

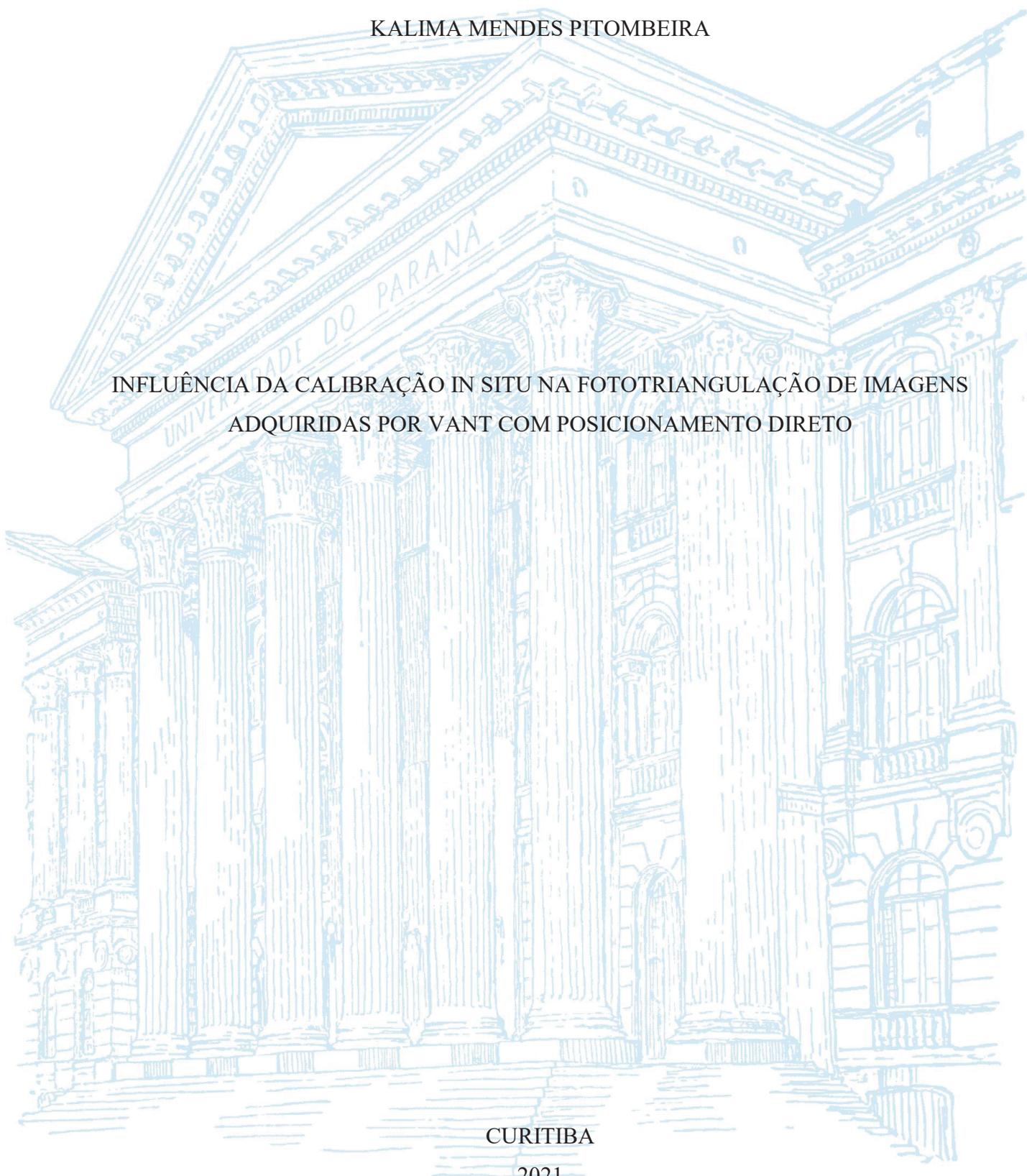
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KALIMA MENDES PITOMBEIRA

INFLUÊNCIA DA CALIBRAÇÃO IN SITU NA FOTOTRIANGULAÇÃO DE IMAGENS
ADQUIRIDAS POR VANT COM POSICIONAMENTO DIRETO

CURITIBA

2021



KALIMA MENDES PITOMBEIRA

INFLUÊNCIA DA CALIBRAÇÃO IN SITU NA FOTOTRIANGULAÇÃO DE IMAGENS
ADQUIRIDAS POR VANT COM POSICIONAMENTO DIRETO

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

Orientador: Professor Edson Aparecido Mitishita

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

P685i Pitombeira, Kalima Mendes
Influência da calibração *in situ* na fototriangulação de imagens adquiridas por VANT com posicionamento direto [recurso eletrônico] / Kalima Mendes Pitombeira. – Curitiba, 2021.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 2021.

Orientador: Edson Aparecido Mitishita.

1. Predador (Drone). 2. Dados geoespaciais. 3. Fotogrametria aérea. I. Universidade Federal do Paraná. II. Mitishita, Edson Aparecido. III. Título.

CDD: 778.35

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



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 em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **KALIMA MENDES PITOMBEIRA** intitulada: **INFLUÊNCIA DA CALIBRAÇÃO IN SITU NA FOTOTRIANGULAÇÃO DE IMAGENS ADQUIRIDAS POR VANT COM POSICIONAMENTO DIRETO**, sob orientação do Prof. Dr. EDSON APARECIDO MITISHITA, que após terem inquirido a aluna 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, 28 de Julho de 2021.

Assinatura Eletrônica

30/07/2021 11:42:22.0

EDSON APARECIDO MITISHITA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

30/07/2021 13:24:22.0

JORGE ANTONIO SILVA CENTENO

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

29/07/2021 11:02:08.0

MAURICIO GALO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE EST. PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO/PR. PRUDENT)

DEDICATÓRIA

*Aos meus queridos pais Milca e Antônio
E à minha amada Joaquina*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, Maria Milca e Antônio Pitombeira, por todo apoio, paciência e pelo amor incondicional. Por todos os esforços que fizeram para permitir que eu pudesse ter a estrutura e as oportunidades para realizar mais uma etapa na vida acadêmica.

À minha avó, Joana Mendes, por todo o amor e cuidado que me dedicou em toda minha vida. Aos meus primos Daniel, Dithara e Maria Helena pelo companheirismo que nos manteve unidos desde à infância até a vida adulta. Às minhas tias Diana, Cristina, Gislene e Elizabeth pela disponibilidade de ajudar os sobrinhos sempre que necessário.

Ao meu irmão Caio pela presença nos momentos mais difíceis dessa trajetória, por nossa amizade e parceira. Aos meus irmãos Enéas, Thamilla, Felipe e Raon, pelas conversas descontraídas e por todo o carinho sempre recíproco.

À amiga Dgeanne (Anne) por ter me recebido em Curitiba de braços abertos, me acolhido e me dado o suporte necessário para me adaptar a uma nova cidade, mesmo distante de todos os amigos e familiares.

Aos meus padrinhos Mark Reusion e Luís Carlos e madrinhas Francisca e Rosângela, por todo o incentivo na minha vida profissional e pela disposição em me auxiliar independentemente da situação.

Aos meus queridos amigos Mariana, Lídia, Magnólia, Renato e Luís, que mesmo distantes fisicamente se mantiveram presentes ao longo desses dois anos, compartilhando os momentos de alegria e as frustrações, escutando meus depoimentos prolixos sobre qualquer evento cotidiano e compreendendo minhas (constantemente) ausências.

Aos meus amigos Kauê, Natália, Luiz, Fluniel, Rubens e Alex, pelas incontáveis ajudas na realização deste trabalho e de todas as atividades acadêmicas no decorrer do mestrado, pela disponibilidade para sempre tirar dúvidas ou dar conselhos e pela companhia nessa caminhada. Aos meus amigos Nathan e Naiane por todo o acolhimento pelos vários momentos de descontração. Ao meu amigo Kaike pelo constante incentivo e, principalmente, por toda a ajuda e apoio nas atividades cotidianas, as quais tendo a negligenciar quando estou imersa nas responsabilidades profissionais.

Aos meus amigos do colégio INEC que mesmo sem a comunicação diária, continuaram torcendo por mim e sabendo também que a recíproca era e sempre será verdadeira.

Aos meus professores em todos os níveis de ensino, responsáveis pelo conhecimento que adquiri ao longo da vida. Particularmente àqueles que diretamente me motivaram, se disponibilizavam a tirar as dúvidas e verdadeiramente se dedicaram à profissão com carinho.

Em especial ao professor Antônio Aderson, meu orientador da graduação, pelos conselhos e por me encorajar a seguir na academia.

