,001	7183469,697	0,003	916,120	0,030
PC4B	677295,413	0,000	7183482,273	0,001	911,997	0,032
PC5B	677237,351	0,001	7183519,723	0,001	912,493	0,031
PC6B	677257,147	0,002	7183569,227	0,000	912,538	0,031
PC7B	677315,410	0,000	7183539,992	0,004	912,162	0,034
PC8B	677367,556	0,000	7183524,485	0,004	916,225	0,043
PC9B	677377,780	0,002	7183553,280	0,001	916,470	0,036
PC10B	677302,254	0,003	7183602,366	0,001	910,964	0,003
PC11B	677302,063	0,002	7183637,803	0,002	908,063	0,036
PC12B	677344,330	0,000	7183626,578	0,002	908,429	0,030
PC13B	677392,993	0,001	7183612,125	0,006	908,573	0,043

FONTE: O autor (2022).

Todas as coordenadas geodésicas foram estimadas referenciadas ao Sistema Geodésico Brasileiro, e posteriormente transformadas em coordenadas UTM FUSO 22S. Sendo respeitada todas as especificações, recomendações e normas gerais para levantamentos geodésicos (Resolução PR nº5 -31/03/1993), definidas pelo IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, para elaboração de serviços de Cartografia e Topografia.

Os pontos de checagem foram utilizados neste projeto com o objetivo de avaliar a qualidade primeiramente da orientação e posteriormente para a valiar a qualidade dos produtos gerados, no contexto do PEC-PCD. Na Figura 9 é apresentada como exemplo a interface do software GTOPO para o processamento dos pontos coletados. Na Figura 10 tem-se um exemplo de rastreamento em campo.

FIGURA 9 – EXEMPLO DA INTERFACE DO SOFTWARE GTOPO PARA O PROCESSAMENTO DOS PONTOS DE APOIO

Guandalini GTOPO - Versão 1.1.0.41 - D:\00_CEPAG\Projeto_PILOTO\Processamentos GTOPO\17_03_2021_Patrick\UFRPR\PP_RBMC_15a\17_03_2021.gto

Arquivo Ferramentas Ajuda

Processamento Vista Gráfica Sobre

Sistema de Coordenadas: SIRGAS 2000 / UTM zone 22S

Importar Rastreios Importar Rastreios EmId Agrupados Zona UTC: -3

Visualizar Coordenadas: UTM Geográficas Catebianas

Usar efemérides precisas: Arquivo de efemérides precisas Baixar efemérides precisas da Internet

Aplicar diferença da Separação Geoidal nos pontos de GPS usando hgeoHNDOR2020

Recortar arquivo da base e deixar somente intervalo do móvel

Máscara de Elevação dos Satélites: 15

Filtro de Processamento: Para frente

Resetar configurações de Processamento

Processar Rastreios Agrupados Individualmente

Processar Linhas Bases

Id	Arquivo	Tipo	Status	Nome	Alt Antena	Norte	Este	Alt Eip	Descrição	Geoid	Altitude Geoid	DP N	DP E	DP U	Início UTC	Fim UTC	Temp
1	ufrp0761_21o	Base	CONTROLE	UFRPR	0.100	7184223.309	677878.516	925.807	BASE	***	925.807	0.0000	0.0000	0.0000	17/03/2021	17/03/2021 23:59:45	23:59
2	raw_202103171725_obs	Desligado	FIXO	1	2.134	7183737.061	677711.370	916.513	PC4	***	916.513	0.0001	0.0001	0.0002	17/03/2021 17:30:27	17/03/2021 18:06:27	00:38
3	raw_202103171725_obs	Desligado	FIXO	2	2.134	7183725.342	677666.610	917.335	PC13	***	917.335	0.0001	0.0001	0.0002	17/03/2021 18:10:50	17/03/2021 18:47:55	00:37
4	raw_202103171725_obs	Desligado	FIXO	3	2.134	7183680.351	677687.579	917.839	PC3	***	917.839	0.0001	0.0001	0.0002	17/03/2021 18:51:03	17/03/2021 19:27:06	00:36
5	raw_202103171725_obs	Desligado	FIXO	4	2.134	7183702.329	677623.961	918.027	PC2	***	918.027	0.0001	0.0000	0.0002	17/03/2021 19:31:34	17/03/2021 20:06:30	00:34

Exportar Arquivo KML (Google Earth) Desenhlar Pontos no AutoCAD Exportar DXF Exportar CSV para ReachView Exportar ShapeFile Exportar Arquivo de Coordenadas Relatório de Processamento Relatório de Pontos

Licença: B03CAE5E-6E10DF30-BE4CC195-8D967C1: PATRICK OTTO BUSCH

FONTE: O autor (2022).

FIGURA 10 – EXEMPLO DE RASTREIO EM CAMPO

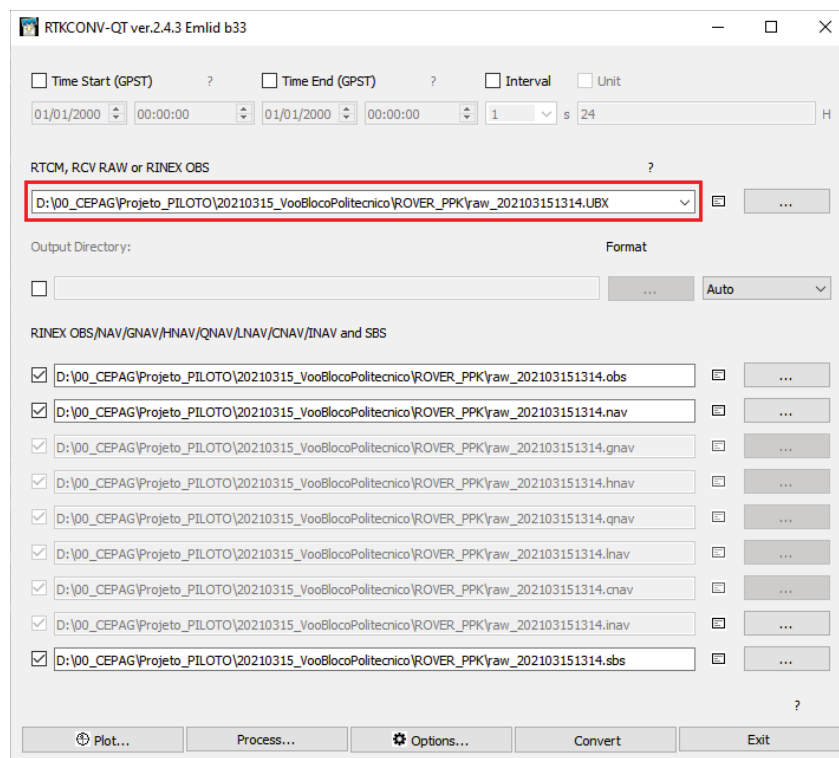


FONTE: O autor (2022).

3.4. PROCESSAMENTO DAS TRAJETÓRIAS

Para a configuração do receptor GNSS a bordo do kit PPK-Guandalini e armazenamento dos dados brutos proveniente do mesmo, do tipo U-blox (UBX), foi utilizado o aplicativo ReachView. Após o voo, o mesmo aplicativo foi utilizado para baixar os dados gravados no formato UBX. Para a conversão deste formato para o formato universal RINEX v 3.03, o aplicativo GPPK foi utilizado, o qual é baseado no RTKCONV, uma extensão do software RTKLIB v. 2.4.3 adaptado pela EMLID (v. 2.4.3 Emlid b33). A interface deste módulo é apresentada na Figura 11.

FIGURA 11 – EXEMPLO DA INTERFACE DO SOFTWARE GPPK COM O MÓDULO RTKCONV PARA A CONVERSÃO DO FORMATO UBX PARA O FORMATO UNIVERSAL RINEX V 3.03



FONTE: O autor (2022).

Vale ressaltar que, nos casos de experimentos com uso apenas da portadora L1, para emular os padrões de dados de um receptor monofrequência do Kit PPK1, após a conversão do UBX em RINEX, foi utilizado o software RINEX Converter 5.0.8, visando padronizar os experimentos para todos os arquivos de observações, foi

utilizado a versão 2.10 do RINEX, fazendo a conversão também utilizando-se o RINEX Converter 5.0.8 quando necessário.

Para os experimentos com o método PPK, utilizando intervalos de processamento de 1 e 15 s, conforme mencionado anteriormente, as estações da RBMC UFPR e POLI foram utilizadas como estações base, como também a estação SCAQ a uma taxa de 15s. O arquivo de observações à taxa de 15 s é disponibilizado pelo IBGE na versão 2.11 do RINEX, com 24h de dados, sendo então necessária a conversão para a versão 2.10 pelo RINEX Converter 5.0.8. Já para o arquivo à taxa de 1 s, o IBGE disponibiliza em arquivos de 15 minutos, sendo necessário a junção para que se alcance o intervalo de rastreamento desejado, que nesse estudo foi de 2 horas (das 13:00 às 15:00 – hora GPS).

Para junção e edição dos arquivos RINEX 3 com intervalo de 1 s foi utilizado o software GFZRNX. Este programa foi desenvolvido no GFZ (GeoForschungsZentrum) por Thomas Nischan: GFZRNX - RINEX GNSS Data Conversion and Manipulation Toolbox (Version 1.05). GFZ Data Services. <http://doi.org/10.5880/GFZ.1.1.2016.0022>; com licença de uso habilitada em: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>. Não há necessidade de instalação deste programa. Após o download, é importante que estejam no mesmo diretório os arquivos RINEX 3 a serem trabalhados, já previamente descompactados do Gzip (descompactação com as aplicações 7zip ou Winzip) e do Hatanaka (descompactação com a aplicação crxrn.exe), e o executável do programa GFZRNX.

De posse de todos os arquivos RINEX os processamentos de todos os experimentos de trajetória utilizando o método PPK foram realizados no aplicativo RTKLIB v. 2.4.3 Emlid b33, uma vez que no software GPPK, as opções de alteração de configurações de processamento não são acessíveis. O software se utiliza de algoritmos e testes estatísticos para o processamento. Com relação à solução das ambiguidades, uma conhecida estratégia eficiente de validação das mesmas é a LAMBDA (TEUNISSEN, 1995) e sua extensão MLAMBDA (CHANGH et al., 2005), as quais são empregadas no RTKLIB (TAKASU, 2013).

As técnicas LAMBDA e MLAMBDA oferecem a combinação de uma transformação linear para reduzir o espaço de busca de vetores inteiros e um procedimento hábil de busca em árvore no espaço transformado. A solução de vetor

inteiro por esses procedimentos é validada pelo *Ratio-Test*. A taxa da solução fixa (*Ratio*), é obtida pela razão entre a probabilidade de acerto da melhor solução sobre a probabilidade de acerto da segunda melhor solução de ambiguidades (TAKASU, 2013). O limite de validação pode ser definido pela opção de processamento “*Min Ratio to Fix Ambiguity*”, que nesse trabalho foi igual a 3. Na Tabela 6 são apresentadas as configurações de processamentos no RTKLIB v. 2.4.3 Emlid b33.

TABELA 6 – CONFIGURAÇÕES DE PROCESSAMENTOS NO MÉTODO PPK NO RTKLIB V. 2.4.3 EMLID B33

Configuração	Linha de base curta	Linha de base longa
Observável	L1 e L1+L2	L1/L2 (LI)
Máscara de elevação	15°	15°
Filtro de Kalman	<i>Combined</i>	<i>Combined</i>
Efemérides	Transmitidas	Precisas
Modelagem troposférica/função de mapeamento	--	Saastamoinem/Niell
Modelagem Ionosférica	--	Observável LI + correção de 2ª e 3ª ordem da ionosfera com o aplicativo RINEX HO
Efeitos geodinâmicos	--	Correção de Marés terrestres, carga oceânica de maré (arquivos .BLQ), Movimento do Polo
Correção do centro de fase das antenas dos satélites	Correção aplicada com arquivo IGS14.atx	Correção aplicada com arquivo IGS14.atx
Correção das tendências diferenciais dos códigos C1C e C1W	Correção com arquivo P1C1.dcb para o mês	Correção com arquivo P1C1.dcb para o mês
Constelações	GPS, GLONASS	GPS, GLONASS
Teste ratio para resolução das ambiguidades	3	3
Método de resolução das ambiguidades	<i>Fix and Hold</i>	<i>Fix and Hold</i>

FONTE: O autor (2022).

Após executar o processamento o RTKLIB v. 2.4.3 Emlid b33 retorna um arquivo extensão *.pos* onde são salvas as informações de posição da trajetória (centros de fases), com Latitude, Longitude, Altitude elipsoidal e suas respectivas precisões.

Cabe ressaltar que, após a estimativa da trajetória, para os processamentos fotogramétricos, com as épocas de tomadas das fotos indicadas pelo sistema de fotossensor presente no kit, a partir de um processo de interpolação são automaticamente calculadas, no software GPPK, as coordenadas do(s) centro(s) de fase(s) da antena do receptor GNSS para estes instantes (GEOTAGG). Um log de eventos é gerado pelo RTKLib onde o software calcula uma solução de posição e gera um arquivo extensão “*_events.pos*” contendo as posições dos eventos a partir das coordenadas E, N e U do SGL. Retornando esse arquivo para o GPPK e reprocessando os dados, o software adiciona os dados internos de afastamento tridimensional do(s) centro(s) de fase(s) para o CP da câmera (*lever-arms*) resultando no mesmo arquivo as coordenadas ajustadas de cada CP para o voo. A Tabela 7 apresenta os valores de *lever-arms* utilizados, que foram medidos previamente por régua em aço inoxidável com escala milimétrica e já estabelecidos no software GPPK por padrão.

TABELA 7 – VALORES DE *LEVER-ARMS* UTILIZADOS.

<i>Lever-arms</i> (m)	
LX	0,000
LY	-0,015
LZ	0,175

FONTE: O autor (2022).

3.4.1. Análise estatística

Com o intuito de se avaliar estatisticamente as diferenças nas coordenadas entre duas trajetórias, e respectivas precisões, obtidas a partir das diferentes estratégias de processamento, testes estatísticos foram realizados. Para se avaliar a igualdade das precisões foi utilizado o Teste F, de Fisher-Snedecor. A estatística do teste F foi proposta inicialmente por Ronald Aylmer Fisher e chamada de teste z de Fisher. Atualmente, o teste foi suprimido pelo seu equivalente teste F de Snedecor, ou simplesmente teste F, o qual é aplicado com o objetivo de investigar eventuais diferenças entre pares de médias específicas ou combinações lineares dessas médias. A estatística F é simplesmente uma razão de duas variâncias. As variâncias são uma medida de dispersão, ou até que ponto os dados estão dispersos em relação à sua média. Valores maiores representam maior dispersão. Considerando S_1^2 e S_2^2 as variâncias de duas amostras, define-se a estatística amostral F como:

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} . \quad (29)$$

O valor calculado de F deve ser comparado ao tabelado, segundo os graus de liberdade da fonte testada e do resíduo, respectivamente nas colunas e linhas da tabela de referência. Os graus de liberdade do teste F tem relação com o numerador e o denominador desta razão. Assim, para encontrar o valor crítico na distribuição F, é preciso saber os graus de liberdade (numerador e denominador) e o nível de significância α . O nível de significância adotado em todos os casos foi de 5% e o valor de graus de liberdade de 1 e 1. O valor tabelado de F (1 e 1 graus de liberdade; 5% de significância) é igual a 161,4476388. Se F calculado for menor que F tabelado, a hipótese H_0 , onde há igualdade entre as precisões, não é rejeitada.

Para a verificação da normalidade dos dados de discrepâncias entre as coordenadas, foi usado o teste de Shapiro-Wilk. Nele a medida do grau de concordância entre os dados e a hipótese nula (H_0), sendo H_0 correspondente à distribuição normal, é dada pela análise do parâmetro valor de prova (p-valor) em relação ao nível de significância (α). Quanto menor for o valor de prova, menor será a

consistência entre os dados e a hipótese nula. A regra adotada para a distribuição Normal é: (i) se $p\text{-valor} \leq (\alpha)$, rejeita-se H_0 , ou seja, não se pode admitir que o conjunto de dados em questão tenha distribuição Normal; (ii) se $p\text{-valor} > (\alpha)$, não se rejeita H_0 , ou seja, a distribuição Normal é uma distribuição possível para o conjunto de dados em questão.

No caso de os dados de discrepâncias possuírem uma distribuição normal, a fim de se testar estatisticamente as hipóteses de tendência nula a estatística t de student foi utilizada. De igual forma ao teste F, um valor amostral de t é calculado e comparado com o valor teórico da distribuição, considerando um certo nível de significância. Caso o valor de t calculado seja menor que o teórico a hipótese H_0 de tendência nula no conjunto amostral de discrepâncias não é rejeitada ao nível de significância.