Ao professor Edson Mitishita, meu orientador nos dois anos de mestrado, pelas críticas construtivas, direcionamentos, conhecimentos passados e pela paciência e compreensão durante a execução deste estudo. Aos professores Jorge Centeno e Maurício Galo pelas contribuições pertinentes.

Ao Programa de Pós-Graduação de Ciências Geodésicas (PPGCG) da Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade de aperfeiçoamento científico e profissional.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de pesquisa e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento ao PPGCP e ao Laboratório de Fotogrametria.

Ao colega de laboratório Marlo Martins por ceder os dados do levantamento fotogramétrico utilizados na realização deste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente estiveram presentes e me ajudaram de alguma forma na produção da dissertação e no decorrer do mestrado.

“... a mind needs books as a sword needs a whetstone,
if it is to keep its edge.”
(George R. R. Martin)

RESUMO

Com o desenvolvimento de sensores e de plataformas de baixo custo, a extração de dados espaciais por Fotogrametria vem se tornando cada vez mais usual, visto que o uso de sistemas fotogramétricos embarcados em VANT (Veículos Aéreos Não Tripulados) e do método *Structure from Motion – Multi-view Stereo* (SfM-MVS) possibilitam um alto grau de automação no mapeamento de superfícies. O sistema fotogramétrico a bordo de um RPAS consiste em uma câmara digital e em sensores de posição e orientação (GNSS/IMU). Desse modo, para que seja possível determinar diretamente os Parâmetros de Orientação Exterior, é necessário que seja realizada uma calibração desse sistema. Portanto, faz-se necessário o desenvolvimento de estudos com o intuito de investigar a exatidão posicional de nuvens de pontos obtidas utilizando técnicas de pré-calibração de câmaras em imagens obtidas com VANT integradas a medidas da posição direta do sensor com alta precisão. Desta forma, o principal objetivo deste estudo consiste em analisar a influência da estimação dos Parâmetros de Orientação Interior por autocalibração e por calibração *in situ* com sub-bloco de imagens na qualidade posicional da extração de dados geoespaciais, associadas a medidas diretas da posição da câmara. Para isso foi realizado um estudo de caso no município de Curitiba (PR), no bairro Cidade Industrial. O levantamento fotogramétrico foi executado com o VANT DJI Phantom 4 Pro, compondo três faixas de voo paralelas, com 60 imagens aéreas verticais e sobreposição longitudinal de 80%. O receptor GNSS-PPK utilizado nessa pesquisa fornece a posição do sensor com precisão de 10 cm nas componentes horizontais e 20 cm na componente vertical. A etapa de apoio de campo, para determinação das coordenadas geodésicas de pontos no terreno, foi realizada por posicionamento cinemático com par de receptor GNSS da Topcon, modelo Hiper SR. Para os processamentos fotogramétricos de autocalibração e Orientação Integrada de Sensores com o uso da metodologia SfM, utilizou-se o programa *Agisoft Metashape* v 1.5. Já os procedimentos de Orientação Integrada do Sensor e calibração *in situ* com sub-bloco de imagens usando Fotogrametria tradicional, são executadas no programa *Erdas Imagine* e *CALIBRAV* da UFPR. Considerando os experimentos realizados no *Metashape*, a execução da calibração *in situ* com sub-bloco de imagens não permitiu melhorar a qualidade da extração de informações tridimensionais em experimentos sem pontos de apoio. Para os processamentos realizados com Fotogrametria Tradicional, o experimento de Orientação Integrada de Sensores usando os Parâmetros de Orientação Interior obtidos na calibração *in situ*, apresentou melhora de 19% em planimetria e de 86% em altimetria comparado ao experimento de Orientação Integrada de Sensores realizado com Parâmetros de Orientação Interior da autocalibração do *Metashape*.

Palavras-chave: *Structure from Motion-Multi-view Stereo* (SfM-MVS). Calibração de câmaras. Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). *Agisoft Metashape*.

ABSTRACT

The extraction of spatial data by photogrammetry is becoming more and more usual due to the development of low-cost sensors and platforms since the use of photogrammetric systems onboard UAV (Unmanned Aerial Vehicle) and the Structure from Motion - Multi-view Stereo method enable a high degree of automation in surface mapping. The photogrammetric system onboard an UAV consists of a digital camera and position and orientation sensors (GNSS/IMU). Thus, calibration of this system is required for the direct determination of the Exterior Orientation Parameters. Therefore, it is necessary to develop studies aimed at investigating the positional accuracy of point clouds obtained using camera pre-calibration techniques in images obtained with UAV integrated with direct sensor position measurements with high accuracy. Thus, the main purpose of this study is to analyze the influence of the estimation of the Interior Orientation Parameters by autocalibration and by in situ calibration with sub-block of images on the positional quality of geospatial data, associated with direct camera position measurements. To this end, a case study was conducted in Curitiba (PR), in the Cidade Industrial neighborhood. The photogrammetric survey was performed with the RPAS DJI Phantom 4 Pro, composing three parallel flight strips, with 60 vertical aerial images and a longitudinal overlap of 80%. The GNSS-PPK receiver used in this research provides the sensor position with a precision of 10 cm in the horizontal coordinates and 20 cm in the vertical coordinate. The field survey stage, for determining the geodetic coordinates of points on the terrain, was performed by kinematic positioning with a Topcon GNSS receiver, model Hiper SR. Agisoft Metashape v 1.5 program was used for the photogrammetric processing of self-calibration and Integrated Sensor Orientation using the SfM method. Integrated Sensor Orientation and in-situ calibration procedures with sub-block of images using Traditional Photogrammetry are performed in Erdas Imagine and UFPR's CALIBRAV programs. Considering the experiments performed on Metashape, the in-situ calibration with sub-block images did not improve the quality of three-dimensional information extraction in experiments without Ground Control Points. For the Bundle Adjustment performed with Traditional Photogrammetry, the Integrated Sensor Orientation experiment using Interior Orientation Parameters obtained in the in situ calibration showed an improvement of 19% in planimetry and 86% in altimetry compared to the Integrated Sensor Orientation experiment performed with Interior Orientation Parameters from the Metashape self-calibration.

Key-words: Structure from Motion-Multi-view Stereo (SfM-MVS). Camera calibration. Remotely Piloted Aircraft System (RPAS). Agisoft Metashape.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais diferenças entre referenciamento indireto e direto do sensor	24
Figura 2 – Sistema fotogramétrico multi-sensor para georreferenciamento direto	25
Figura 3 – Fluxo de trabalho padrão do SfM-MVS	38
Figura 5 – Distribuição de pontos de verificação	45
Figura 6 – Esquema-resumo dos experimentos de autocalibração sem pontos de apoio <i>Metashape</i>	45
Figura 7 – Esquema-resumo dos experimentos ISO com POIs obtidos por autocalibração	47
Figura 8 – Configurações de pontos de apoio	48
Figura 9 – Esquema-resumo dos experimentos de autocalibração com pontos de apoio no <i>Metashape</i>	49
Figura 10 – Configuração do sub-bloco e dos pontos de apoio.....	50
Figura 11 – Esquema-resumo do experimento de calibração <i>in situ</i> com sub-bloco de imagens	52
Figura 12 – Esquema-resumo dos experimentos no <i>Metashape</i> com POIs obtidos por calibração <i>in situ</i>	53
Figura 13 – Esquema-resumo das ISO Com POIs obtidos por calibração <i>in situ</i>	54
Figura 14 – Discrepâncias dos pontos de verificação nas autocalibrações sem pontos de apoio	59
Figura 15 – Discrepâncias dos pontos de verificação nas ISO com POIs obtidos por autocalibração.....	63
Figura 16 – POIs refinados na autocalibração com pontos de apoio.....	66
Figura 17- Gráfico de REMQ dos pontos de verificação das autocalibrações com pontos de apoio	68
Figura 18 – Discrepâncias dos pontos de verificação das autocalibrações com pontos de apoio	69
Figura19 – Distribuição de pontos no sub-bloco.....	72
Figura 20 – Discrepâncias dos pontos de verificação nos experimentos no <i>Metashape</i> com POIs obtidos por calibração <i>in situ</i>	77
Figura 21 – Discrepâncias dos pontos de verificação nas ISO com POIs obtidos por calibração <i>in situ</i>	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – REMQ dos resíduos na posição do sensor das autocalibrações sem pontos de apoio	56
Tabela 2 – POIs estimados nas autocalibrações sem pontos de apoio	57
Tabela 3 – REMQ das discrepâncias nos pontos de verificação das autocalibrações sem pontos de apoio	58
Tabela 4 – REMQ dos resíduos na posição do sensor nas ISO com POIs obtidos por autocalibração.....	61
Tabela 5 – REMQ das discrepâncias nos pontos de verificação nas ISO com POIs obtidos por autocalibração.....	62
Tabela 6 - REMQ dos resíduos na autocalibração com pontos de apoio	65
Tabela 7 - Discrepâncias nos pontos de verificação das autocalibrações com pontos de apoio	68
Tabela 8 – POIs estimados na calibração <i>in situ</i> com sub-bloco.....	73
Tabela 9 – REMQ dos resíduos na posição do sensor dos experimentos no <i>Metashape</i> com POIs obtidos por calibração <i>in situ</i>	75
Tabela 10 – REMQ das discrepâncias nos pontos de verificação dos experimentos no <i>Metashape</i> com POIs obtidos por calibração <i>in situ</i>	76
Tabela 11 – REMQ dos resíduos na posição do sensor nas ISO com POIs obtidos por calibração <i>in situ</i>	79
Tabela 12 – REMQ das discrepâncias nos pontos de verificação nas ISO com POIs obtidos por calibração <i>in situ</i>	80