No caso de os dados não possuírem uma distribuição normal foi empregado o teste de Wilcoxon, o qual é um método não-paramétrico para comparação de duas amostras pareadas. Da mesma forma, para a decisão de rejeição ou não da hipótese básica de tendência nula no conjunto amostral de discrepâncias, os valores amostrais são calculados e comparados com os teóricos a um dado nível de significância. Neste caso as hipóteses testada são:

$$H_0: \eta = 0; \quad (30)$$

$$H_1: \eta \neq 0; \quad (31)$$

nas quais η é a mediana.

Por fim, para avaliar estatisticamente a concordância de um par de trajetórias, recorreu-se à análise do índice de concordância de Willmott. Este índice pode ser aplicado em comparações de concordância para diferentes modelos/métodos, pois ele reflete o grau com que a variável observada pode ser representada pela variável estimada. O índice de concordância (d) de Willmott é dado por (WILLMOTT, 1985):

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right], \quad (32)$$

na qual P_i são os valores previstos ou estimados; O_i são os valores observados; e O é a média dos valores observados. O índice d pode variar de 0 a 1, sendo 0 o valor que representa a total discordância dos dados, e 1 o valor que representa a concordância perfeita entre os dados observados e estimados.

3.5. PROCESSAMENTOS FOTOGRAMÉTRICOS

3.5.1. Calibração em serviço da câmera

Como primeira etapa do contexto fotogramétrico foi realizada a estimativa dos POI do sensor a partir da calibração em serviço em uma área independente indicada na Figura 12. Esta área encontra-se dentro do Campus do Centro Politécnico da UFPR e contém os pontos fotoidentificáveis conforme apresentado no detalhe da própria Figura 13. Os POI estimados foram a distância focal f ; as coordenadas do PP x_p e y_p ; os coeficientes do modelo de Brown para a distorção radial de lentes K_1, K_2, K_3 ; e os coeficientes do modelo de Conrady para a distorção descentrada de lentes P_1 e P_2 .

FIGURA 12 – ÁREA DE CALIBRAÇÃO



FONTE: O autor (2022).

Para obtenção dos POI foi realizada a calibração em serviço da câmera processando os dados da Área de Calibração no software Agisoft Metashape utilizando o processamento fotogramétrico convencional, isto é, sem injeção relativa de posição nos CP, utilizando-se os dados disponíveis (pontos de controle no solo, as imagens e seus respectivos POE). Os pontos de apoio serão também injuncionados relativamente no ajustamento visando melhorar a geometria necessária para a recuperação dos POE e POI no instante da realização do recobrimento aéreo. Objetiva-se posteriormente comparar as coordenadas tridimensionais dos CPs, obtidos nesse processamento, com os CPs de cada trajetória e verificar se as discrepâncias são significativas.

O plano de voo foi elaborado no aplicativo Drone Deploy, com altura de 90 m, sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 60%. Foram executados dois planos de voo, cruzados entre si, gerando um total de 107 fotos com resolução no terreno de aproximadamente 2,3 cm e utilizando 13 pontos de apoio fotogramétricos no processamento.

O Metashape realiza o cálculo com os valores iniciais do tamanho do pixel do sensor e dos parâmetros de distância focal da câmera baseado nos dados EXIF (*Exchangeable Image File Format*). No alinhamento das imagens são identificados pontos comuns no processo de tomadas das fotos com sobreposição, onde se tem a posição da câmera em cada foto e a análise dos parâmetros de calibração. Para a calibração em serviço da câmera o alinhamento é realizado incluindo no processo os pontos de controle e verificação coletados em campo.

Dessa maneira a calibração em serviço da câmera resultou nos seguintes valores de POI:

- $f = 3,69895$ mm
- $c_x = -0,0109559$ mm
- $c_y = 0,0203122$ mm
- $K_1 = 0,00444307$
- $K_2 = -0,0233945$
- $K_3 = 0,0241961$
- $P_1 = -0,000762994$
- $P_2 = -8,26472e-005$

3.5.2. Fototriangulação nos experimentos e avaliações

De posse das coordenadas dos CPs de cada imagem do voo, obtidos na estimativa das trajetórias, e dos valores calibrados de POI, os mesmos foram utilizados nos experimentos da área de estudo como parâmetros injuncionados de forma relativa, segundo suas variâncias, nas fototriangulações. As variâncias para as coordenadas dos CPs foram propagadas na interpolação a partir das soluções de trajetória GNSS. Adicionalmente, foram utilizados os pontos de apoio em campo obtidos conforme explicado no item 3.3.

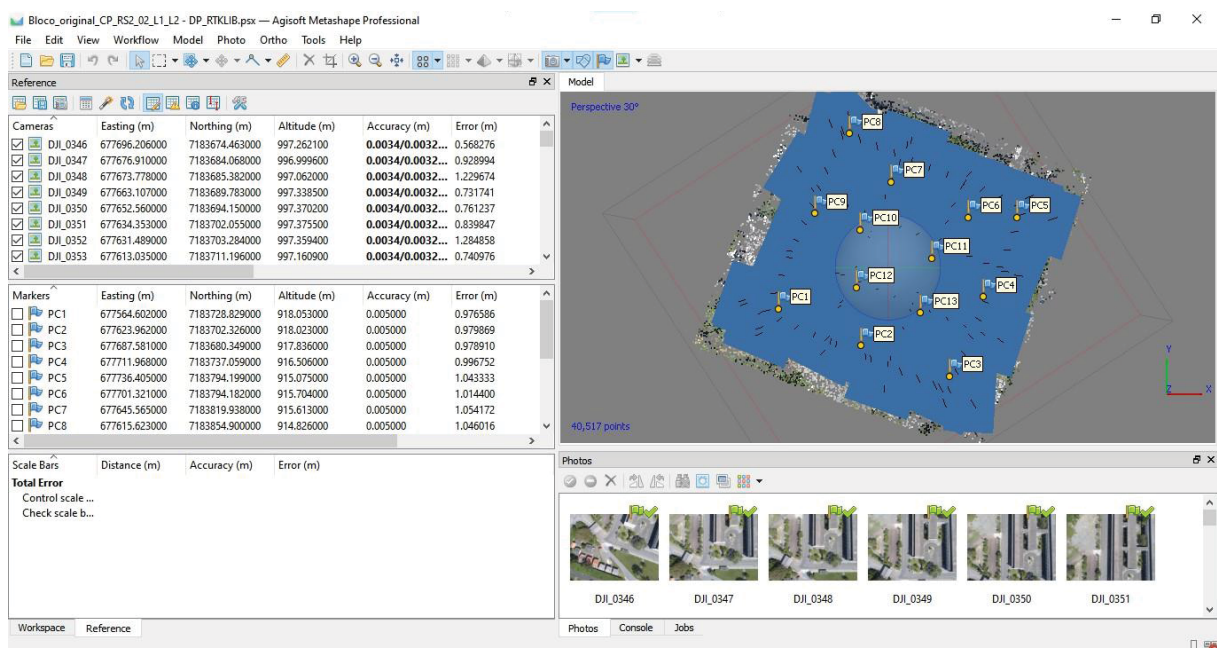
Para todos os experimentos indicados na Tabela 3, foi realizada a fototriangulação com georreferenciamento direto e com georreferenciamento indireto, com a utilização de um ponto de controle e também com sete pontos de controle, para que fosse possível gerar dados comparativos e principalmente para refinamento dos

POI. Um ponto, considerando uma quantidade mínima para tal e o cenário mais econômica, e sete pontos a fim de analisar o efeito do refinamento com maior grau de liberdade. Mais informações referentes ao uso de pontos de controle no georreferenciamento indireto podem ser encontradas em Andrade (1998); e Tommaselli e Reiss (2005).

Em cada experimento, as imagens selecionadas e o arquivo de coordenadas dos pontos de apoio foram importados para o software Agisoft Metashape, onde a primeira atividade a ser desenvolvida no sistema será o alinhamento das fotografias, que através da orientação relativa, busca pontos homólogos nas fotografias sobreposta e no terreno. Em seguida, foi feita uma nova seleção das imagens, onde são retiradas as imagens que não foram orientadas pelo método de alinhamento.

O processo de marcação das coordenadas dos pontos de apoio nos alvos identificados nas imagens, para orientação absoluta do modelo, faz-se necessário para o georreferenciamento das fotografias. A Figura 13 mostra como exemplo o ambiente de trabalho no Agisoft Metashape, com as imagens alinhadas e os pontos de apoio marcados.

FIGURA 13 – EXEMPLO DE AMBIENTE DE TRABALHO DO AGISOFT METASHAPE



FONTE: O autor (2022).

Após a etapa de marcação, foi feito um novo alinhamento das fotos. Nessa etapa foi realizado um processo de triangulação dos pontos utilizando a base de pontos com coordenadas geodésicas conhecidas e as medidas angulares entre eles, para que as correções de erros sejam feitas e que se determine as coordenadas de cada pixel da imagem, considerando a altura e a variação de relevo da superfície. O resultado é a geração da nuvem de pontos esparsa ou pontos fotogramétricos. O produto gerado na fase de alinhamento de fotos é um produto básico para geração da nuvem de pontos densificada, modelos 3D e ponto ligação entre as ortofotos no processo de geração do mosaico de ortofotos.

Nesse momento, tendo sido padronizada a pontaria dos pontos e o alinhamento das imagens, a orientação do bloco foi alterada conforme a inserção de cada conjunto de coordenadas dos CPs gerados para cada estratégia de processamento dos dados GNSS. Em seguida, foi feito o ajustamento dos valores de POI pré-calibrados e foram calculadas a discrepância dos pontos de apoio obtidos para cada combinação de experimento. Por fim, a influência da abordagem da calibração em serviço e da fixação dos valores de POI e POE mensuradas a partir da análise estatística das discrepâncias foi analisada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. RESULTADOS DAS ESTIMATIVA DAS TRAJETÓRIAS A PARTIR DAS ESTRATÉGIAS DE PROCESSAMENTO GNSS

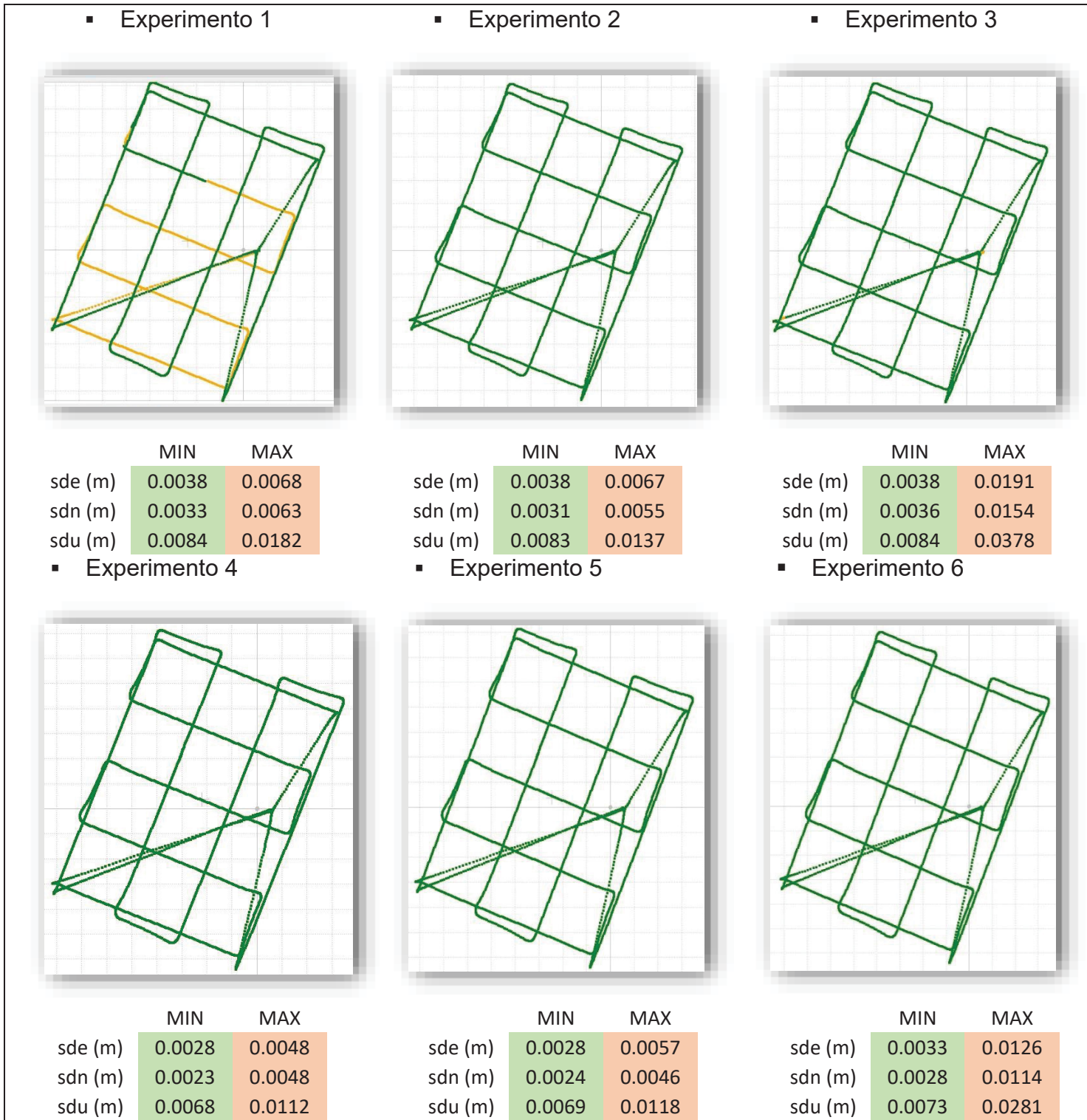
Todos os pontos da trajetória do voo foram estimados pelo processamento dos dados GNSS conforme as estratégias propostas para os experimentos. Nas Figuras 14, 15, 16, 17, 18 e 19 são apresentadas as plotagens dos pontos da trajetória e suas soluções, bem como o intervalo de valores de precisão alcançados para cada coordenada, no SGL. Cabe informar que a cor verde significa que o posicionamento GNSS no modo cinemático teve como solução da ambiguidade do posicionamento o resultado “Fixo” e a cor amarela corresponde a uma solução “Flutuante”. A denominada “solução fixa” corresponde à obtenção do número inteiro de ciclos, na resolução de ambiguidades, da primeira época para a maioria dos satélites. Já a “solução flutuante” é resultante da obtenção de um valor fracionário (pertencente ao domínio dos reais) deste número de ciclos inicial.

Os resultados obtidos partem do padrão das configurações dos parâmetros de processamento através do software RTKLib, estabelecidos na seção 3.4 (ver Tabela 6).

4.1.1. Resultados para os experimentos com linha de base curta

Os resultados alcançados nos experimentos em linha de base curta são apresentados na Figura 14.

FIGURA 14 – TRAJETÓRIAS E SUAS PRECISÕES PARA OS EXPERIMENTOS DE 1 A 6.



FONTE: O autor (2022).

Entre os experimentos simulando o PPK1 (L1) em linha de base curta, a precisão formal (resultante do processamento no RTKLib) das coordenadas dos pontos da trajetória, de maneira geral, ficou abaixo de 0,01 m, sendo que no caso do

experimento 3, a precisão na componente U foi pior que 0,03 m. Experimento esse que obteve os valores mais baixos de precisão também para as demais componentes se comparado aos experimentos 1 e 2. Para este cenário acredita-se que a diminuição da taxa de frequência de observações da base possa ter influência nas diferenças encontradas, uma vez que propõe menos observações para o ajustamento sequencial

Na questão das porcentagens de pontos fixos e flutuantes na trajetória, no experimento 1 teve-se 45,8% de pontos “fixos” e 54,2% “flutuantes”; no experimento 2, 99,6% “fixos” e 0,4% “flutuantes”; e no experimento 3, 54,3% de pontos “fixos” e 45,7% flutuantes, sendo os pontos flutuantes presentes, em sua totalidade, no período de inicialização. Neste contexto, entende-se que o fato da localidade onde a base RS2 se encontra é mais suscetível a multicaminhamento pela proximidade de árvores e outras obstruções (ver Figura 6) ocasionando também perdas de ciclo. Há de se considerar também, a influência da correlação entre ambiguidades e os parâmetros de posição dos satélites. Segundo Monico (2008), quanto menor a frequência de aquisição, mais tempo tem-se para alteração da geometria dos satélites e mais efetivamente se diminui a correlação com as ambiguidades.

Considerando os experimentos com L1 e L2 (PPK2) em linha de base curta, a maioria dos valores de precisões formais nas componentes E, N e u também ficou abaixo de 0,01 m. No caso do experimento 3, assim como no caso simulado do PPK1, as precisões foram piores e a precisão na componente u foi menor, chegando a quase 0,03 m. Ao analisar-se os seis experimentos com linha de base curta, nota-se pouca variação entre eles, porém, com melhora nos níveis de precisão e na porcentagem de pontos “fixos” para o PPK2.