LISTA DE SIGLAS

AAT	Aero Triangulação Assistida
BBA	<i>Bundle Block Adjustment</i>
BRIEF	<i>Binary Robust Independent Elementary Features</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>
CP	Centro de Perspectiva
DG	Georeferenciamento direto
EXIF	<i>Exchangeable Image File Format</i>
GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
ICA	Instrução do Comando da Aeronáutica
IMU	Unidade de Medida Inercial
ISO	Orientação Integrada de Sensores
MDT	Modelo Digital de Terreno
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MVS	<i>Multi-View Stereo</i>
OACI	Organização da Aviação Civil Internacional
POE	Parâmetro de Orientação Exterior
POI	Parâmetro de Orientação Interior
PPK	<i>Post Processed Kinematic</i>
RANSAC	<i>Random Sample Consensus</i>
REMQ	Raiz do Erro Médio Quadrático
RPAS	Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SfM	<i>Structure from Motion</i>
SIFT	<i>Scale Invariant Feature Transform</i>
SURF	<i>Speeded-Up Robust Features</i>
UAV	<i>Unmanned Aircraft Vehicles</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Considerações Gerais	13
1.2	Estado da arte	16
1.3	Hipótese	21
1.4	Objetivos.....	21
<i>1.4.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	<i>21</i>
<i>1.4.2</i>	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>21</i>
1.5	Justificativa	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	Orientação Direta do Sensor.....	23
2.2	Calibração de Câmaras	30
<i>2.2.1</i>	<i>Métodos de Campo</i>	<i>32</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Métodos de Tsai e Zhang.....</i>	<i>35</i>
2.3	Structure from Motion	36
<i>2.3.1</i>	<i>Etapas de processamento</i>	<i>37</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	Materiais.....	42
3.2	Metodologia	43
<i>3.2.1</i>	<i>Autocalibração Sem Pontos De Apoio No Metashape</i>	<i>43</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Orientação Integrada De Sensores Com POIs Obtidos Por Autocalibração</i>	<i>46</i>
<i>3.2.3</i>	<i>Autocalibração Com Pontos De Apoio No Metashape</i>	<i>47</i>
<i>3.2.4</i>	<i>Calibração In Situ.....</i>	<i>49</i>
<i>3.2.5</i>	<i>Experimentos No Metashape Com POIs Obtidos Por Calibração In Situ.....</i>	<i>52</i>
<i>3.2.6</i>	<i>Orientação Integrada De Sensores Com POIs Obtidos Por Calibração In Situ</i>	<i>53</i>
<i>3.2.7</i>	<i>Análise de Acurácia Posicional.....</i>	<i>54</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56

4.1	Autocalibração Sem Pontos de Apoio no Metashape	56
4.2	Orientação Integrada de Sensores com POIs obtidos por Autocalibração .	60
4.3	Autocalibração Com Pontos de Apoio no Metashape	65
4.4	Calibração <i>In Situ</i>	71
4.5	Experimentos no Metashape com POIs obtidos por Calibração <i>In Situ</i>	74
4.6	Orientação Integrada de Sensores com POIs obtidos por Calibração <i>In Situ</i>	78
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
	REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Fotogrametria é a ciência, arte e tecnologia que permite a extração de informações espaciais (quantitativas e qualitativas) de objetos e superfícies físicas através dos processos de registro, mensurações e interpretações de imagens e padrões de energia eletromagnética (ASPRS, 2004). Historicamente, o surgimento da Fotogrametria está associado ao uso de desenhos feitos manualmente para representar a superfície de terrenos, requerendo várias observações de campo para determinar a posição das feições topográficas. Assim, o mapeamento de superfícies por essa metodologia era consideravelmente laborioso antes do desenvolvimento da fotografia (ANDRADE, 2003).

Entretanto, apesar da foto ter sido inventada em 1839, a Fotogrametria começou a ser amplamente difundida apenas no início do século XX, devido à invenção do avião e do restituidor fotogramétrico analógico, bem como do aperfeiçoamento de lentes para câmaras aéreas (ANDRADE, 2003). Posteriormente, os princípios matemáticos da Fotogrametria Analítica foram desenvolvidos no final da década de 1950 por Hellmut Schmid e Duane Brown (ANDRADE, 2003). Além disso, o primeiro restituidor analítico surgiu em 1961, o qual continuou sendo aprimorado e utilizado durante as duas décadas seguintes. Assim, já no final do século XX os avanços computacionais e nas áreas de óptica e eletrônica permitiram inaugurar a era digital da Fotogrametria. Esse marco mudou consideravelmente o ambiente operacional dos levantamentos fotogramétricos, desde a obtenção das imagens, que passou a ser, inicialmente por meio de imagens analógicas digitalizadas e, posteriormente, por sensores digitais, à restituição, que pôde começar a ser realizada em ambiente computacional, permitindo a automatização de algumas etapas desse processo (MIKHAIL; BETHEL; MCGLONE, 2001).

Mesmo com a notável evolução que se sucedeu ao longo do século passado, a Fotogrametria convencional permanecia sendo uma área das Ciências Geodésicas e Cartográficas cuja aplicação se restringia à grandes empresas. Isto porque mesmo com a redução dos ônus com instrumentos para restituição, a necessidade de utilizar aviões e câmaras aéreas métricas, bem como a mão de obra extremamente especializada, impossibilitavam a execução de levantamentos fotogramétricos por profissionais autônomos ou empresas de pequeno porte (STUMPF et al., 2014).

Assim, o uso de plataformas aéreas mais acessíveis como pipas, balões de hélio, dirigíveis e drones, atrelados à sensores de baixo custo, passou a ser uma alternativa para

obtenção de imagens aéreas e extração de informações tridimensionais por Fotogrametria, devido ao desenvolvimento de câmaras não métricas. No entanto, a instabilidade dessas plataformas dificultava obter uma geometria de tomada das fotos adequada para esse processo, portanto, normalmente são utilizadas apenas em aplicações específicas. Ademais, a qualidade do sensor também compromete a precisão métrica dos dados geoespaciais obtidos. Tais fatores limitavam a aplicação desses levantamentos de baixo custo apenas para finalidades que não exigiam precisões centimétricas ou superiores (VERICAT et al. 2008; SMITH; CHANDLER; ROSE, 2009).

Ainda no âmbito dos progressos tecnológicos e científicos, em paralelo ao desenvolvimento da Fotogrametria Digital, a Visão Computacional também foi responsável por avanços significativos no processamento digital de imagens. Assim, com estudos conjuntos envolvendo essas duas áreas, surgiu a metodologia denominada de *Structure from Motion* (SfM) por Ullman (1979). O SfM foi concebido, então, como um método que permite estimar com alto grau de automação a estrutura tridimensional de objetos a partir de imagens, sem ser preciso conhecer à *priori* a posição e orientação do sensor no instante de tomada das fotos nem coordenadas tridimensionais de pontos no terreno (WESTOBY et al. 2012).

Essa metodologia permaneceu como objeto de estudo majoritariamente das Ciências Computacionais até o início dos anos 2000, quando o SfM passou a ser utilizado para modelar tridimensionalmente monumentos de importância histórica e cultural. Snavely, Seitz e Szeliski (2006, 2008) destacaram-se na modelagem de diversos patrimônios históricos com o uso de SfM, como o Coliseu (Roma), a Grande Muralha (China), o Monte Rushmore (EUA) e a Catedral de Notre-dame (Paris). As imagens utilizadas nesses estudos eram fotografias retiradas da internet a partir de sites de busca, provenientes de diversas câmaras, em diferentes pontos de perspectiva, condições de iluminação e épocas do ano. Contudo, como a proposta desses estudos consistia em propor aplicações relacionadas à visualização tridimensional, buscando possibilitar o “turismo virtual”, a exatidão posicional dos modelos 3D gerados não foi analisada.