Com relação às porcentagens de pontos “fixos” nos experimentos 4, 5 e 6, obteve-se 100% de pontos “fixos” na trajetória. Ainda que aqui se esteja trabalhando com uma linha de base curta, nota-se que a utilização da portadora L2 junto com a L1, separadas, sem combinação linear, traz benefícios na resolução de ambiguidades e nas precisões.

Em seguida, para cada par possível de trajetórias, são apresentados os resultados dos testes estatísticos de igualdade de precisões formais nas componentes E, N e u do SGL, para todas as épocas; de normalidade das discrepâncias entre as

coordenadas das trajetórias; e de tendência para as mesmas. A Tabela 8 apresenta os valores encontrados para os experimentos com linha de base curta.

TABELA 8 – VALORES DOS TESTES ESTATÍSTICOS PARA EXPERIMENTOS COM LINHA DE BASE CURTA.

Trajетórias	RS2_0.2s – L1	UFPR_1s – L1	UFPR_15s – L1	RS2_0.2s – L1/L2	UFPR_1s – L1/L2	UFPR_15s – L1/L2
RS2_0.2s – L1	-----					
UFPR_1s – L1	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	-----				
UFPR_15s – L1	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	-----			
RS2_0.2s – L1/L2	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	-----		
UFPR_1s – L1/L2	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	-----	
UFPR_15s – L1/L2	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0,09 > 0,05	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	-----

FONTE: O autor (2022).

Pelos valores apresentados pode-se observar que para todos os pares de experimentos, a um nível de significância de 5%, a hipótese de igualdade estatística de precisões não foi rejeitada. Isso indica que não houve diferença significativa entre as precisões das coordenadas dos pontos das trajetórias com 95% de probabilidade.

Com relação às hipóteses de normalidade das discrepâncias entre as coordenadas das trajetórias, as mesmas foram rejeitadas em todos os pares de experimentos, ao mesmo nível de confiança. Isso tendo em vista que os p-valores se apresentaram próximos de zero, menores que o nível de significância. ($\alpha = 5\%$ ou 0,05). Assim, para os testes estatísticos de tendência no conjunto amostral de discrepâncias foi utilizada a estatística de Wilcoxon.

Nos testes de tendência, para todos os pares de experimentos, exceto para a coordenada E do par de trajetórias UFPR a 15s e RS2 a 0,2 s, às hipóteses de tendência nula não foram rejeitadas. Isso indica que, quase que de modo geral, a média das discrepâncias em coordenadas nas trajetórias pode ser considerada como zero, e que, portanto, não há tendência levando uma trajetória a não coincidir espacialmente com a outra.

No que tange o índice de concordância de Willmott, os valores foram iguais à 1 ou próximos deste, indicando concordância perfeita entre as trajetórias, e corroborando com os resultados dos testes estatísticos de tendência.

Considerando os resultados de todos os testes estatísticos entre os pares de experimentos com linha de base curta, verifica-se que as trajetórias podem ser consideradas estatisticamente iguais. Assim sendo, a trajetória mais indicada em caso de uso de estação RBMC como base é a com 1s de frequência de aquisição de base, se possível com o kit PPK2. Havendo a possibilidade de se usar um receptor próprio como base, a frequência aqui testada de 0,2s se mostrou como uma opção que proporciona resultados levemente melhores.

4.1.2. Resultados para os experimentos com linha de base longa

Para os experimentos com PPK2 envolvendo linha de base longa de 330 km para a estação RBMC POLI, tem-se os experimentos de 7 a 9. O experimento 10 trata do uso do PPK2 em linha de base longa de 115 km, com a utilização da estação RBMC SCAQ. Conforme pode ser visto na Figura 15, em termos de precisão formal, nas componentes E e N, os valores se apresentaram variando a ordem de grandeza de milimétrica a decimétrica, sendo esta última ordem predominante.

Os piores valores de precisão em relação aos resultados com linha de base curta se devem à duas questões. A primeira é relacionada ao tempo de ocupação. Conforme recomendado em IBGE (2008), para se ter precisões na ordem de grandeza milimétrica em linhas de base maiores que 100 km o tempo mínimo de ocupação deve ser de 4 horas, conforme exposto na Tabela 9. Uma vez que todo o tempo de ocupação, considerando o período de inicialização, durou cerca de 30 minutos, tem-se resultados em grande parte ao nível do decímetro.

TABELA 9 - PRECISÃO DO POSICIONAMENTO RELATIVO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE OBSERVAÇÃO, EQUIPAMENTO UTILIZADO E COMPRIMENTO DA LINHA DE BASE

Linha de Base	Tempo de observação	Equipamento Utilizado	Precisão
00 – 05 Km	05 – 10 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
05 – 10 Km	10 – 15 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
10 – 20 Km	10 – 30 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
20 – 50 Km	02 – 03 hr	L1/L2	5 mm + 1 ppm
50 – 100 Km	mínimo. 03 hr	L1/L2	5 mm + 1 ppm
> 100 Km	mínimo. 04 hr	L1/L2	5 mm + 1 ppm

FONTE: IBGE (2017).

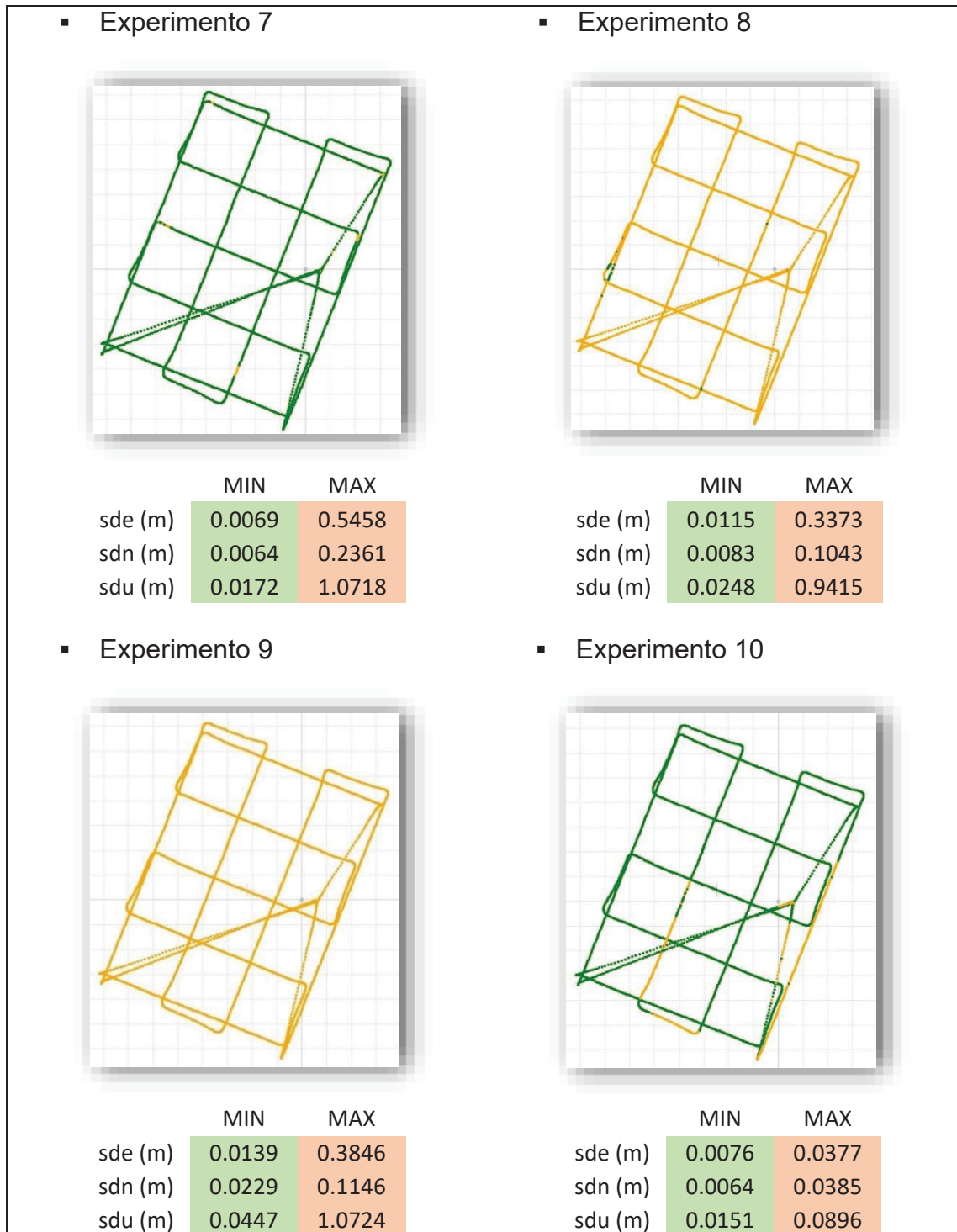
A segunda questão é que os receptores da EMLID não geram as observáveis L2P, somente trabalham com a observável recebida L2C, conforme informações de catálogo disponível em: https://www.guandalinibr.com/wp-content/uploads/2020/06/PPK2_CATALOGO_V5_2.pdf; e informações contidas no *Forum* oficial da marca (<https://community.emlid.com/>). Uma vez que somente alguns satélites da constelação GPS transmitem este sinal civil, a formação das observáveis livre de ionosfera ocorre com poucas observáveis. Assim, o número de satélites utilizáveis na solução é mais reduzido do que na solução sem combinação para linhas de base curtas. Isso, juntando com a questão da disponibilidade de satélites para a formação das duplas diferenças, faz com que o sistema de equações em cada época tenha um número menor de equações. Conseqüentemente, as precisões formais são alcançadas com menor precisão.

Assim como no caso da linha de base curta, piores precisões foram alcançadas com a frequência de 15 s, na qual a componente u apresentou precisões em grande parte piores que 0,01 m. No caso da linha de base longa de 115 km para a estação SQAC com 15 s de frequência, os resultados foram melhores, uma vez que a linha de base é menor. Porém, os resultados ainda são piores do que aqueles obtidos com linhas de base curtas.

Duas soluções possíveis para melhorias nos resultados com linhas de base longas são aqui apontadas. Ou se utiliza um tempo maior de ocupação em campo na

inicialização, o que é pior para o usuário em termos de economia de tempo, ou pode-se utilizar estações virtuais, como realizado por Teppati Losè et al. (2020).

FIGURA 15 – TRAJETÓRIAS E SUAS PRECISÕES PARA OS EXPERIMENTOS DE 7 A 10 COM LINHA DE BASE LONGA.



FONTE: O autor (2022).

No uso do PPK2 em linha de base longa, tem-se para o experimento 7, um valor de 45,7% dos pontos com solução “fixa” e 54,3% “flutuantes”, sendo esses pontos flutuantes em sua maioria presentes no período de inicialização. Para o experimento 8 tem-se 0,6% de pontos “fixos” e 99,4% “flutuantes”. Apesar do maior percentual de solução fixa para a trajetória do experimento 7, este apresenta maior variabilidade nas precisões das coordenadas, porém, apresenta melhores resultados se comparado com os experimentos 8 e 9.

O experimento 9 resultou em 0,3% de pontos “fixos” em sua trajetória e 99,7% “flutuantes”. Enquanto o experimento 10 teve 77,6% de pontos “fixos” e 22,4% de pontos “flutuantes”. Para o experimento 9, observam-se valores de precisão próximos aos obtidos com o experimento 8, onde ambos utilizaram exatamente o mesmo receptor, diferenciando-se apenas na taxa de frequência das observações.

A Tabela 10 apresenta os valores encontrados para os testes estatísticos entre os pares de experimentos utilizando o kit PPK2 em base longa. Pelos valores apresentados pode-se observar que para todos os pares de experimentos há igualdade estatística de precisões, não normalidade no conjunto de discrepâncias de coordenadas entre trajetórias, tendência estatisticamente nula e concordância perfeita entre os dados, conforme as hipóteses estabelecidas na seção 3.4.1. Assim, pode-se considerar que as trajetórias são estatisticamente iguais, mesmo com as diferentes estratégias de processamento.

Diante de todo o exposto, a trajetória mais indicada em caso de uso de estação RBMC como base para linha de base longa é a com 1s de frequência de aquisição de base.

TABELA 10 - VALORES DOS TESTES ESTATÍSTICOS PARA EXPERIMENTOS COM LINHA DE BASE LONGA.

Trajetórias	RS2_0.2s	POLI_1s	POLI_15s	SCAQ_15s
RS2_0.2s	-----			
POLI_1s	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	-----		
POLI_15s	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	-----	
SCAQ_15s	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	F1,1,α = 161,40 Fcalc < Ftab SW = 0 < 0,05 Wilc = 0 < 0,05	-----

FONTE: O autor (2022).

No processamento dos dados GNSS de cada experimento, a qualidade da solução (estimada automaticamente como desvio padrão pelo software) ficou geralmente abaixo de 0,50 m para as componentes planimétricas e abaixo de 1,10 m para a componente altimétrica. Conforme mencionado, o intervalo de coleta de dados influencia na capacidade de resolução “fixa” no processamento. Porém, Há de se considerar aqui também o número de satélites rastreados, a geometria satélite/receptor, o ruído de observação, dentre outros.

Um pequeno número de satélites visíveis, uma geometria ruim da constelação de satélites tanto na estação base quanto no *rover* podem impedir uma solução FIXA. Como o receptor RS2 foi colocado em local diferente da estação RBMC POLI, as variáveis mencionadas podem ter influenciado. Um outro ponto é que, segundo Zhang et. al (2019), pode haver tendência na estimativa de solução do PPK devido a soluções “fixas” falsas que podem permanecer não detectadas (por exemplo, correção falsa na resolução de ambiguidades). Uma abordagem para detectar isso é verificar a conformidade entre fix-and-hold e resolução contínua em ambiguidade inteira no RTKLib.

4.2. ESTIMATIVA DOS POE

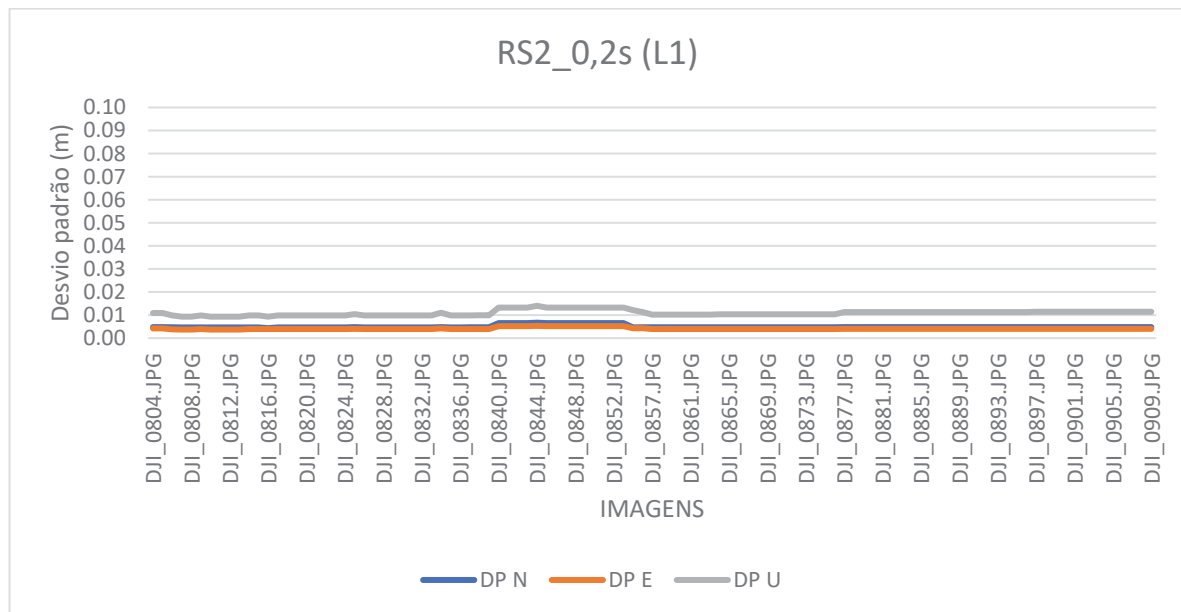
Tendo o sistema fotosensor gerado os marcadores para o instante de aquisição de cada foto ao longo da trajetória, pôde-se obter então as coordenadas tridimensionais para o posicionamento dos CPs da câmera.

Os dados de posição foram injuncionados em cada fototriangulação, de maneira relativa, com pesos inversamente proporcionais aos quadrados dos desvios obtidos nas soluções com o RTKLib.