Nesse contexto, pesquisadores das Ciências Geodésicas e Cartográficas passaram a ver potencial para utilização do SfM em conjunto com as plataformas aéreas e sensores de baixo custo, uma vez que a aplicação dessa metodologia não requeria informações de coordenadas de pontos de apoio no terreno, nem da posição e orientação do sensor, para realizar a reconstrução tridimensional da superfície. Desse modo, como a nuvem de pontos costuma ser gerada em um referencial arbitrário, os pontos de apoio são utilizados

para referenciar o modelo ao referencial geodésico ou cartográfico de interesse (mínimo de três pontos de apoio para permitir a transformação entre referenciais). Embora investigações quanto à acurácia de informações tridimensionais extraídas com a utilização do SfM tenham sido realizados com pipas (BRYSON et al., 2013; CURRIER, 2015), balões de hélio (JOHNSON et al., 2014) e dirigíveis (FONSTAD et al., 2013; VERICAT et al., 2008), os drones atualmente se destacam como a plataforma aérea mais utilizada para levantamentos fotogramétricos com uso de SfM.

As aeronaves não tripuladas possuem diferentes tamanhos e são utilizados para variadas finalidades atualmente, sejam militares, recreativas ou de mapeamentos, e por isso são conhecidas por diversas nomenclaturas. Segundo o Departamento de Controle de Espaço Aéreo (2020), o termo aeromodelo é utilizado para fins recreativos, enquanto RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*) é o termo padronizado internacionalmente pela Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) para as aeronaves não tripuladas que podem interagir com o Sistema de Controle de Tráfego Aéreo em tempo real. Entretanto, as denominações VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) ou, em inglês, UAV (*Unmanned Aircraft Vehicles*), são amplamente utilizadas em literatura (HARWIN, LUCIEER, 2012; ROSNELL, HONKAVAARA, 2012; JAMES; ROBSON, 2014; VASUKI et al, 2014).

Os VANTs, ou RPAS, apresentam maior potencial para serem utilizados em mapeamentos fotogramétricos por serem mais estáveis que as demais plataformas aéreas de baixo custo (como pipas, balões e dirigíveis) e ser possível pilotá-los remotamente, bem como programar a rota a ser seguida. Além disso, esses equipamentos apresentam melhor padronização da cobertura da superfície imageada e transporte mais facilitado inclusive em regiões de difícil acesso devido ao tamanho pequeno do equipamento (SMITH; CARRIVICK; QUINCEY, 2016). Por isso, os RPAS são as plataformas de baixo custo mais difundidas para extração de informações tridimensionais de superfícies por meio da técnica SfM, tanto no âmbito profissional para aplicações em diversos ramos das Engenharias, como em pesquisas acadêmicas nas Ciências Geodésicas, Cartográficas, Geológicas e Computacionais (BEMIS et al., 2014; JOHNSON et al., 2014; QU; HUANG; ZHANG, 2018).

Entretanto, vale ressaltar que, quando comparado às aeronaves tripuladas utilizadas em levantamentos fotogramétricos convencionais, os RPAS possuem limitações relacionadas principalmente à autonomia de voo e à sua estabilidade. Por serem consideravelmente leves, o uso de VANTs é mais influenciado por condições temporais, tornando essas plataformas mais instáveis que aviões, fator que pode interferir

no recobrimento das imagens obtidas (VERICAT et al. 2008). Atualmente, a aplicação de RPAS ainda é restrita ao estudo de áreas menores, visto que a altura de voo média dessas plataformas varia entre dezenas e poucas centenas de metros, além da autonomia de voo dos RPAS para mapeamento ser inferior a uma hora (GONÇALVES; HENRIQUES, 2017). Entretanto, com os desenvolvimentos tecnológicos em constante evolução, a tendência é que tais limitações sejam superadas em um futuro breve. Desse modo, o principal fator restritivo para mapeamento com RPAS está relacionado à legislação vigente em cada país, referentes ao acesso ao espaço aéreo nacional. No Brasil, a regulamentação dos RPAS é realizada pelo Ministério da Defesa, cuja publicação mais recente consiste na Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA) 100-40 de 2020.

Outro objetivo importante dos estudos fotogramétricos é a redução do apoio de campo requerido nos levantamentos fotogramétricos. Isto porque, em regiões de difícil acesso, como em áreas de vegetação densa e zonas glaciais, normalmente a execução do apoio de campo se torna muito onerosa. Além disso, em monitoramentos de desastres ambientais, tais como a ocorrência de incêndios ou atividade vulcânica, a etapa de levantamento das coordenadas de pontos no terreno pode oferecer riscos para a saúde humana (CARBONNEAU; DIETRICH, 2017). Por esse motivo, a proposta de realizar georreferenciamento direto do sensor, em aplicações fotogramétricas com VANT, vem se tornando uma alternativa, cada vez mais viável, para a obtenção de resultados mais consistentes a partir do desenvolvimento de RPAS com sensores de posição e orientação, correspondente à integração GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite) + IMU (Unidade de Medida Inercial).

Entretanto, devido ao elevado custo de uma IMU de alta precisão angular, adicionado com pequeno poder de carga (*payload*) da maioria dos VANT (GONÇALVES; HENRIQUES, 2017), o georreferenciamento direto do sensor tem sido realizado, em diversas aplicações atuais, somente com a determinação direta precisa das coordenadas tridimensionais da posição do sensor no instante da tomada da foto, por meio da integração com receptores GNSS de alta precisão, em conjunto com o conhecimento dos Parâmetros de Orientação Interior (POIs), permitindo a recuperação da geometria projetiva (STÖCKER et. al, 2017).

1.2 Estado da arte

Nos estudos realizados para obtenção de dados geoespaciais com uso do método SfM, a aquisição de imagens aéreas por meio de sensores de baixo custo acoplados à

RPAS recebeu bastante destaque para monitoramentos de questões ambientais. Nesse contexto podem ser citadas importantes pesquisas como: a análise de domos vulcânicos e do movimento da lava (JAMES; VARLEY, 2012; TUFFEN *et al.*, 2013), a quantificação de perdas de solo e da erosão em voçorocas (CASTILLO *et al.*, 2012; ELTNER *et al.*, 2015), a investigação de falhas geológicas (JOHNSON *et al.*, 2014; TAVANI; CORRADETTI; BILLI, 2016), o monitoramento de deslizamentos de terras (LUCIEER; JONG; TURNER, 2014; NIETHAMMER *et al.*, 2012), estudos de geologia estrutural (BEMIS *et al.* 2014; VASUKI *et al.*, 2014), observação de movimentos e medições glaciológicas (RYAN *et al.*, 2015; WHITEHEAD; MOORMAN; HUGENHOLTZ, 2013), entre outras.

Para as aplicações voltadas às Ciências Geodésicas e Cartográficas, os conceitos de precisão e acurácia posicional são extremamente relevantes. Desse modo, no âmbito dessas ciências, o objetivo preeminente dos estudos realizados com o método SfM consiste em buscar melhorar a exatidão dos dados espaciais obtidos por meio dessa metodologia. Para isso, estudos vêm sendo realizados para investigar as variações na distribuição e quantidade de pontos de apoio na acurácia tridimensional dos modelos tridimensionais gerados por SfM, como o de Sanz-Ablanedo *et al.* (2018) que testou 3465 combinações de pontos de apoio e verificação, iniciando com 35 combinações de 3 pontos de apoio escolhidos aleatoriamente e aumentando gradualmente até chegar à 101 pontos de apoio. Referente a mapeamento de corredores, tem-se as pesquisas de Ferrer-González *et al.* (2020) e Amorim (2020) que analisam diferentes distribuições de pontos de apoio e sua influência na exatidão tridimensional de pontos de verificação.

Outro exemplo importante da análise da qualidade posicional por meio de diferentes distribuições de pontos de apoio, é o trabalho desenvolvido por Pessoa *et al.* (2020). Para os experimentos realizados com menos de 3 pontos de apoio (0, 1 e 2 pontos), os resultados refletiram os valores de exatidão posicional horizontal e vertical fornecidos pelo fabricante do VANT de 1 a 5 metros de erro. Após a identificação e compensação de erros sistemáticos, o uso de 3 a 12 pontos de apoio resultaram em Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) planimétrica variando de 2,33 a 3 vezes o tamanho médio do pixel (*Ground Sample Distance – GSD*) de 3 cm e REMQ altimétrica entre 5 e 6 GSD.

Ainda com o objetivo de propor métodos para alcançar melhor qualidade posicional na extração de informações tridimensionais com o uso de SfM, estudos analisam a integração com outros sensores, principalmente o GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite) e IMU (Unidade de Medida Inercial), como na pesquisa de

Gabrlik *et al.* (2018) que desenvolveram um sistema multi-sensor com uma IMU de baixo custo (Ellipse-E) e um receptor GNSS-RTK para ser acoplado a um RPAS modelo S800 da DJI como intuito de determinar os POEs da câmara com mais precisão que os sensores presentes no VANT (utilizados para fins de navegação da plataforma).

Nesse contexto, entre as pesquisas mais recentes que propõem o uso da técnica SfM para realização de levantamentos fotogramétricos com RPAS integrados com sensores de posição e orientação (GNSS+IMU), uma das principais finalidades consiste em viabilizar a aplicação do georreferenciamento direto do sensor (GABRLIK *et al.*, 2018). Quanto aos estudos para posicionamento direto do sensor a partir da determinação apenas das coordenadas tridimensionais do centro de perspectiva no instante da tomada da foto, isto é, sem a utilização de informações de orientação (derivadas de IMU de baixo custo) *à priori*, destacam-se os métodos de posicionamento RTK (*Real Time Kinematic*) e PPK (*Post Processed Kinematic*) com o uso de receptores GNSS de alta precisão (STÖCKER *et. al.*, 2017).

Gerke e Przybilla (2016) realizaram um estudo com um RPAS integrado com receptor RTK-GNSS de dupla frequência em duas áreas de estudo, uma com elevada variação altimétrica na topografia e outra com terreno relativamente plano. Os experimentos foram realizados com diferentes configurações de pontos de apoio, com e sem faixas cruzadas. O georreferenciamento direto do sensor sem nenhum ponto de apoio foi empreendido apenas na área com relevo mais acidentado. Assim, o resultado referente à Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) desse experimento foi de 7,3 cm para planimetria, correspondente a 2,7 vezes e 6,7 cm (2,5 GSD) para altimetria utilizando as imagens obtidas sem as faixas cruzadas. Com a adição das imagens obtidas com as faixas cruzadas, a REMQ planimétrico foi de 4,2 cm (1,6 GSD) e altimétrico de 5,4cm (2 GSD), destacando a melhora na exatidão posicional do modelo.

Forlani *et. al.* (2018) também buscando propor metodologias para possibilitar a extração de informações tridimensionais de alta precisão com VANT com sistema RTK a bordo, realizaram 8 voos sobre um *campus* universitário. Os experimentos executados sem pontos de controle indicaram REMQ nos pontos de verificação entre 2 e 4 cm para a componente XY e 2 a 13 cm para a componente Z. No entanto, os autores destacam que, apesar dos resultados planimétricos de exatidão posicional serem da ordem de 1,2 GSD do pixel sem o uso de pontos de controle, a altimetria apresenta REMQ de 3,1 GSD, bem superior quando comparado ao referenciamento indireto realizado com 12 pontos de apoio. Ainda, Forlani *et al.* (2018) apresentam que essa tendência na componente Z muito

provavelmente ocorre porque a estimação dos POIs foi realizada pelo método de autocalibração (*self-calibration*).

Outras pesquisas, como a realizada por Ekaso, Nex e Kerle (2020), apresentaram resultados menos otimistas em termos de qualidade da extração das informações tridimensionais. Nesse estudo foi realizada a avaliação da exatidão posicional de um levantamento fotogramétrico por georreferenciamento direto, realizado com um RPAS integrado com GNSS RTK, com precisão nominal de 2-3cm segundo a empresa fabricante. A área de estudo escolhida possui dimensões de 70m x 70m, tendo sido imageada com altura de voo de 40m, em três trajetórias de voo distintas, com o tamanho médio do pixel (*Ground Sample Distance*) de 1,3 cm. O resultado referente à Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) em 8 pontos de verificação, nas três configurações de voo, variou de 30 a 60 cm tanto planimetricamente quanto na altimetria. Para fins comparativos, também foi realizado o referenciamento indireto com 4 e 5 pontos de apoio, o qual apresentou valores consideravelmente menores de REMQ, variando entre 1 e 3 cm na planimetria e até 16 cm em altimetria.

Segundo Zhou *et al.*, (2020), a calibração da câmara comumente utilizada nos programas fotogramétricos com a aplicação do SfM em dados de imagem VANT, ocorre simultaneamente ao levantamento dos dados, ou seja, os Parâmetros de Orientação Interior (POIs) e os Parâmetros de Orientação Exterior (POEs) são estimados concomitantemente e com mesmo conjunto de dados, em um processo denominado de autocalibração. As desvantagens desse método consistem majoritariamente na existência de altas correlações entre POI e POE, em especial da distância focal e distorção radial com a componente vertical Z_0 do centro de perspectiva (CP) e das coordenadas do ponto principal com as coordenadas X_0 e Y_0 do CP (ZHOU *et al.*, 2020).

Nesse sistema multi-sensor, deve ser levado em consideração que os parâmetros de montagem e a orientação interior da câmara podem sofrer variações ao longo do tempo (MITISHITA; BARRIOS; CENTENO, 2014). No caso das câmaras embarcadas em RPAS, por serem sensores de baixo-custo, possuem menor estabilidade quando comparadas a câmaras métricas. Isso significa que, durante a utilização dos RPAS, fatores como mudanças de temperatura, pequenas vibrações e colisões durante o pouso podem influenciar na posição e desalinhamento das lentes a nível micrométrico, isto é, os POIs do sensor podem variar em diferentes condições de operação (CLÉDAT; CUCCI; SKALOUD, 2020).

O principal problema da autocalibração é que as correlações entre POIs e POEs podem resultar valores de POI sem o rigor físico, acarretando somente soluções puramente locais. Nessa conjuntura, no processo de autocalibração a condição de colinearidade é reestabelecida, mas a solução pode não refletir a realidade física do sensor, pois não há garantia que as distorções na imagem sejam somente aquelas relacionadas com o processo de fabricação do sensor. Consequentemente, outros efeitos sistemáticos que afastam a condição de colinearidade podem ser absorvidos por algum parâmetro correlacionado e, eventualmente, modelar efeitos indesejáveis ao processo. Por esse motivo, apesar de ser recomendável, caso a câmara não seja estável, que o procedimento utilizado para a estimação dos POIs seja realizado em condições mais próximo de uso do sensor, como na autocalibração, as análises e controle da qualidade das medidas realizadas, assim como as precisões e exatidões obtidas no processo, não podem ser descartadas.

Nos dias de hoje, a utilização da medida direta da posição do sensor via integração GNSS e IMU em procedimentos fotogramétricos com VANT desponta-se como sendo um procedimento indispensável na extração de informações métricas ou cartográficas. Entretanto, devido à baixa resolução das IMU de baixo custo, usualmente instaladas nos RPAS comerciais, o refinamento dos POEs, por um procedimento conhecido como sendo Orientação Integrada de Sensores (ISO), não pode deixar de ser realizado. Apesar de ser um procedimento fotogramétrico bem conhecido atualmente, a análise dos parâmetros envolvendo a qualidade dos POIs, configuração do bloco, variâncias das observações e número de pontos de apoio são imprescindíveis ao processo.

Considerando esse contexto, faz-se necessário desenvolver estudos com o intuito de investigar a exatidão posicional de nuvens de pontos obtidas utilizando técnicas de calibração de câmaras prévia à aplicação do posicionamento direto do sensor com uso de RPAS integrados a GNSS-RTK de alta precisão. Desse modo, verifica-se a necessidade de realizar pesquisas que envolvam diferentes procedimentos de calibração para a estimação dos POIs de câmaras, com o intuito de alcançar alta acurácia tridimensional em nuvens de pontos obtidas por procedimento fotogramétrico empregando imagens obtidas com RPAS, refinamento dos POEs medidos diretamente e uso da técnica Orientação Integração de Sensor (ISO).