4.2.1. Resultados para os experimentos com linha de base curta

Os Gráficos de 1 a 6 apresentam os valores de precisão das coordenadas obtidas em cada experimento para linha de base curta, calculadas por propagação dos desvios nos pontos das trajetórias GNSS mais próximos. No Anexo A são apresentadas ilustrações dos marcadores plotados pelo RTKLib, para cada estratégia de processamento, juntamente com o intervalo de precisão alcançado para cada tipo de solução das ambiguidades, para o caso das linhas de base curtas.

GRÁFICO 1 – PRECISÃO DAS COORDENADAS DOS CPS PARA EXPERIMENTO 1

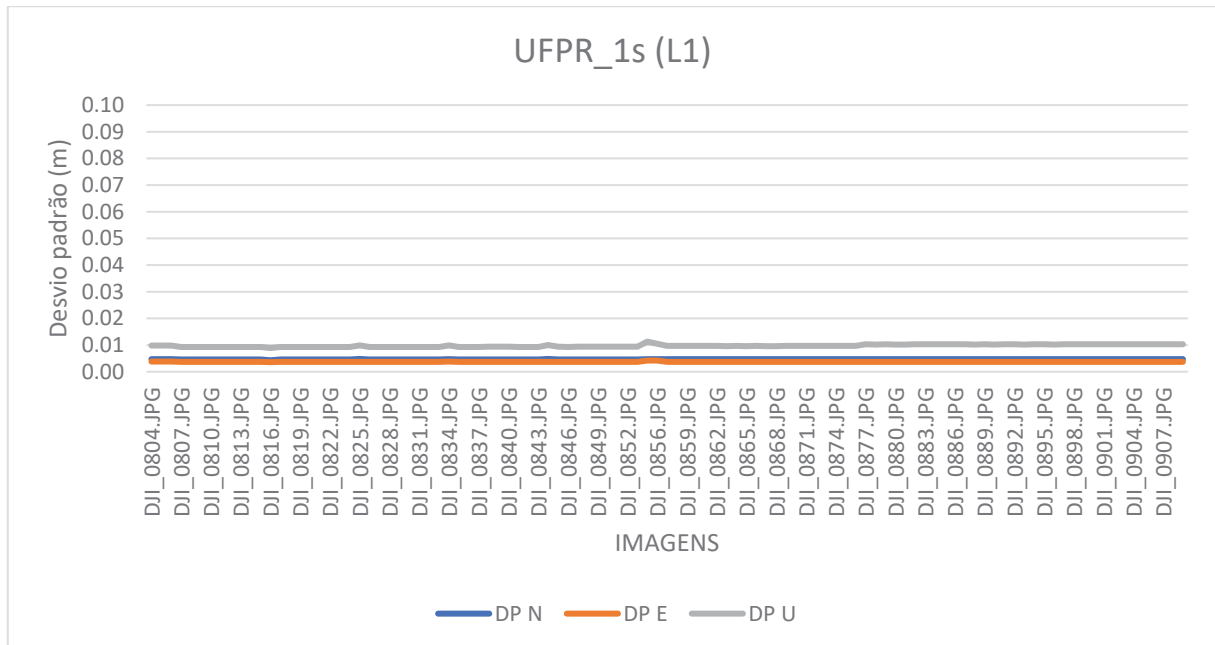


FONTE: O autor (2022).

Para o experimento 1 a precisão formal nas componentes E e N foram em média de 0,007 m, ficando no geral abaixo de 0,009 m. Já na componente u, as precisões foram em média de 0,012 m e sempre abaixo de 0,015 m, sendo os maiores valores encontrados para altimetria, entre pontos fixos e flutuantes, porém com pouca variação, na ordem do mm.

No caso do experimento 2, as precisões planimétricas se apresentaram concordantes com as do experimento 1 ao nível submilimétrico, com média de 0,006 m. Em geral, as precisões se apresentaram entre 0,005 m e 0,012 m. Porém, na componente altimétrica, foram levemente melhores, com média de 0,010 m. Isso pode estar relacionado com a maior porcentagem de soluções fixas de ambiguidade.

GRÁFICO 2 – PRECISÃO DAS COORDENADAS DOS CPS PARA EXPERIMENTO 2

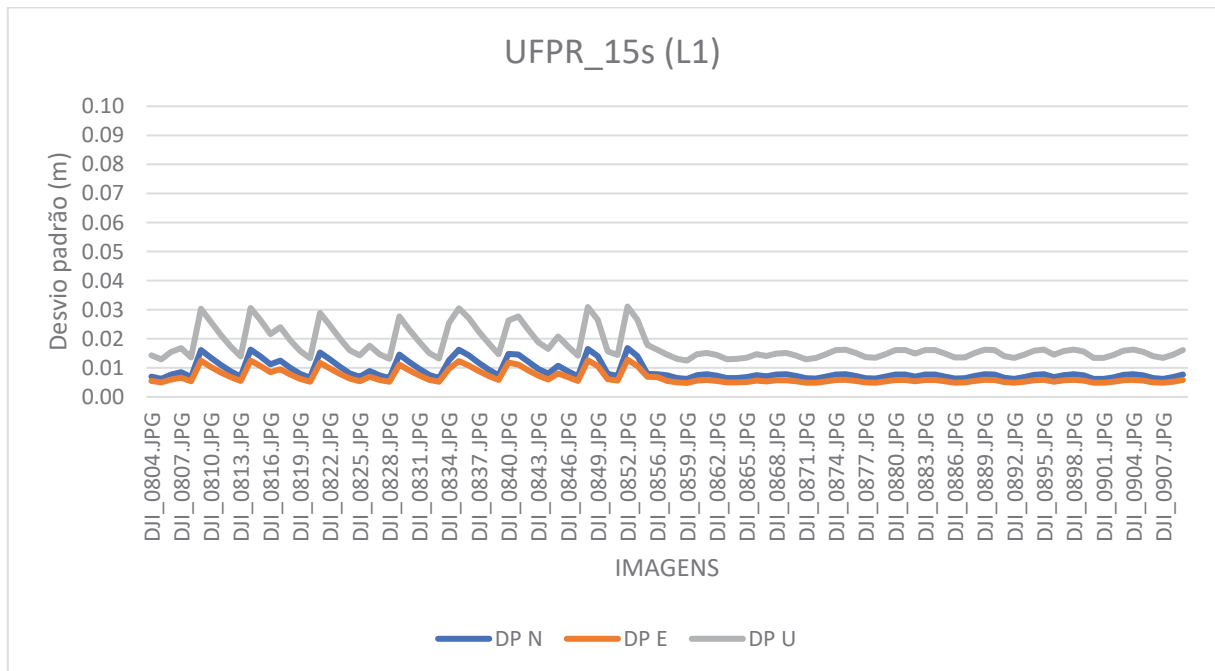


FONTE: O autor (2022).

Para o experimento 3, conforme pode ser observado no Gráfico 3, as precisões foram piores em relação às obtidas nos experimentos 1 e 2. Nas componentes E e N, em média, teve-se 0,010 m e 0,012 m, respectivamente, com valores variando de 0,008 a 0,021 m. Já para a componente u, a média foi de 0,018 m, com valores variando de 0,013 a 0,031 m.

Outra questão verificada no experimento 3 foi a amplitude de variação de precisões em um formato aproximadamente cíclico. Isso, bem como as precisões piores, pode estar relacionado com a baixa amostragem (15 s) para a interpolação, em relação às amostragens nos experimentos anteriores.

GRÁFICO 3 – PRECISÃO DAS COORDENADAS DOS CPS PARA EXPERIMENTO 3

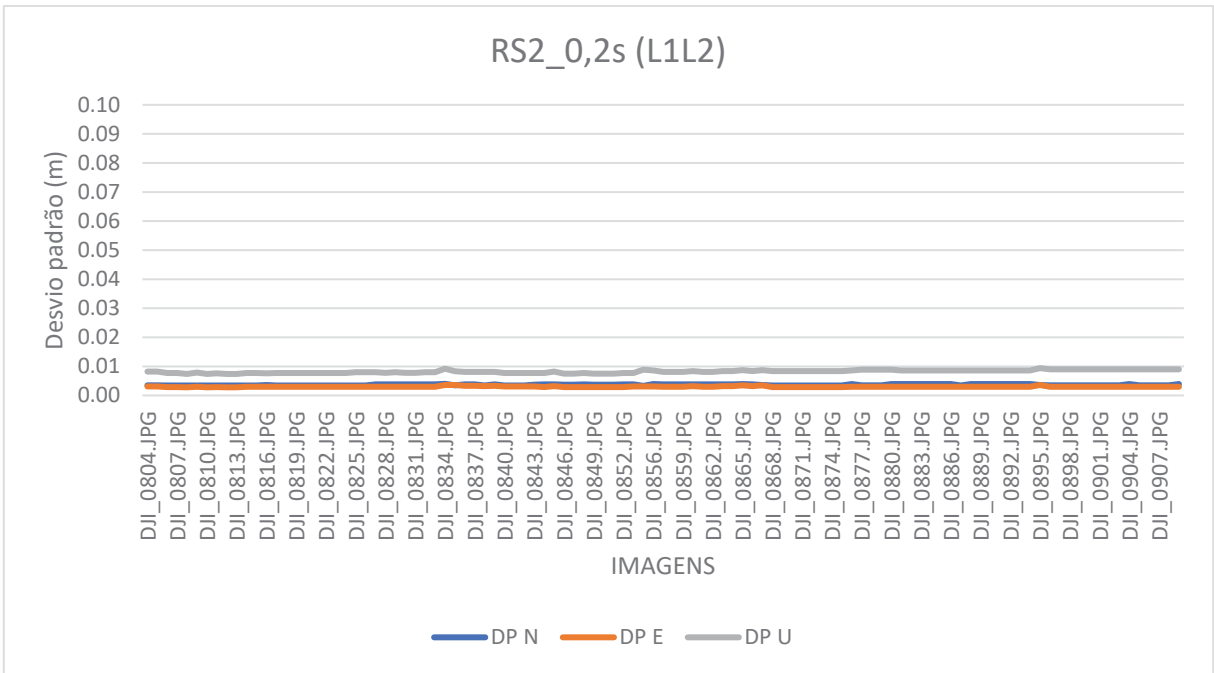


FONTE: O autor (2022).

Para os experimentos utilizando as frequências L1 e L2, teve-se um ligeira melhora, em virtude da adição das observáveis em L2 nos sistemas de equações e da fixação de todas as ambiguidades. Nos experimentos 4 e 5 os valores de precisão em ambas as componentes planimétricas se apresentaram abaixo de 0,005 m, com médias de 0,003 e 0,004 m em E e N para o experimento 4, e de 0,003 e 0,004 m em E e N para o experimento 5. No caso do experimento 6, para estas mesmas componentes os valores foram ligeiramente piores, com médias de 0,005 m, em E e N.

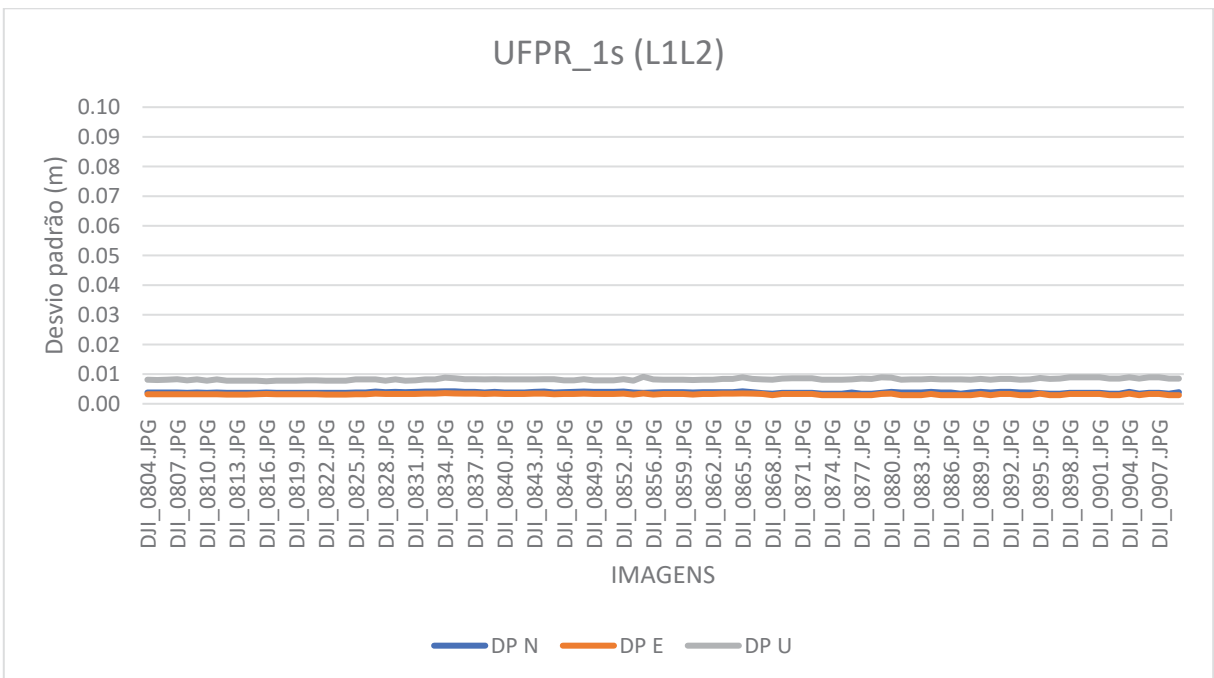
Para a componente altimétrica, nos experimentos 4 e 5, os resultados também foram muito próximos, ao nível submilimétrico, com melhores resultados obtidos no experimento 5. As médias foram de 0,0084 e 0,0083 m, respectivamente para os experimentos 4 e 5. Já para o experimento 6 os resultados foram piores, em média de 0,011 m. Neste, embora o comportamento aproximadamente cíclico tenha sido verificado, as amplitudes foram menores, consequência direta da melhoria com a inclusão da L2 no processamento.

GRÁFICO 4 – PRECISÃO DAS COORDENADAS DOS CPS PARA EXPERIMENTO 4



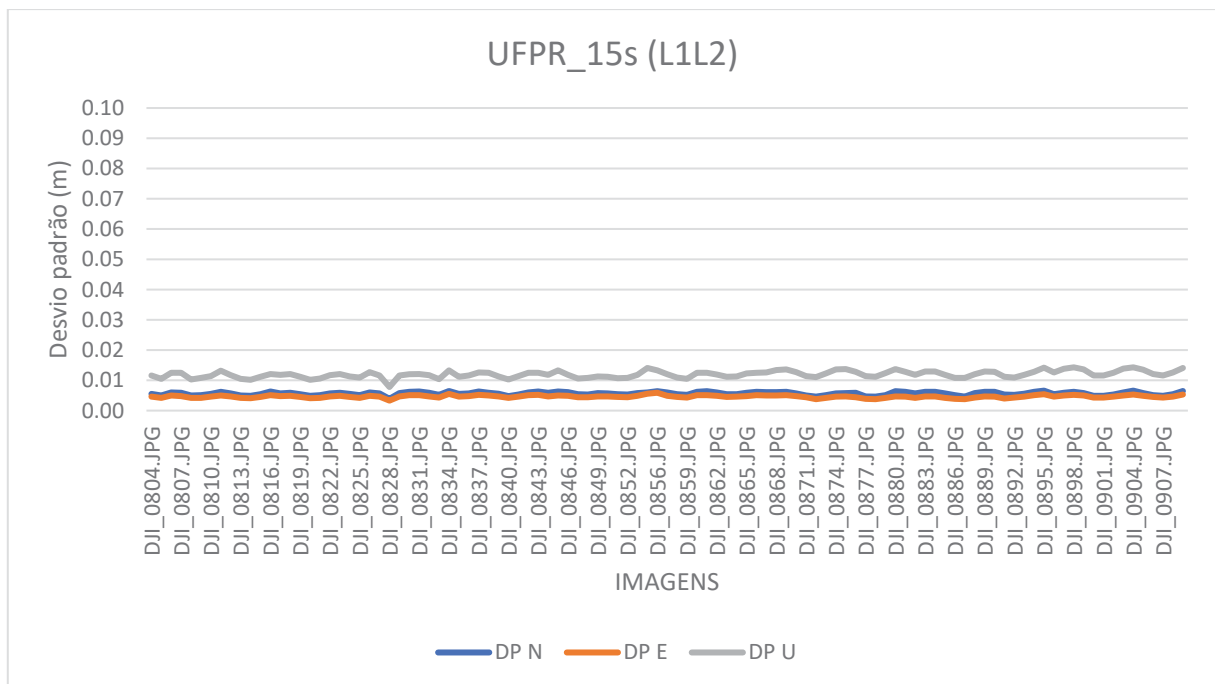
FONTE: O autor (2022).

GRÁFICO 5 – PRECISÃO DAS COORDENADAS DOS CPS PARA EXPERIMENTO 5



FONTE: O autor (2022).

GRÁFICO 6 – PRECISÃO DAS COORDENADAS DOS CPS PARA EXPERIMENTO 6



FONTE: O autor (2022).

Ressalta-se que tanto para planimetria quanto altimetria os melhores valores de precisão foram encontrados nos pontos fixos, indicando a importância de se atentar para a possibilidade de não correlação da solução obtida com a precisão resultante.

De forma adicional, entende-se que para o cenário de um receptor de dupla frequência trabalhando em uma linha de base curta, a taxa de frequência utilizada para cada experimento possa não ter tanta influência na característica dos resultados obtidos, comparado ao caso somente de uso de receptor L1.

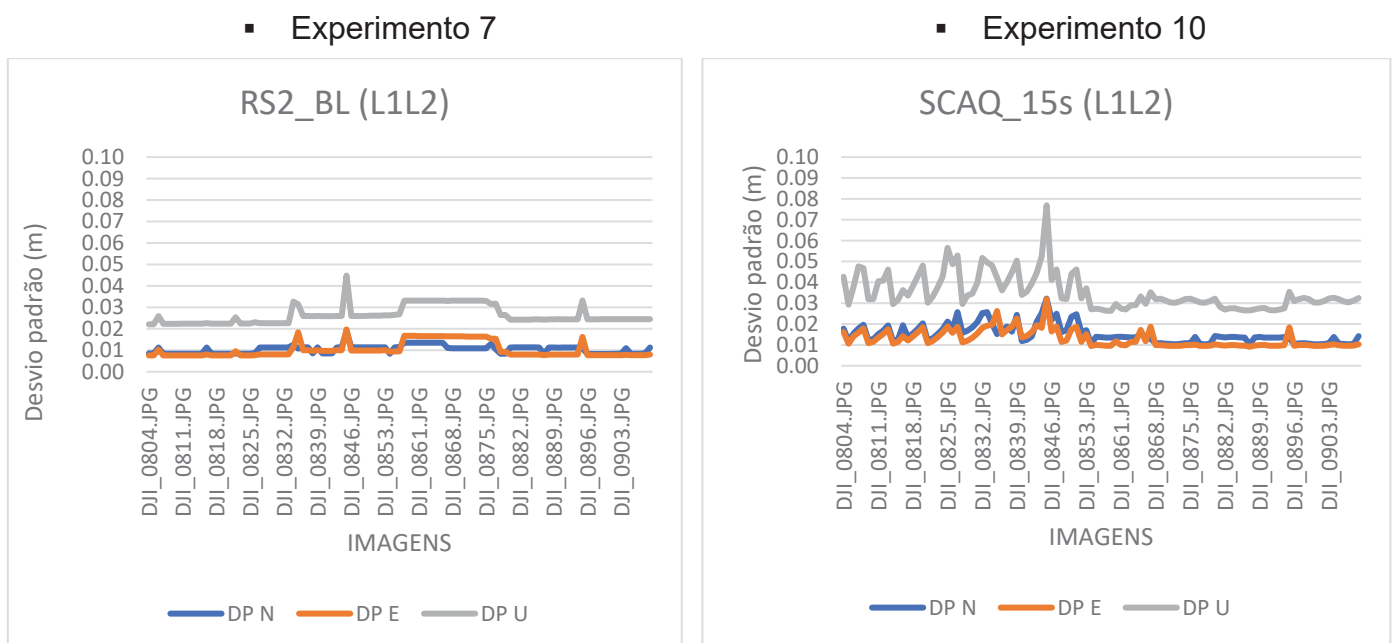
4.2.2 Resultados para os experimentos com linha de base longa

Nos experimentos com PPK2 em linha de base longa foi possível observar que não houve similaridade nos resultados obtidos entre os experimentos. Enquanto os experimentos 7 e 10 geraram quase 100% de pontos fixos, os experimentos 8 e 9 tiveram a maior parte de seus marcadores com solução flutuante.

Em decorrência disso, como se observa no Gráfico 7, a precisão das coordenadas tridimensionais para os experimentos 7 e 10 foram as melhores, sendo as médias de 0,014, 0,014 e 0,033 m em E, N e u para o experimento 7, e de 0,020, 0,021 e 0,052 m em E, N e u para o experimento 10. Os valores em planimetria se apresentaram entre 0,008 e 0,019 m no experimento 7, sendo menos variantes do que no experimento 10, que teve valores de mínimo e máximo iguais a 0,009 e 0,032 m.

Porém em altimetria, no experimento 10 os valores foram bem mais discrepantes e com amplitudes maiores, em relação ao experimento 7, principalmente na primeira parte da trajetória, variando entre 0,026 e 0,077 m.

GRÁFICO 7 – PRECISÃO DAS COORDENADAS DOS CPS PARA EXPERIMENTOS 7 E 10

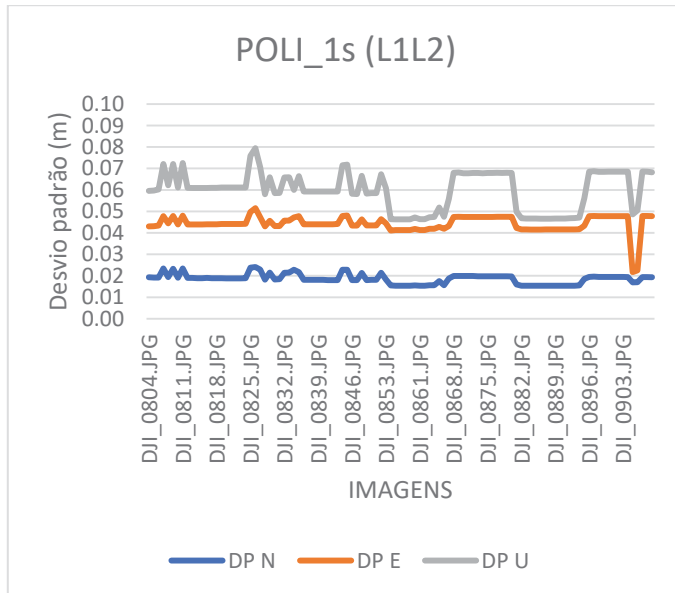


FONTE: O autor (2022).

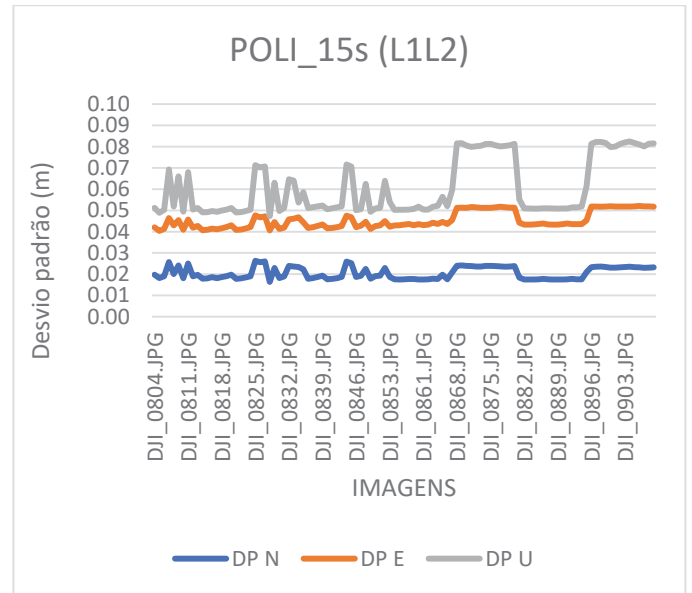
Com relação aos experimentos 8 e 9, os valores de precisão foram próximos ao nível milimétrico, como observado no Gráfico 8, com as médias na componente N sendo de 0,020 e 0,021 m. Na componente E, por conta da solução flutuante as precisões foram piores que em N, sendo de 0,036 e 0,046 m, respectivamente para os experimentos 8 e 9. Para a componente altimétrica, os valores se apresentaram entre 0,046 e 0,082 m, com médias de 0,063 e 0,065 m, respectivamente para os experimentos 8 e 9.

GRÁFICO 8 – PRECISÃO DAS COORDENADAS DOS CPS PARA EXPERIMENTOS 8 E 9

- Experimento 8



- Experimento 9



FONTE: O autor (2022).

Em geral o efeito de amostragem mais baixa, de 1 e 15 s, se mostrou mais prejudicial no caso de linhas de base longas. Isso em virtude das duas questões mencionadas de uso somente do sinal L2C e do tempo de ocupação bem abaixo do recomendado. Também por estas questões, os resultados foram piores em relação aos obtidos com linha de base curta.

Considerando todos os experimentos, de 1 a 10, os valores de precisão das coordenadas (estimada automaticamente como desvio padrão pelo software) ficaram geralmente abaixo de 0,09 m tanto para as componentes planimétricas quanto altimétricas, sendo a menor variação encontrada nos experimentos com linha de base curta.

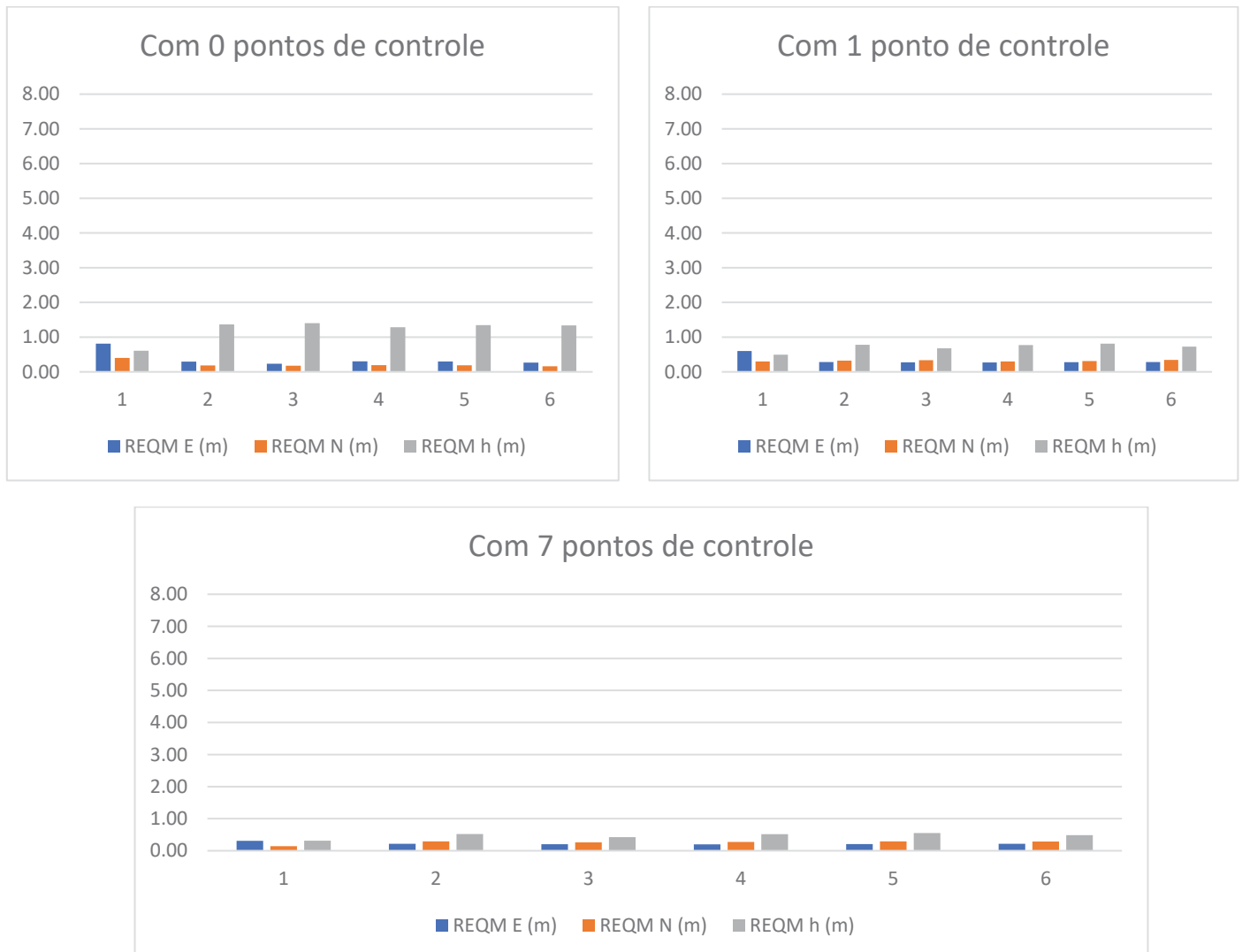
4.3. ANÁLISE DA ACURÁCIA NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO

Uma forma de avaliar a exatidão geométrica de cada fototriangulação, e conseqüentemente de cada mapeamento fotogramétrico, é o uso de pontos de verificação individuais que não são levados em consideração durante o processamento. Neste, os resíduos são considerados como diferenças entre os valores observados e os gerados por triangulação fotogramétrica. Aqui, as coordenadas E, N e h, do Sistema de coordenadas UTM Fuso 22 do ponto de verificação, medidas em campo, servem como valor observado. A verificação da exatidão é realizada através do REQM do conjunto amostral das diferenças.

Os Gráficos 9 e 10 apresentam a exatidão alcançada nos pontos de verificação em cada experimento após os processamentos fotogramétricos da área de estudo sem utilização de pontos de controle (georreferenciamento direto), com um e também com sete pontos de controle. Conforme mencionado anteriormente, os valores de POI obtidos na calibração da câmera e os valores de POE oriundos de cada estratégia de processamento dos dados GNSS foram injuncionados de forma relativa com peso inversamente proporcional ao quadrado das precisões (variâncias).

Observa-se que, de forma quase que geral, as exatidões na componente altimétrica se apresentaram piores, isso em virtude de basicamente duas questões. A primeira relacionada à paralaxe (ERCOLIN FILHO, 2017) e a segunda relacionada com a menor precisão das trajetórias na componente u, conforme apresentado anteriormente.

GRÁFICO 9 – REQM MÉDIO NOS EXPERIMENTOS EM BASE CURTA



FONTE: O autor (2022).

No caso de georreferenciamento direto, considerando os resultados com linha de base curta, conforme pode ser observado no Gráfico 9, para as componentes E e N, no experimento 1 as exatidões foram piores que nos demais. Isso pode estar relacionado com a solução fixa das ambiguidades, uma vez que no experimento 1 a porcentagem de soluções fixas é menor.

Em contrapartida, na componente h, no mesmo experimento 1, o valor de REQM foi mais da metade dos valores verificados nos demais experimentos. Isto é, a acurácia foi mais de 50% melhor. Conforme indicado anteriormente, as precisões em termos de trajetória na componente u nos experimentos 1, 2, 4, 5 e 6 foram concordantes ao nível do mm. Já estas em relação ao experimento 3 tiveram diferença

máxima em torno de 0,20 m. Analisando-se estes resultados, observando que a diferença de REQM em h nos experimentos 2, 3, 4, 5 e 6 foi relativamente baixa (máximo de 0,04 m), e observando ainda o benefício das soluções fixas nas componentes E e N, tem-se apenas uma possível causa do melhor resultado na componente altimétrica do experimento 1, a saber, a maior frequência de aquisição de coordenadas (0,2 s).

Outro resultado que pode ser observado é que a inclusão da portadora L2 em adição à L1 nos processamentos dos experimentos 4, 5 e 6, apesar de gerar uma melhoria leve na precisão da trajetória, não leva à uma melhora significativa em exatidão nos pontos de verificação. Isso já era esperado, tendo-se em vista os resultados dos testes estatísticos de igualdade de precisões, de tendência e do índice de concordância de Willmott.

No caso da inclusão de 1 ponto de controle nas fototriangulações, em todos os experimentos, houve melhoria de exatidão na componente altimétrica em relação ao georreferenciamento direto. Isso possivelmente em virtude de refinamentos nos valores de POI e de posições dos CPs. Esta melhoria já era esperada, tendo em vista o mesmo tipo de resultado obtido por Ercolin et al. (2020). Cabe ressaltar que, mesmo tendo sido feita a calibração da câmera em voo, os POI tendem a não serem estáveis, uma vez a câmera não é fotogramétrica.

Por outro lado, houve pioras nas componentes E e N, sendo maior em N, de aproximadamente 0,10 m. Essas pioras devem ser investigadas mais a fundo com a inclusão de mais pontos de controle em trabalhos futuros. O padrão relativo de exatidões permaneceu igual ao caso do georreferenciamento direto, com a componente u do experimento 1 sendo mais exata que as dos demais experimentos.