1.3 Hipótese

Como a calibração envolve a determinação dos Parâmetros de Orientação Interior, sendo alguns destes altamente correlacionados com os Parâmetros de Orientação Exterior da câmera, espera-se que a calibração *in situ* possa melhorar o resultado da fototriangulação, modelando erros sistemáticos nas observações diretas da posição do sensor e deslocamentos da condição de colinearidade.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Verificar a influência da calibração *in situ* na qualidade posicional da fototriangulação de imagens adquiridas por VANT com posicionamento direto, utilizando o método fotogramétrico *Structure from Motion* e o método fotogramétrico tradicional.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Investigar o ganho em exatidão posicional do procedimento de autocalibração com *Structure from Motion* quando se utilizam as coordenadas do Centro de Perspectiva determinadas por um receptor GNSS-PPK embarcado, em comparação com o uso do receptor GNSS de navegação do VANT.
- Analisar a influência da estimação de Parâmetros de Orientação Interior pelos métodos de calibração *in situ* e autocalibração na precisão dos Parâmetros de Orientação Exterior refinados por Orientação Integrada de Sensores.
- Avaliar o efeito da distribuição de pontos de apoio e pontos de verificação na qualidade posicional da autocalibração realizada com *Structure from Motion*.
- Investigar o efeito da utilização de Parâmetros de Orientação Interior oriundos da autocalibração e calibração *in situ* na acurácia da extração de informações métricas por Orientação Integrada de Sensores com Fotogrametria tradicional.

1.5 Justificativa

O desenvolvimento de técnicas que visam a automação de processos, redução de custo e tempo de trabalho e aumento de exatidão da extração da informação métrica, são

questos que vêm motivando as pesquisas realizadas com Fotogrametria VANT, ao longo da última década. Contudo, referente a extração de geoinformações, pesquisas realizadas mostram que a estimação de POI, empregando processos de calibração, constitui a base necessária para o aumento da qualidade posicional. Entretanto, resultados obtidos em importantes referências bibliográficas estudadas como Ekaso, Nex e Kerle (2020), bem como, em experimentos iniciais realizados nessa pesquisa, apresentaram exatidão posicional tridimensional na ordem de decímetros na extração de nuvem de pontos empregando recobrimento aéreo realizado com plataforma RPAS, com a medida direta da posição do sensor com GNSS-RTK e com estimação de POIs por autocalibração pelo procedimento fotogramétrico SfM.

Por esse motivo, justifica-se a importância deste estudo que consiste em analisar mais precisamente o comportamento dos Parâmetros de Orientação Interior, determinados por diferentes métodos de calibração (autocalibração em trabalho e calibração *in situ* com uso de sub-blocos), de uma câmara digital de baixo custo, instalada numa plataforma VANT com medidas diretas das coordenadas do CP. Portanto, a contribuição da referente pesquisa consiste em analisar procedimentos de calibração visando aumentar a exatidão da extração de informações espaciais tridimensionais na Fotogrametria com uso da plataforma RPAS e observações direta da posição do sensor.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Orientação Direta do Sensor

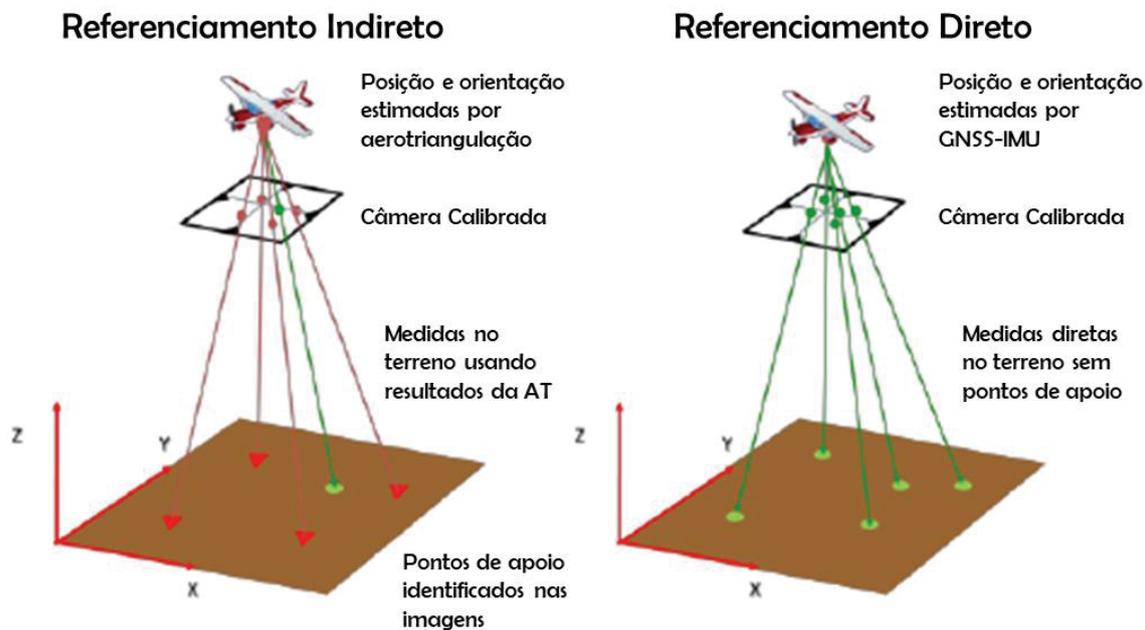
Na Aerofotogrametria, a orientação direta do sensor, ou georreferenciamento direto (*Direct Georeferencing* – DG), consiste na determinação da posição e atitude angular do Centro de Perspectiva no instante de tomada das fotos por meio de medidas diretas com sensores GNSS e IMU aerotransportados. Desse modo, para determinação dos Parâmetros de Orientação Exterior não é necessária nenhuma informação presente na imagem, como medidas de fotocoordenadas de pontos de ligação (*tie points*), nem a realização de apoio terrestre para a observação de coordenadas de pontos de apoio (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

O georreferenciamento direto em levantamentos aéreos só passou a ser possível por conta do advento de sistemas fotogramétricos com a integração de GNSS e IMU. Os sensores GNSS possibilitam a observação mais precisa da velocidade e posição absoluta da plataforma, mas possuem menor precisão na determinação da posição relativa, visto que a frequência de observações por segundo varia de 1-10 Hz. Em contrapartida, os sensores inerciais têm alta precisão relativa, permitindo medidas da posição e orientação com frequência de cerca de 200 Hz, garantindo que os valores de POEs para o instante de tomada das fotos sejam interpolados com maior exatidão (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014). O principal problema da IMU é que as observações são relacionadas a um valor inicial, de modo que erros sistemáticos e aleatórios se acumulam e a precisão absoluta diminui ao longo do tempo. Como o GNSS permite que a posição absoluta do sistema seja atualizada, na integração de IMU e GNSS esses sensores atuam de forma complementar e viabilizam a redução dos erros nas medidas diretas dos POEs do sensor (HABIB; KERSTING; BANG, 2010; WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

Segundo Jacobsen (2004), o ajustamento do bloco de imagens por Referenciamento Indireto, também denominado de Fototriangulação Analítica ou Ajustamento por feixes de raio (*Bundle Block Adjustment* – BBA) pode ser considerado uma interpolação dentro de uma área delimitada por pontos de apoio. Nesse caso, a interseção nos pontos de apoio é inicialmente fixada (por injunção absoluta ou relativa) e a Orientação Exterior do Sensor é calculada de maneira a melhor se ajustar aos pontos de coordenadas conhecidas no terreno. No georreferenciamento direto, por outro lado, ocorre a extrapolação do CP para o terreno, de forma que as coordenadas no referencial do espaço-objeto são estimadas por uma simples interseção a partir dos POEs medidos

diretamente (HABIB; KERSTING; BANG, 2010). Essas diferenças são ilustradas na Figura 1.

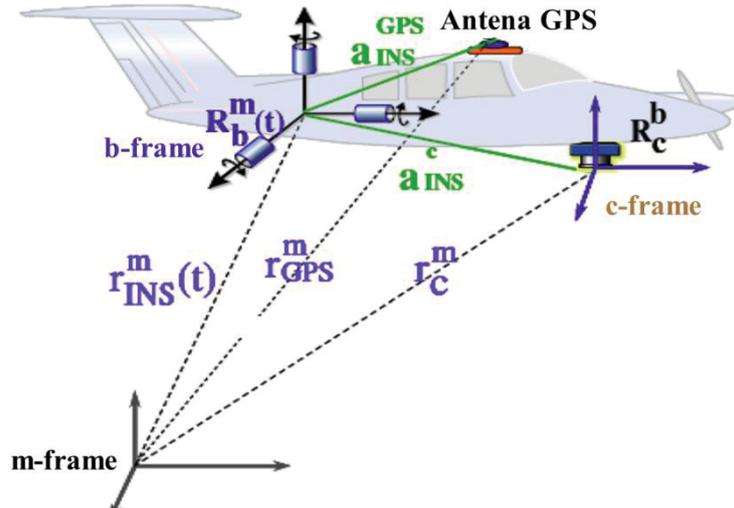
Figura 1 – Principais diferenças entre referenciamento indireto e direto do sensor



Fonte: Adaptado de MIAN *et al.* (2015)

Como o DG requer um sistema fotogramétrico multi-sensor (Figura 2) para viabilizar a medida da orientação e posição do sensor no instante de tomada das fotos, é necessário que seja realizada uma calibração desse sistema. Esse processo envolve a calibração dos sensores de modo independente, como a compensação da altura da antena GNSS e a estimação dos Parâmetros de Orientação Interior da câmara, bem como da relação entre eles, como a correção dos erros de sincronização do tempo, a definição do vetor de deslocamento entre a antena GNSS e a IMU e a determinação do vetor de deslocamento linear (*lever arm*) e do desalinhamento angular (*boresight*) entre a IMU e a câmara (YASTIKLI; JACOBSEN, 2005).