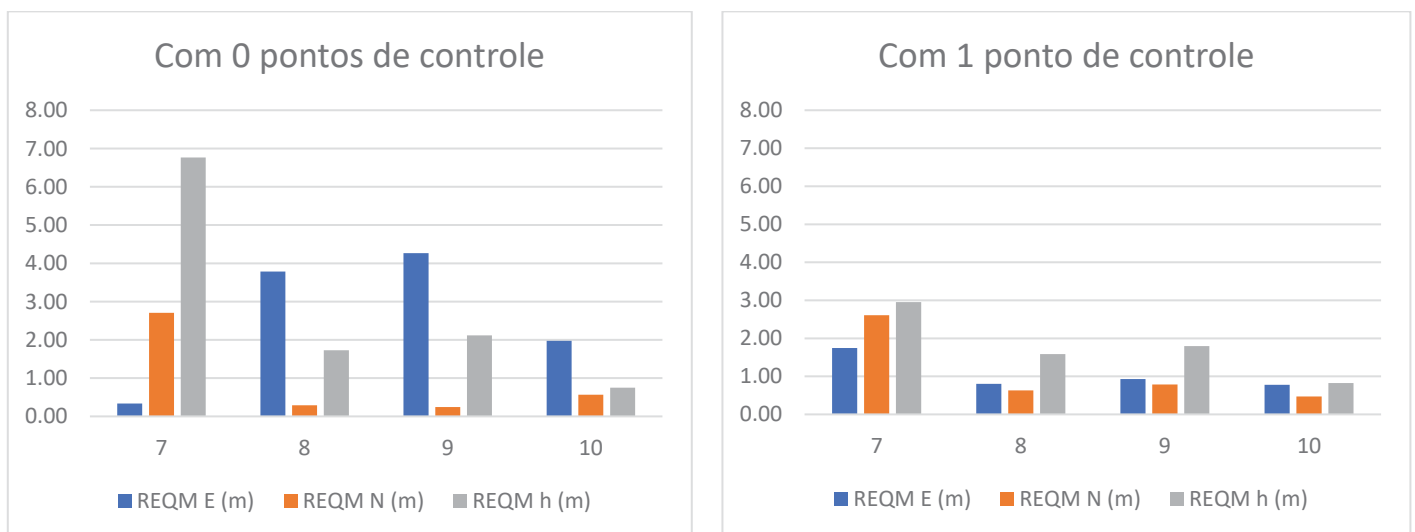
Realizando uma terceira análise, agora com a definição de sete pontos de controle, observa-se que para todos os experimentos houve melhora nos valores de exatidão da componente h, reforçando para essa componente a influência do uso de pontos de controle. Para o experimento 1 temos o melhor valor de exatidão (0,31 m) nessa componente, que no geral, dentre os experimentos, variou cerca de 0,20 m.

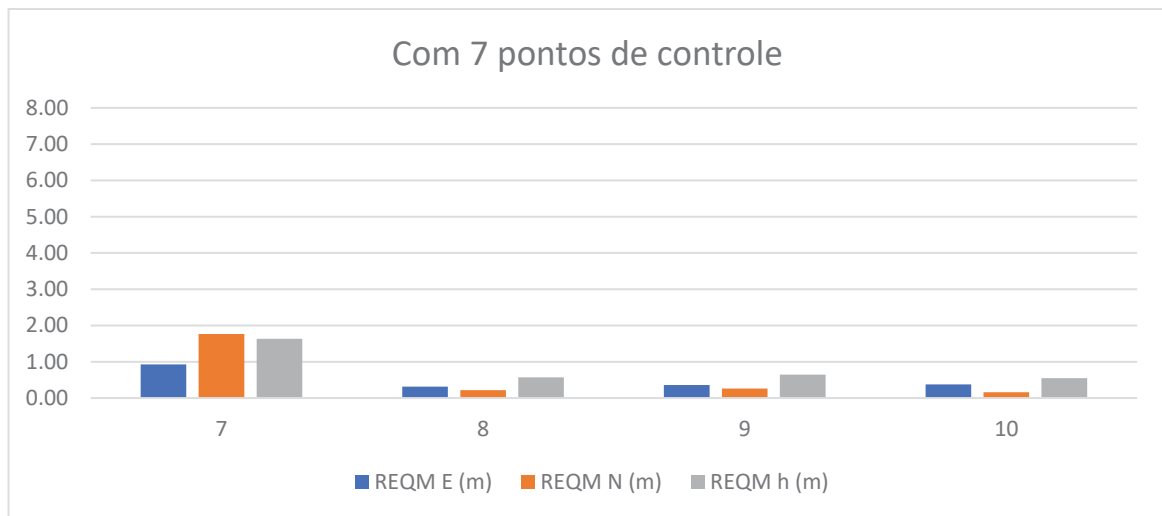
Para todos os experimentos a componente N foi a que sofreu menos variação, como valores girando em torno de 0,27 m, tendo seu melhor valor (0,14 m) no experimento 1.

Já para a componente E, observa-se melhora nos valores com o uso de mais pontos de controle, principalmente se considerarmos a variação dentro do experimento 1 que obteve valor de 0,81 m no georreferenciamento direto, 0,60 m no georreferenciamento indireto com o uso de um ponto de controle e 0,31 m com o uso de sete pontos de controle.

A influência das características de portadoras utilizadas e taxas de frequência seguiram o mesmo padrão observado nas análises anteriores e nessa terceira análise a dinâmica dos valores encontrados estão relacionados especificamente com a adoção de mais pontos de controle, que possibilitou um melhor refinamento nos valores de POI e das posições dos CPs, com mais graus de liberdade nos ajustamentos.

GRÁFICO 10 – REQM MÉDIO NOS EXPERIMENTOS EM BASE LONGA





FONTE: O autor (2022).

No caso dos experimentos com linha de base longa, conforme pode ser observado no Gráfico 10, em geral as exatidões foram menores em relação aos experimentos com linha de base curta, seja sem ou com 1 ponto de controle. Isso em decorrência da baixa precisão nas trajetórias destes experimentos em relação aos demais.

Para o caso específico da componente E, no experimento 1 teve-se a maior exatidão, seguido do resultado no experimento 10, com piores resultados nos experimentos 8 e 9. Isto em virtude das diferenças de precisões em coordenadas de trajetória nesta componente, conforme apresentado no Gráfico 8.

Porém, com relação às componentes N e h, não houve correlação total com os resultados de precisão de coordenadas de trajetória. Isso tendo em vista que no experimento 7 teve-se os piores resultados nestas componentes. Porém, no experimento 10, com a diminuição da linha de base para 115 km, a componente N foi mais precisa considerando as coordenadas de trajetória, em relação aos experimentos 8 e 9. Isso refletiu em uma exatidão maior na fototriangulação no experimento 10. No caso do experimento 7, pode-se ter tido uma precisão melhor, mas uma acurácia nas coordenadas pior.

No caso do uso de 1 ponto de controle, o refinamento nas componentes h dos CPs foi mais efetivo que no caso de linha de base curta. Isso tendo em vista que as melhoras foram maiores, com exceção do experimento 10, no qual se teve um piora

de 0,07 m. Na componente E, com exceção do experimento 7, também houve melhoras, concordando com o verificado nos experimentos de linha de base curta, excetuando o experimento 3, no qual houve uma piora de 0,04 m.

Para a componente N, somente nos experimentos 7 e 10 houve melhoras, ambas de 0,10 m. Nos experimentos 8 e 9 houve pioras de aproximadamente 0,50 m. Conforme mencionado, outros experimentos utilizando um conjunto maior de pontos de controle devem ser realizados no futuro para se compreender melhor os resultados.

Com relação à frequência de aquisição de dados, o uso de 1 s propôs melhores resultados do utilizando 15 s. Usando 1 ponto de controle, a diferença em exatidão para a estação POLI foi de aproximadamente 0,15 m nas componentes E e N, e de 0,20 m em h.

A análise do uso de mais pontos de controle para os experimentos em linha de base longa trouxe, através de seus valores, uma percepção ainda maior da influência desse contexto. Nota-se que os valores das exatidões das componentes nessa análise saíram de valores próximo e até acima de 2 m no experimento 7 para valores abaixo dos 2 m em todas as componentes. Observa-se ainda que para os demais experimentos os valores ficaram abaixo de 1 m.

Na componente h, o experimento 7 retornou o pior valor de exatidão, com 1,63 m, enquanto os demais experimentos tiveram seu valor em torno de 0,60 m. O pior valor de exatidão dentre todas as componentes e experimentos foi encontrado na componente N do experimento 7 (1,77 m). Para esse mesmo experimento temos também o pior valor de exatidão (0,93 m) na componente E, dentre os experimentos com linha de base longa. Nos experimentos 8, 9 e 10 as componentes E e N variaram em torno de 0,30 m. As características inerentes ao processamento dos dados para o experimento 7 como local da base, tempo de inicialização e influência da observável L2C refletem em uma pior acurácia, mesmo com o uso de mais pontos de controle.

O Gráfico 11 mostra os valores de REQM para as resultantes planimétrica e altimétrica de cada experimento processados para o georreferenciamento direto e o georreferenciamento indireto com uso de um ponto de controle e sete pontos de controle. Dentro do que se entende das características propostas para os experimentos, a distância da base em relação à área de estudo impactou diretamente

o valor do REQM, principalmente na componente h e a adoção de mais pontos de controle trouxe melhoras mais significativas nos valores de exatidão.

GRÁFICO 11 – ACURÁCIA DOS EXPERIMENTOS



FONTE: O autor (2022).

4.4. PEC-PCD

Um fluxo de trabalho SfM foi realizado no Agisoft Metashape, para reconstruir a área de estudo considerando cada experimento. Utilizando o software GeoPEC, que usa algoritmos desenvolvidos segundo a metodologia e procedimentos estabelecidos

em Santos et al. (2016), foi realizada a análise posicional dos dados espaciais, conforme a norma de PEC-PCD.

Vale ressaltar que a avaliação do PEC-PCD foi realizada tendo como base a nuvem de pontos 3D esparsa onde durante a sua geração a precisão posicional é calculada em relação aos pontos de verificação. Foi considerado o enquadramento junto ao PEC-PCD Classe A, e assim a maior escala permitida para cada experimento foi determinada.

As Tabelas 11, 12 e 13 apresentam os valores de acurácia obtidos com 1, 0 e 7 pontos de controle, respectivamente, para as resultantes planimétrica e altimétrica. As tabelas apresentam, também, o enquadramento junto ao PEC-PCD Classe A.

TABELA 11 – ACURÁCIA PLANIMÉTRICA, ALTIMÉTRICA E ENQUADRAMENTO PEC-PCD COM 1 PONTO DE CONTROLE

Experimento	PEC-PCD			
	REQM Planimétrico (m)	Classe A	REQM Altimétrico (m)	Classe A
1	0,6708	1:5.000	0,4931	1:10.000
2	0,4303	1:5.000	0,7810	1:10.000
3	0,4339	1:5.000	0,6800	1:10.000
4	0,4022	1:5.000	0,7728	1:10.000
5	0,4166	1:5.000	0,8136	1:10.000
6	0,4461	1:5.000	0,7251	1:10.000
7	3,1407	1:25.000	2,9521	1:50.000
8	1,0214	1:10.000	1,5846	1:25.000
9	1,2172	1:10.000	1,7951	1:50.000
10	0,9084	1:10.000	0,8245	1:10.000

FONTE: O autor (2022).

TABELA 12 – ACURÁCIA PLANIMÉTRICA, ALTIMÉTRICA E ENQUADRAMENTO PEC-PCD COM 0 PONTOS DE CONTROLE

Experimento	PEC-PCD			
	REQM Planimétrico (m)	Classe A	REQM Altimétrico (m)	Classe A
1	0,9041	1:10.000	0,6076	1:10.000
2	0,3500	1:5.000	1,3674	1:25.000
3	0,2922	1:2.000	1,4051	1:25.000
4	0,3591	1:5.000	1,2831	1:25.000
5	0,3541	1:5.000	1,3467	1:25.000
6	0,3120	1:2.000	1,3390	1:25.000
7	2,7293	1:25.000	6,7653	1:100.000
8	3,7953	1:25.000	1,7305	1:50.000
9	4,2717	1:50.000	2,1159	1:50.000
10	2,0548	1:25.000	0,7499	1:10.000

FONTE: O autor (2022).

TABELA 13 - ACURÁCIA PLANIMÉTRICA, ALTIMÉTRICA E ENQUADRAMENTO PEC-PCD COM 7 PONTOS DE CONTROLE

Experimento	PEC-PCD			
	REQM Planimétrico (m)	Classe A	REQM Altimétrico (m)	Classe A
1	0,3425	1:5.000	0,3010	1:5.000
2	0,3867	1:5.000	0,3965	1:10.000
3	0,3394	1:2.000	0,3969	1:10.000
4	0,3685	1:5.000	0,4978	1:10.000
5	0,3881	1:5.000	0,5256	1:10.000
6	0,3776	1:5.000	0,4635	1:10.000
7	1,8787	1:25.000	1,5005	1:25.000
8	0,3545	1:5.000	0,3545	1:10.000
9	0,4081	1:5.000	0,4081	1:10.000
10	0,3872	1:5.000	0,4470	1:10.000

FONTE: O autor (2022).

Com base nos resultados apresentados, infere-se que o processamento dos experimentos utilizando 1 ponto de controle apresentam, no melhor caso, para planimetria, enquadramento na escala 1:5.000, podendo chegar a 1:25.000 no pior caso, conforme padrões do PEC-PCD Classe A. Observa-se ainda um REQM planimétrico médio de 0,91 m, estando, na melhor das hipóteses, com REQM próximo a 0,40 m e, na pior das hipóteses, com REQM próximo a 3,14 m.

Para altimetria, o processamento utilizando 1 ponto de controle resultou em um enquadramento na escala 1:10.000, chegando, no pior caso, à escala de 1:50.000, conforme padrões do PEC-PCD Classe A. O REQM resultante ficou entre 0,49 e 2,95 m, com um valor médio de 1,14 m.

Já para o processamento com 0 pontos de controle os experimentos apresentam, no melhor caso, enquadramento na escala 1:2.000 em planimetria, podendo chegar a 1:50.000 no cenário mais extremo. Apresenta um REQM

planimétrico médio de 1,54 m, estando, na melhor das hipóteses, com REQM próximo a 0,29 m e, na pior das hipóteses, com REQM próximo a 4,27 m.

Em altimetria, conforme padrões do PEC-PCD Classe A, o processamento com 0 pontos de controle resultou no enquadramento em uma escala de 1:10.000, chegando, no pior caso, à uma escala de 1:100.000. O valor médio para o REQM ficou em torno de 1,87 m, estando, na melhor das hipóteses, com REQM próximo a 0,61 m e, na pior das hipóteses, com REQM próximo a 6,76 m.

Com a utilização de 7 pontos de controle, o processamento dos experimentos apresenta, no melhor caso, para planimetria, enquadramento na escala 1:2.000, podendo chegar a 1:25.000 no pior caso, conforme padrões do PEC-PCD Classe A. Obteve-se ainda um REQM planimétrico médio de 0,52 m, estando, na melhor das hipóteses, com REQM próximo a 0,30 m e, na pior das hipóteses, com REQM próximo a 1,88 m.

Em altimetria, o processamento utilizando 7 pontos de controle resultou em um enquadramento na escala 1:5.000, chegando, no pior caso, à escala de 1:25.000, conforme padrões do PEC-PCD Classe A. O REQM resultante ficou entre 0,30 e 1,50 m, com um valor médio de 0,53 m.

Apesar das variações encontradas, observa-se uma concordância com as precisões encontradas ao longo do processamento das trajetórias de cada experimento.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. CONCLUSÕES

Com a possibilidade de pós processamento dos dados do receptor GNSS a bordo do RPA, utilizando o método PPK, um passo importante foi dado no que diz respeito à economia nos projetos de mapeamento fotogramétrico com o uso de RPAs. Além disso, as melhoras nas qualidades das coordenadas dos CPs, se comparado ao uso padrão de receptores GNSS de navegação embarcados, fornecendo posicionamento com o PPS, propõe melhorias no levantamento fotogramétrico com georreferenciamento direto e, no caso de georreferenciamento indireto, a diminuição da quantidade de pontos de controle no terreno.

Neste cenário, tem-se as soluções GPPK1 e GPPK2 da empresa Guandalini Posicionamento. A primeira composta por um módulo GNSS Emlid Reach M+ (L1) e Antena multi-GNSS Tallysman adaptada e a segunda com módulo GNSS Emlid Reach M2 multifrequência (L1/L2) e Antena Multifrequência GNSS helicoidal. Ambas com fotossensores que, acoplado ao led da RPA, fazem a correlação entre o instante de tomada da foto e as coordenadas GNSS.

Nesta pesquisa, foi analisada a influência de diferentes estratégias de processamento GNSS no provimento de trajetória do RPA no âmbito da exatidão de posicionamento obtido por mapeamento fotogramétrico. Nas estratégias, foram testados o uso de diferentes portadoras, diferentes estações base, com extensões de linha de base longa e curta, e diferentes frequências de aquisição de observáveis.