Figura 2 – Sistema fotogramétrico multi-sensor para georreferenciamento direto



Fonte: CHIANG; TSAI; CHU (2012)

Assim, para determinar diretamente as coordenadas do CP (X_0, Y_0, Z_0) no referencial de mapeamento e a orientação (ω, φ, κ) do sensor, ambos no instante (t) de tomada das fotos, é necessário conhecer os denominados parâmetros de montagem, que correspondem ao vetor *lever arm* ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) e os ângulos de *boresight* ($\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa$). Considerando que o processo de integração da IMU com o GNSS foi realizado previamente, os POEs da câmara podem ser obtidos conforme a Equação 1 E.

$$\vec{r}_c^m(t) = \vec{r}_b^m(t) + \lambda_b^m * R_b^m(t) * \vec{r}_c^b \quad (1)$$

$$R_c^m(t) = R_b^m(t) * R_c^b$$

no qual:

m: Referencial geodésico ou de mapeamento;

b: Referencial da IMU;

c: Referencial fotogramétrico;

$\vec{r}_c^m(t)$: Posição da câmara no instante (t) no referencial geodésico;

$\vec{r}_b^m(t)$: Posição da plataforma no instante (t) no referencial geodésico;

\vec{r}_c^b : Posição da câmara em relação à IMU (*lever arm*);

λ_b^m : Fator de escala entre o referencial geodésico e o referencial da IMU;

$R_c^m(t)$: Matriz de rotação da câmara no instante (t) no referencial geodésico;

$R_b^m(t)$: Matriz de rotação da plataforma no referencial geodésico;

R_c^b : Matriz de rotação da câmara em relação à IMU (*boresight*).

De acordo com Yastikli e Jacobsen (2005), a determinação do vetor *lever arm* pode ser realizada facilmente com medidas diretas por métodos de levantamento topográficos. Por outro lado, a estimação do desalinhamento angular entre a IMU e a

câmara é mais complexa porque esses valores não podem ser observados diretamente. Para que seja possível obter os ângulos de *boresight*, deve ser realizada uma comparação entre a orientação direta medida pelos sensores IMU e GNSS aerotransportados e os ângulos de orientação resultantes de um BBA realizado em um campo de prova, isto é, de um referenciamento indireto em uma área com grande densidade de pontos de apoio. Alternativamente, o *lever-arm* também pode ser calculado por um processo analítico, considerando a discrepância entre as observações diretas de posição resultantes da integração GNSS e IMU e a coordenadas do centro de perspectiva estimadas por ajustamento de feixes de raio. A Equação 2 apresenta o modelo matemático para obter o vetor *lever arm* (r_c^b) e os ângulos de *boresight* (R_c^b).

$$\vec{r}_c^b = (R_b^m(t))^{-1}(\vec{r}_c^m(t) - \vec{r}_b^m(t)) \quad (2)$$

$$R_c^b = R_c^m(t)(R_b^m(t))^{-1}$$

Após a determinação dos Parâmetros de Orientação Exterior (POEs), para que seja possível realizar a interseção fotogramétrica, com uso de referenciamento direto, faz-se necessário conhecer a geometria de formação da imagem no sensor. Para isso, os Parâmetros de Orientação Interior (POIs) da câmara devem ser obtidos por meio de um processo de calibração (HABIB; KERSTING; BANG, 2010). No georreferenciamento direto, a calibração de câmaras exerce um papel mais importante que no referenciamento indireto. Isto ocorre porque, na fototriangulação, erros na determinação dos POIs são parcialmente absorvidos na estimação dos POEs por ajustamento de feixes de raios, devido à alta correlação desses parâmetros (HABIB; KERSTING; BANG, 2010). Desse modo, a reconstrução precisa do espaço-objeto é garantida mesmo quando existem erros na calibração da câmara. No caso do referenciamento direto, erros no processo de obtenção dos POIs não podem ser compensados pelos POEs, portanto, são propagados para as coordenadas tridimensionais dos pontos no espaço-objeto, diminuindo a exatidão da interseção fotogramétrica (HABIB; KERSTING; BANG, 2010).

Nesse sentido, por ser um processo de extrapolação, o referenciamento direto é sensível às mudanças na geometria do sensor e nos parâmetros de montagem. Além disso, a qualidade do georreferenciamento direto também depende das características dos sensores aerotransportados, visto que os erros de calibração e de medida são propagados

para o espaço-objeto. Portanto, dentre os fatores que podem limitar a precisão da extração de informações métricas por referenciamento direto, destacam-se a qualidade e estabilidade da calibração da câmara e da calibração do sistema fotogramétrico, da precisão dos dados GNSS, da integração IMU+GNSS e da frequência de coleta de dados da IMU utilizada (HABIB; KERSTING; BANG, 2010).

A principal vantagem do georreferenciamento direto reside no fato de não ser necessário coletar coordenadas de pontos de apoio em campo, por levantamentos geodésicos ou topográficos. Esse processo possibilita economia de tempo e custos financeiros, considerando que em certas situações a realização de medidas de pontos de apoio fora da zona urbana pode ser relativamente difícil, como em áreas montanhosas, com vegetação densa ou em zonas glaciais. Além disso, em locais com deslizamento de terras, atividades vulcânicas, ocorrência de incêndios ou em desastres naturais, a etapa de campo pode oferecer riscos à saúde humana. Assim, nesses casos o levantamento fotogramétrico pode ser executado de forma mais segura e econômica por meio do referenciamento direto (CARBONNEAU; DIETRICH, 2017; FORLANI *et al.*, 2018; GABRLIK; JELINEK; JANATA, 2016).

Em contrapartida, as desvantagens do georreferenciamento direto estão relacionadas majoritariamente à menor confiabilidade das medidas no espaço-objeto realizadas por meio dessa metodologia. Assim, a exatidão na extração de coordenadas tridimensionais é comprometida por causa das dificuldades de realizar a integração dos três sensores (GNSS, IMU e câmara), da possibilidade de perdas de ciclo ou efeitos de multi-caminho acarretarem em erros no posicionamento GNSS, entre outros fatores que possam afetar a precisão da estimação dos POEs ou a qualidade da calibração do sistema fotogramétrico (KRAUS, 2007; JACOBSEN, 2004; FORLANI *et al.*, 2018). Por esse motivo, normalmente o uso de DG não é recomendado em aplicações fotogramétricas que exigem alta precisão na determinação de coordenadas tridimensionais de pontos no referencial geodésico (KRAUS, 2007; JACOBSEN, 2004; FORLANI *et al.*, 2018).

Para melhorar a determinação dos POEs quando a qualidade das observações com georreferenciamento direto não atendem à precisão necessária para aplicações fotogramétricas, pode ser utilizada uma metodologia que inclua as medidas diretas dos POEs e de fotocoordenadas de pontos de ligação em um único ajustamento (JACOBSEN, 2004; MITISHITA *et al.*, 2016). Esse método é denominado Orientação Integrada de Sensores (*Integrated Sensor Orientation - ISO*), ou Aertotriangulação Assistida (*Assisted Aerial Triangulation - AAT*), e consiste em adicionar na Fototriangulação tradicional

observações de posição do sensor (determinadas por GNSS aerotransportado) ou de posição e orientação (obtidas pela integração GNSS+IMU) (CHIANG; TSAI; CHU, 2012; KRAUS, 2007; TURNER; LUCIEER; WALLACE, 2014).

Conforme Habib, Kersting e Bang (2010), o processo de ISO pode ser realizado segundo dois modelos matemáticos. No primeiro as observações diretas são adicionadas como equações de injunção (Equações 3) no ajustamento por feixes de raio. No segundo (Equação 4), os POEs determinados pelos sensores GNSS+IMU são incluídos diretamente nas equações de colinearidade.

$$\vec{r}_b^m(t) = \vec{r}_c^m(t) + R_b^m(t) * \vec{r}_c^b \quad (3)$$

$$R_b^m(t) = R_c^m(t) * (R_c^b)^{-1}$$

$$\vec{r}_i^m = \vec{r}_b^m(t) + R_b^m(t) * R_c^b * (\lambda * \begin{bmatrix} x - x_0 - dist_x \\ y - y_0 - dist_y \\ -c \end{bmatrix} - \vec{r}_c^b) \quad (4)$$

Na qual:

\vec{r}_i^m : Posição de um ponto no referencial geodésico ou de mapeamento;

λ : Fator de escala que pode ser determinado pela sobreposição de imagens no BBA;

x_0, y_0 : Coordenadas do ponto principal;

c : Distância focal;

$dist_x, dist_y$: Distorção de lentes nas componentes x e y.