Diante de todos os experimentos aqui realizados e dos resultados obtidos em cada um deles, tem-se que o cenário mais vantajoso em termos exatidão para os usuários seria o do experimento 1, porém com a solução fixa para a maioria dos satélites. Isso a fim de que a componente E possa ter uma acurácia melhorada. Tal questão pode ser obtida com um tempo um pouco maior de inicialização, em local aberto sem susceptibilidade à multicaminhamento e perdas de ciclo.

No caso de não ter a possibilidade de uma linha de base curta, o tempo de inicialização deve ser condizente com o indicado em IBGE (2017), ainda mais que somente o sinal L2C é utilizado, pela limitação do próprio receptor à bordo da RPA, o

que diminui a possibilidade de formação de observáveis livre de ionosfera e, assim sendo, a quantidade de satélites disponíveis. Como solução alternativa, o uso de estações virtuais como realizado por Teppati Losè et al. (2020) é indicado, e será testado em trabalhos futuros.

Caso o usuário precise utilizar uma estação RBMC, por algum motivo de ausência de receptor em base própria, para o caso de linha de base curta, o uso de frequência de aquisição de dados com 1s ou 15s promove pouca diferença em exatidão, assim como a consideração da portadora L2. Lembrando-se que neste caso, somente o sinal L2C foi utilizado.

No caso de base RBMC com linha de base longa, quanto maior a extensão da mesma, mais tempo de inicialização deve ser adotado. Neste caso, deve-se levar em conta não só o problema do uso restrito à L1 e L2C, mas a diminuição dos satélites “visíveis” simultaneamente nas estações base e itinerante, diminuindo a possibilidade de formação das duplas diferenças. Nesta pesquisa foi possível identificar uma perda considerável na quantidade de satélites observados para os experimentos em linha de base longa.

Nesta pesquisa, com o uso da linha de base de 115 km ao invés de 300 km os resultados tanto de precisão nas coordenadas de trajetória quanto em exatidão com os pontos de verificação foram melhores. Outra questão observada foi que a solução fixa das ambiguidades contribuiu na melhoria de precisão e exatidão na componente E. Com relação à frequência de aquisição de dados, com 1s tende-se a se obter resultados melhores do que com 15 s.

No tocante aos processamentos fotogramétricos e as discrepâncias observadas, entende-se que enquanto o georreferenciamento direto foi caracterizado por discrepâncias maiores na componente altimétrica nos conjuntos de dados disponíveis, os efeitos de um ponto de controle se mostraram positivos e ainda mais evidentes com o uso de mais pontos de controle. Isto é, em todos os casos o uso de pelo menos um ponto de controle é recomendado, uma vez que as exatidões aumentam na componente altimétrica. Porém, o uso de apenas um ponto de controle pode proporcionar pequenas pioras nas componentes planimétricas, o que se pode inferir com a análise da inclusão de mais pontos de controle no ajustamento, que resultou em valores de exatidões mais uniformes entre as componentes. Entende-se

que o uso de um conjunto maior de pontos de controle em campo, aumenta os custos do mapeamento, porém, demonstraram considerável relevância para o refinamento dos POI e das posições dos POE. Cabe ressaltar que, para realizar a análise do PEC-PCD, sempre haverá a necessidade de se obter pontos em campo, neste caso de verificação.

Comparando-se os resultados obtidos nos experimentos de 1 a 6 com os obtidos por Daakir (2017), por Stöcker (2017) e por Dinkov e Kitev (2020) tem-se a mesma ordem de grandeza em termos de exatidões, o centímetro. No caso do uso de georreferenciamento direto, analisando-se valores de exatidões encontrados nos trabalhos de Padró (2019), Kalacska (2020) e Žabota e Kobal (2021) observa-se uma proximidade maior com os resultados obtidos nos experimentos de 7 a 10, uma vez que a ordem de grandeza obtida para o quadro amostral varia entre o decímetro e o metro.

Analisando ainda o contexto das linhas de base, a uniformidade encontrada nos experimentos com linha de base curta, reflete o que se entende pelas possibilidades proporcionadas quanto à facilidade de tal cenário no que tange à geometria de satélites, qualidade da resolução de ambiguidades e precisões esperadas. Ainda que os resultados obtidos com linha de base longa, sugiram contrariedade ao que se espera para tal configuração, pelos motivos mencionados, entende-se que o presente trabalho vem colaborar com discussões no uso de linha de base acima de 100 km.

Uma questão importante é que dependendo da configuração de voo e da topografia do terreno, os POI podem apresentar altas correlações numéricas entre si, e também com os POE. É importante salientar que a câmera do Phantom 4 Advanced da DJI é composta por um obturador mecânico (global shutter) e possui um alto nível de estabilidade, significativamente superior a outros sistemas do fabricante. Ainda assim, do ponto de vista fotogramétrico, apesar dessas características positivas, a câmera não é métrica, portanto, a calibração em voo prévia é importante, ou ainda a calibração em serviço, considerando o uso de um conjunto maior de pontos de controle. De todo modo, esses tipos de câmeras nem sempre são adequadas para aplicações fotogramétricas de alta precisão e uma avaliação de seu desempenho e

das implicações de uma calibração precisa mostra-se uma etapa crucial do processamento fotogramétrico.

Pequenas mudanças nos valores de POI podem afetar muito a precisão da orientação do bloco fotogramétrico, principalmente quando nenhum GCP é incluído no processamento. Outro fator relevante é a adoção de imagens oblíquas, o que torna a calibração da câmera mais robusta. Teppati Losè et al. (2020) demonstra que a integração de imagens oblíquas desempenha um papel fundamental para obtenção de baixos valores de erro (precisão centimétrica) nos pontos de verificação se comparado com a utilização apenas de imagens nadirais, o que resulta em precisão na faixa de metros, assim como visto no presente trabalho. Tal fato se ressalta na adoção de 0 pontos de controle, onde o uso de apenas imagens nadirais pode levar a uma geometria fraca e uma estimativa imprecisa dos POI, especialmente para a distância focal, decorrendo significativa alteração na componente altimétrica. Os resultados apresentados demonstram o quão importante é a fase de calibração da câmera e como isso pode impactar no processamento fotogramétrico.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros a serem desenvolvidos tem-se:

- investigar o uso de diferentes câmeras nessa mesma abordagem, considerando-se os diferentes modelos de RPA comumente utilizadas para mapeamento.
- analisar a influência de fatores como a calibração da câmera, a geometria da aquisição das imagens e diferentes porcentagens de sobreposição das imagens, bem como as mudanças de altitude de voo, a inclusão de imagens oblíquas e o número e a posição dos GCPs.
- considerar os aspectos de diferentes métodos de calibração da câmera e sua influência no georreferenciamento direto.
- pesquisar o uso de outros softwares de processamento dos dados GNSS.
- avaliar a influência da calibração de antena GNSS utilizada em receptores de baixo custo embarcados em RPA, para mapeamentos fotogramétricos.

- analisar a influência da inclusão de mais pontos de controle nas fototriangulações a fim de se refinar com maiores graus de liberdade os POI e POE;
- testar a geração de estação virtual nos casos de linha de base curta para a diminuição do tempo de inicialização e aumentos precisões em trajetória e exatidões;
- testar a utilização de precisões multiplicadas por fatores de escala, como 1,96, (95% na estatística Z) ou 2,58 (99% na estatística Z) nas ponderações das injunções relativas nas coordenadas dos CPs, a fim de permitir um ajuste mais livre destas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL – ANAC. **Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial nº 94/2017**. Brasília, 2017.

ALMEIDA, M. S. **Análise comparativa da qualidade posicional dos métodos de posicionamento por ponto preciso e do posicionamento relativo estático com GNSS**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, BH. 2015.

ALVES, D. B. M. **Posicionamento baseado em redes de estações de referência gps utilizando o conceito de estação virtual**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Presidente Prudente, SP 2008.

ALVES, C. M. D.; MONICO, J. F. G.; ROMÃO, V. M. C. **Análise da acurácia no PPP a partir da solução de ambiguidades GPS em curtos períodos de ocupação**. Revista Brasileira de Cartografia, Nº 63/5, p. 585-600, 2011.

AMAGUA, C. G. P. **Avaliação do impacto do efeito de carga por pressão atmosférica em posicionamento GPS de alta precisão nas regiões do Equador continental e da Amazônia brasileira**. Dissertação de mestrado. UFPR. Curitiba, PR, 2018.

ANDRADE, J. B. de. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 258 p., 1998.

ATUNGGAL, D. et al. **Evaluation on the performance of single and dual frequency low cost GPS module observation using geodetic antenna**. Communications in Science and Technology, v. 3, n. 1, p. 9-14, 2018.

AROCHA BARRIOS, R. A. **Influência da calibração em serviço da câmara digital Vexcel XP no georreferenciamento direto de imagens**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

BAPTISTA, P.; BASTOS, L.; CUNHA, T.; BERNARDES, C.; DIAS, J. A. **Monitoring Sandy Shore Morphologies by DGPS – A Pratical Tool to Generate Digital Elevation Models**. Journal of Coastal Research, v. 24, n.6, p.1516-1528, 2008.

BARBOSA, E. D. M., MONICO, J. F. G., ALVES, D. B. M., e DE OLIVEIRA, L. C. **Integridade no posicionamento RTK e RTK em rede.** BC - Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 16, n. 4, 589-605 p., 2010.

BOLKAS, D. **Assessment of GCP number and separation distance for small UAS surveys with and without GNSS-PPK positioning.** Journal of Surveying Engineering, v. 145, n. 3, p. 04019007, 2019.

BORGES, P. A. F. **Métodos de Posicionamento por GNSS.** Apontamentos de aula. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul de Minas Gerais. Inconfidentes, MG, 2018.

BRASIL. **Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as instruções reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional.** Diário Oficial, Brasília, DF, 1984.

CHANG, X.-W.; YANG, X.; ZHOU, T. **MLAMBDA: A modified LAMBDA method for integer least-squares estimation.** Journal of Geodesy, v. 79, n. 9, p. 552-565, 2005.

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.

CRAMER, M. **Performance of GPS/inertial solutions in photogrammetry.** Photogrammetric Week 2001, Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany, pp. 49-62, 2001.

DEBIASI, P. **Desenvolvimento de metodologias de calibração de uma câmara digital de baixo custo integrada com um sistema LIDAR.** Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

DINKOV, D.; KITEV, A. **Advantages, disadvantages and applicability of GNSS post-processing kinematic (PPK) method for direct georeferencing of UAV images.** In: Proceedings of the 8th International Conference on Cartography and GIS, Nessebar, Bulgaria, p. 15-20, 2020.

DJI. **PHANTOM 4 RTK – User Manual**. DJI, v2.4, 2021. Acesso em 09 de agosto de 2022, disponível em: <https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_rtk/20210716/Phantom_4_RTK_User_Manual_v2.4_EN.pdf>

DJI. **MATRICE 300 RTK – Manual do usuário**. DJI, v3.2, 2022. Acesso em 09 de agosto de 2022, disponível em: <https://dl.djicdn.com/downloads/matrice-300/20220620/M300_RTK_User_Manual_PTBR_v3.2.pdf>

DOS SANTOS, A. de P.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, N. T.; GRIPP JUNIOR, J. **Avaliação da Acurácia Posicional em Dados Espaciais Utilizando Técnicas de Estatística Espacial: Proposta de Método e Exemplo Utilizando a Norma Brasileira**. Boletim de Ciências Geodésicas, vol. 22, n.4, 2016.

DSG. **Especificação técnica para a aquisição de dados geoespaciais vetoriais (ET-ADGV)**. Ministério da Defesa, Exército Brasileiro, Departamento de Ciência e Tecnologia. Brasília-DF, 2ª edição, 2011.

EMBRAPA. **Circular Técnica 75 - Planos de Voo Semiautônomos para Fotogrametria com Aeronaves Remotamente Pilotadas de Classe 3**. Rio Branco, 2018.

ERCOLIN FILHO, L. **Calibração de um sistema fotogramétrico multi-câmeras para uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

ERCOLIN FILHO, L.; PICUSSA, M. S.; DELAZARI, L. S. **Análise da acurácia de um sistema de posicionamento cinemático pós-processado a bordo de um vant-rpa para aplicações de mapeamento**. Anais do XI Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, Paraná, 2020.

ESPINHOSA, D. R. S. **Influência da injunção da base na fototriangulação de imagens obtidas com uma unidade de mapeamento móvel**. Presidente Prudente, 2006.

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, p. 3882, 2021.

FERREIRA, E. et al. **Automated extraction of free surface topography using SfM-MVS photogrammetry**. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 54, p. 243-249, 2017.

FREIBERGER JUNIOR, J. **Investigações Da Calibração Relativa de Antenas GNSS**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

GARCIA, M. V. Y. et al. **Avaliação de produtos cartográficos derivados de levantamento topográfico utilizando veículo aéreo não tripulado para aplicações em engenharia civil**. Campinas, 2020.

GEMAEL, C.; ANDRADE, J. B. de. **Geodésia Celeste**. Curitiba: Ed. UFPR, 389p, 2003.

GOUVEIA, T. A. F. **Modelagem neutrosférica sobre a América do Sul baseada em PNT e assimilação de dados locais e robusta avaliação utilizando observações GNSS**. Presidente Prudente, SP, 136 f, 2013.

HOFMANN, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS theory and practice**. Springer Wien NewYork, 2001.

HUANG, J. D.; JACKSON, D. W. T.; COOPER, J. A. G. **Morphological Monitoring of a High Energy Beach System Using GPS and Total Station Techniques, Runkerry, Co. Antrim, Northern Ireland**. *Journal of Coastal Research*, No. 36, pp. 390-398, ISSN 0749-0208. (DOI: 10211/08-1108.1). 2002.

HUINCA, S. C. M. **Calibração Relativa de Antenas GNSS na BCAL/UFPR**. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 131 f., 2009.

IBGE. **Recomendações para levantamentos relativos estáticos – GPS**. Rio de Janeiro: IBGE, 35p., 2008. Acesso em 29 de novembro de 2021, disponível em

https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rec_om_gps_internet.pdf

IBGE. Especificações e normas para levantamentos geodésicos associados ao sistema geodésico brasileiro. Rio de Janeiro: IBGE, 56p., 2017. Acesso em 12 de novembro de 2022. Disponível em:

ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/normas_levantamentos_geodesicos.pdf.

IBGE. IBGE-PPP: Serviço on-line para pós-processamento de dados GNSS. Manual do Usuário. Versão: maio de 2020. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 65P., 2020. Acesso em 13 de junho de 2021, disponível em:

<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>

IBGE. IBGE-PPP: Serviço on-line para Pós-Processamento de dados GNSS. Rio de Janeiro: IBGE, 60p., 2020. Acesso em 11 de março de 2021, disponível em <liv101677.pdf> (ibge.gov.br)

JAMES, M. R.; ROBSON, St. **Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application.** Journal of Geophysical Research: Earth Surface, v. 117, n. F3, 2012.

KALACSKA, M. et al. **Accuracy of 3d landscape reconstruction without ground control points using different uas platforms.** Drones, v. 4, n. 2, p. 13, 2020.

KLEIN, I.; GUZATTO, M. P. **Conceitos de posicionamento por satélites: topografia e agrimensura para cursos técnicos.** Florianópolis/SC. IFSC, 2018, p. 38.

LE VAN, C. A. N. H.; CUONG, C. X.; Nguyen, Q. U. O. C.; ANH, T. T.; Xuan-Nam, B. U. I. **Experimental investigation on the performance of DJI phantom 4 RTK in the PPK mode for 3D mapping open-pit mines.** Inżynieria Mineralna, v. 1, n. 2, p. 65–74-65–74, 2020.

LOPES, T. **Avaliação do uso de RPA quadrimotor para aplicações de mapeamento.** 2019.

LEICK, A. **GPS SATELLITE SURVEYING.** 3rd Edition, 464 p, 2004.

MADER, G. **GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey**. GPS Solutions, Vol. 3, N°1, p.50-58, 1999.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2. Ed. São Paulo: Editora UNESP, 476p., 2007.

MORTON, R. A.; LEACH, M. P.; PAINE, J. G.; CARDOZA, M. A. **Monitoring beach changes using GPS surveying techniques**. Journal of Coastal Research, 9, 702–720. 1993.

NEX, F.; ARMENAKIS, C.; CRAMER, M.; CUCCI, D. A.; GERKE, M.; HONKAVAARA, E.; KUKKO, A.; PERSELLO, C.; SKALOUD, J. **UAV in the advent of the twenties: Where we stand and what is next**. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, v. 184, p. 215-242, 2022.

OSCO, L. P. et al. **A review on deep learning in UAV remote sensing**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 102, p. 102456, 2021.

PADRÓ, J.-C. et al. **Comparison of four UAV georeferencing methods for environmental monitoring purposes focusing on the combined use with airborne and satellite remote sensing platforms**. International journal of applied earth observation and geoinformation, v. 75, p. 130-140, 2019.

PEDREIRA, W. J. P. DE ANDRADE OLIVEIRA, J.; SANTOS, P. S. **Avaliação da acurácia altimétrica usando a tecnologia vant**. Caminhos de Geografia, v. 21, n. 73, p. 209–222-209–222, 2020.

ROZE, A. et al. **eBee RTK accuracy assessment**. Lausanne, Switzerland, 2014.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications**. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 586 páginas, 2003.

SILVA, C. M. da. **Solução das ambiguidades de linhas de bases médias e longas: aplicação no posicionamento baseado em redes**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Presidente Prudente, SP, 2015.

SILVA, D. Q. **Viabilidade e acurácia de VANT para o monitoramento costeiro tridimensional**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 2018.

SILVA, G. F.; GASPAR, G. A. M. G. **Utilização de VANT como ferramenta de imageamento e geração de modelo tridimensional em substituição ao laser scanner**. Fundação de Ensino e Pesquisa do Sul de Minas (FEPESMIG), 2020. Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/handle/prefix/1399>. Acessado em: 28 de junho de 2021.

SMITH, M. W.; CARRIVICK, J. L.; QUINCEY, D. J. **Structure from motion photogrammetry in physical geography**. Progress in physical geography, v. 40, n. 2, p. 247-275, 2016.

STÖCKER, C. et al. **Quality assessment of combined IMU/GNSS data for direct georeferencing in the context of UAV-based mapping**. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 42, p. 355, 2017.

ŠTRONER, M. et al. **Evaluation of the georeferencing accuracy of a photogrammetric model using a quadcopter with onboard GNSS RTK**. Sensors, v. 20, n. 8, p. 2318, 2020.

TADDIA, Y.; STECCHI, F.; PELLEGRINELLI, A. **Coastal mapping using DJI Phantom 4 RTK in post-processing kinematic mode**. Drones, v. 4, n. 2, p. 9, 2020.

TAKASU, T.; YASUDA, A. **Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB**. In: International symposium on GPS/GNSS. International Convention Center Jeju Korea, 2009.

TAKASU, T. **RTKLIB ver. 2.4.2 Manual**. 2013. Disponível em: https://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf. Acessado em: 13 de dezembro de 2021.

TEPPATI LOSÈ, L.; CHIABRANDO, F.; GIULIO TONOLO, F. **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, p. 578, 2020.

TEUNISSEN, P.J.G. **The least-square ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS ambiguity estimation.** Journal of Geodesy, vol.70, 1995.

THEODORO, L. T. C. **Análise da influência da modelagem troposférica na resolução de ambiguidades no PPP.** Dissertação de mestrado. UFPR. Curitiba, PR, 2020.

TOMMASELLI, A. M. G., REISS, M. L. L. **A Photogrammetric Method For Single Image Orientation And Measurement.** Photogrammetric Engineering & Remote Sensing v. 71, n. 6, pp. 727-732, 2005.

VIANA, D. C. **Análise da qualidade cartográfica de MDS e MDE gerados por VANT e refinados com uso de dados GNSS RTK.** Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2017.

VIDAL, A. M. F. **Extração e avaliação de geo-informação pelo uso de imagens adquiridas por veículos aéreos não tripulados.** Dissertação de mestrado. Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Porto, Portugal. 2013.

WILLMOTT, C. J. et al. **Statistics for the evaluation and comparison of models.** Journal of Geophysical Research: Oceans, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

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

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

ZUMBERGE, J. F.; HEFLIN, M. B.; JEFFERSON, D. C.; WATKINS, M. M.; WEBB, F. H. **Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks.** Journal of geophysical research: solid earth, v. 102, n. B3, p. 5005-5017, 1997.

ANEXOS

ANEXO A – MARCADORES PLOTADOS PELO RTKLIB E SUAS PRECISÕES

FIGURA 16 – MARCADORES EXPERIMENTO 1

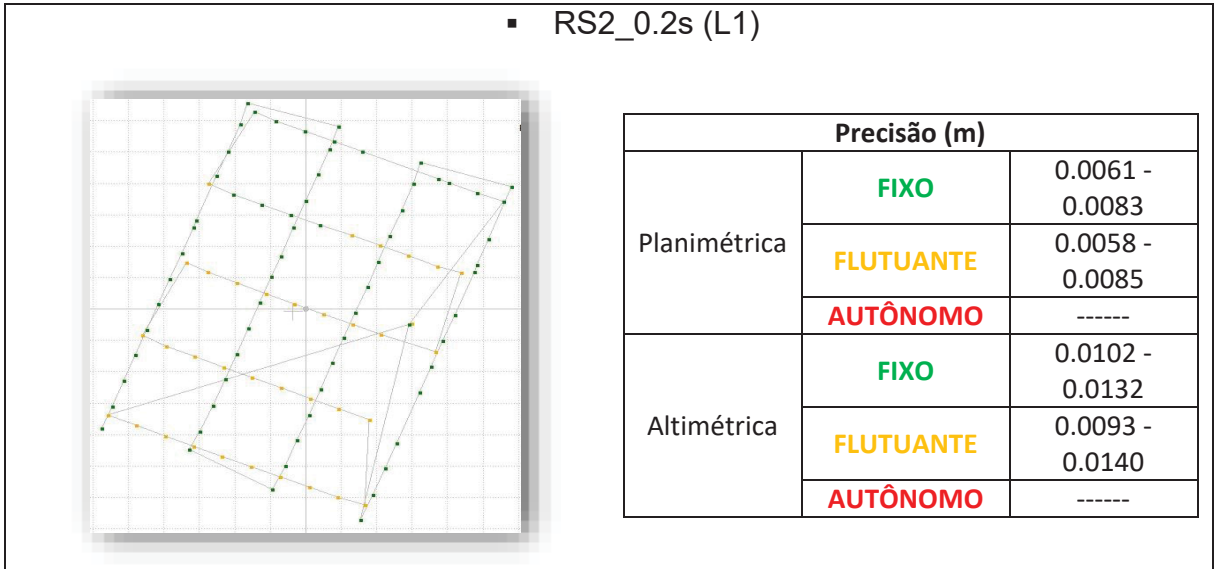


FIGURA 17 – MARCADORES EXPERIMENTO 2

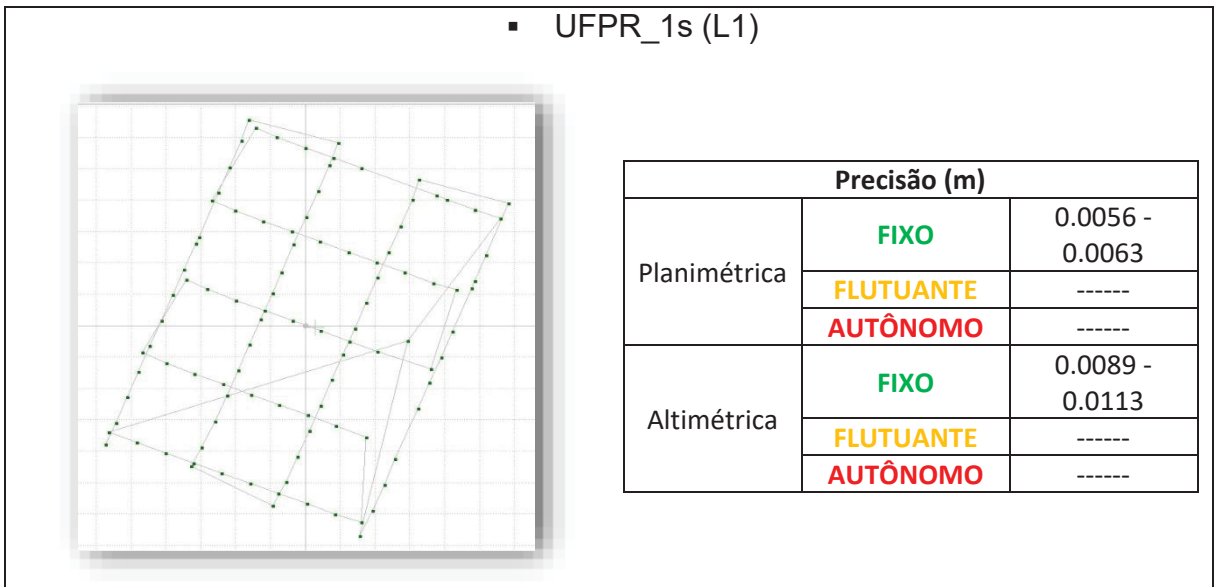
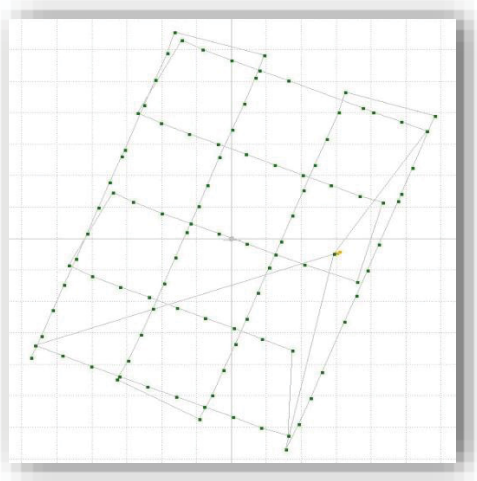


FIGURA 18 – MARCADORES EXPERIMENTO 3

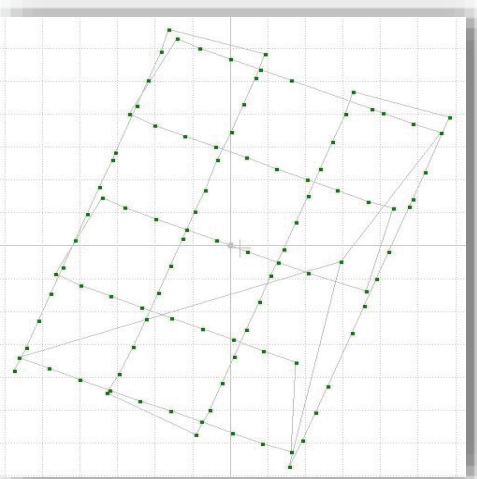
- UFPR_15s (L1)



Precisão (m)		
Planimétrica	FIXO	0.0078 - 0.0211
	FLUTUANTE	0.0080 - 0.0098
	AUTÔNOMO	-----
Altimétrica	FIXO	0.0138 - 0.0311
	FLUTUANTE	0.0129 - 0.0155
	AUTÔNOMO	-----

FIGURA 19 – MARCADORES EXPERIMENTO 4

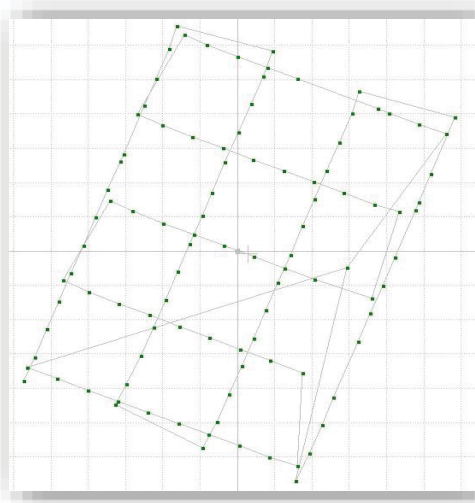
- RS2_0.2s (L1L2)



Precisão (m)		
Planimétrica	FIXO	0.0044 - 0.0054
	FLUTUANTE	-----
	AUTÔNOMO	-----
Altimétrica	FIXO	0.0074 - 0.0094
	FLUTUANTE	-----
	AUTÔNOMO	-----

FIGURA 20 – MARCADORES EXPERIMENTO 5

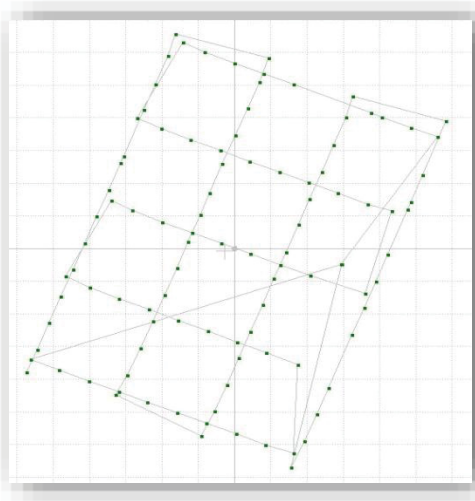
- UFPR_1s (L1L2)



Precisão (m)		
Planimétrica	FIXO	0.0044 - 0.0055
	FLUTUANTE	-----
	AUTÔNOMO	-----
Altimétrica	FIXO	0.0076 - 0.0091
	FLUTUANTE	-----
	AUTÔNOMO	-----

FIGURA 21 – MARCADORES EXPERIMENTO 6

- UFPR_15s (L1L2)



Precisão (m)		
Planimétrica	FIXO	0.0051 - 0.0087
	FLUTUANTE	-----
	AUTÔNOMO	-----
Altimétrica	FIXO	0.0078 - 0.0143
	FLUTUANTE	-----
	AUTÔNOMO	-----

FIGURA 22 - MARCADORES EXPERIMENTOS 7 E 8

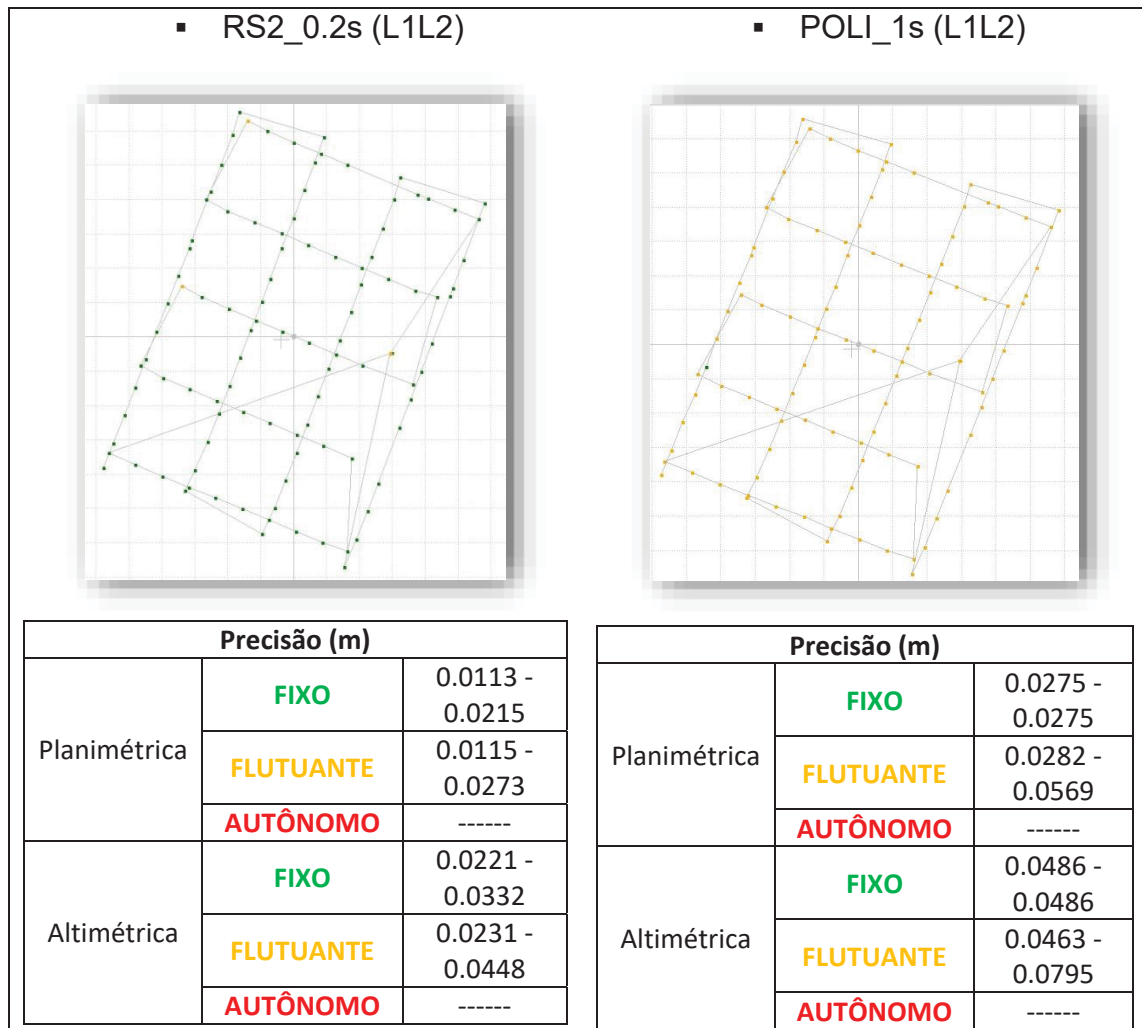


FIGURA 23 – MARCADORES EXPERIMENTOS 9 E 10