De modo geral, o uso de Orientação Integrada de Sensores permite refinar os POEs obtidos por referenciamento direto, bem como reduzir o número de pontos de apoio e pontos de ligação (*tie points*) necessários no referenciamento indireto, isto é, inclui as vantagens dos dois métodos (IP, 2005). Nesse sentido, o Quadro 1 resume as vantagens e desvantagens das técnicas para determinar a posição e orientação do sensor em levantamentos fotogramétricos.

Quadro 1 – Principais vantagens e desvantagens dos métodos para orientação do sensor

Metodologia	Vantagens	Desvantagens
Georreferenciamento direto	<ul style="list-style-type: none"> -Não é necessário realizar BBA (exceto para calibração do sistema) -Não é necessário apoio terrestre (exceto para controle de qualidade) -Permite a orientação de uma única foto, corredores e mapeamento de áreas remotas 	<ul style="list-style-type: none"> -Precisão da posição é limitada pela solução GNSS adotada -Recomenda-se GNSS/IMU de alta precisão -Aumenta o custo do sistema fotogramétrico -Requer determinação precisa de parâmetros de calibração do sistema
Referenciamento Indireto	<ul style="list-style-type: none"> -Solução redundante usando pontos de apoio -Solução robusta que reduz os efeitos de erros nos POIs -Melhor precisão na interseção fotogramétrica 	<ul style="list-style-type: none"> -Requer pontos de apoio bem distribuídos -Requer medidas fotogramétricas em pontos de ligação -Requer realização de BBA -Maiores custos operacionais
Orientação Integrada de Sensores	<ul style="list-style-type: none"> -Combina as vantagens do georreferenciamento direto e indireto -Possibilidade de utilizar sistema GNSS/IMU menos preciso 	<ul style="list-style-type: none"> -Requer medidas fotogramétricas em pontos de ligação -Requer realização de BBA -Pode exigir pontos de apoio

Fonte: Adaptado de IP (2005)

2.2 Calibração de Câmaras

Segundo Eisenhart (1963), o ato de medir consiste em atribuir números para representar características específicas que existem entre objetos (comprimento, altura, massa, etc.), como forma de quantificar quanto dessa propriedade o objeto possui. Assim, a calibração de equipamentos pode ser descrita como uma forma refinada de realizar medições, visto que seu propósito consiste em definir a imprecisão inerente ao instrumento na determinação de certa característica do objeto.

Ainda conforme as explanações de Eisenhart (1963), o processo de calibração deve atender a três condições principais:

- O método de medição deve ser definido apresentando todas as características possíveis em que será realizado, incluindo: a definição dos instrumentos que serão utilizados, as etapas do processo e em que ordem e sob quais condições serão executadas.
- A calibração requer um controle estatístico nas observações executadas para permitir estabelecer seu grau de confiabilidade.
- Todo o sistema de mensuração deve ser calibrado, por isso o processo de calibração deve ser desempenhado nas condições mais próximas possíveis das condições de uso do equipamento.

Na Fotogrametria, a calibração dos sensores é necessária para assegurar a confiabilidade das informações métricas de objetos extraídas a partir imagens ou padrões de energia eletromagnética. Referindo-se mais especificamente às câmaras, a calibração desses instrumentos tem o objetivo de estimar os parâmetros necessários para recuperar a geometria de formação da imagem no instante da exposição aos feixes de luz refletidos na superfície fotografada, denominados Parâmetros de Orientação Interior (POIs) (ANDRADE, 2003). Assim, os principais POIs que podem ser determinados por meio da calibração de câmaras são (WOLF, 1983): distância focal, distorção radial das lentes, distorção tangencial (ou descentrada), coordenadas do ponto principal e parâmetros de afinidade do sensor. Esses últimos, referem-se ao alinhamento e espaçamento entre as linhas e colunas do sensor, entretanto, para o caso de câmaras digitais de baixo-custo, como o tamanho do pixel é micrométrico, muitos autores não consideram esses parâmetros por causa da sua pequena magnitude.

De maneira generalizada, a abordagem da maioria dos métodos de calibração consiste em fotografar um conjunto de pontos cuja posição relativa é conhecida com alta precisão. Entretanto, existem diversas particularidades nas metodologias para realizar a

calibração de câmaras, sendo subdivididos em dois grupos principais denominados métodos de laboratório e de campo. No período da Fotogrametria Analógica, a calibração era realizada apenas pelas empresas que fabricavam as câmaras métricas tradicionais, por meio dos chamados Métodos de Laboratório. Para a execução desses métodos, eram usados instrumentos como goniômetros e multicolimadores, que buscavam descrever os aspectos físicos da formação da imagem no sensor (WOLF, 1983). Entretanto, uma das principais desvantagens dessa técnica é que as condições de uso em laboratório eram bem diferentes das circunstâncias do uso normal das câmaras pelos usuários.

Com o desenvolvimento da Fotogrametria Analítica, que ocasionou a migração de equipamentos analógicos para equipamentos ligados a um computador, surgiram as possibilidades de realizar calibrações de câmaras por processos matemáticos. Assim, os métodos analíticos possibilitaram que a estimação dos POIs fosse realizada por meio do Ajustamento de Blocos (*Bundle Block Adjustment* – BBA) com parâmetros adicionais. Por isso, o processo de calibração tornou-se viável de ser executado pelos usuários das câmaras e nas condições de uso do equipamento (KRAUS, 2007).

As desvantagens desse método estão relacionadas às altas correlações existentes entre os POIs e POEs quando a orientação exterior e a calibração são realizadas matematicamente no mesmo ajustamento, principalmente entre a posição do sensor (X_0 , Y_0 , Z_0), distância focal (c) e coordenadas do ponto principal (x_0 , y_0). Além disso, altas correlações também são presentes entre os POIs, como a correlação entre a distância focal e os coeficientes de distorção radial simétrica e entre as coordenadas do PP e os coeficientes de distorção descentrada. Assim, para reduzir a correlação desses parâmetros, é necessário fornecer uma informação de escala ao longo da direção do eixo óptico (LUHMANN *et al.*, 2006).

Devido a essas correlações, o reestabelecimento da condição de colinearidade pode ser puramente local e não refletir os aspectos físicos da formação da imagem no sensor, de modo que outros erros sistemáticos que afastam a condição de colinearidade do raio de luz podem ser modelados de maneira indesejada. Por isso, no caso da realização de calibrações com métodos de campo, destaca-se a necessidade de realizar a análise da precisão e exatidão e um controle de qualidade rigoroso (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

2.2.1 Métodos de Campo

Como discutido anteriormente, o objetivo de calibrar uma câmara utilizada para trabalhos fotogramétricos consiste em permitir recuperar a geometria de formação da imagem de modo a reestabelecer a condição de colinearidade do feixe de luz que passa pelo Centro de Perspectiva (CP), por um ponto no espaço-imagem e pelo ponto correspondente no espaço-objeto (ANDRADE, 2003). Assim, as equações de colinearidade são concebidas inicialmente considerando que essa condição de colinearidade do raio já está devidamente definida, portanto, essas equações possibilitam relacionar as coordenadas fotogramétricas dos pontos na imagem com suas coordenadas em um referencial geodésico ou cartográfico tridimensional. Por isso, no modelo matemático do BBA tradicional, as coordenadas observadas nas fotos devem estar no referencial fotogramétrico sem distorções para serem aplicadas nas equações de colinearidade, isto é, já devidamente corrigidas das condições que afastam o raio de luz de ser projetado linearmente, tais como distorções de lentes, deslocamentos do ponto principal e refração atmosférica (ANDRADE, 1998).

No entanto, a calibração por métodos analíticos consiste em um processo fotogramétrico no qual os Parâmetros de Orientação Interior são incluídos no BBA como parâmetros a serem estimados, nesse caso as coordenadas no espaço-imagem devem estar sem correção das distorções. Para isso, o modelo matemático mais aceito e mais utilizado na Fotogrametria é o proposto por Brown (1971), considerando as distorções de lentes conforme apresentadas por Conrady (1919). Assim, são adicionados 8 parâmetros nas equações de colinearidade, correspondentes aos POIs da câmara, sendo: distância focal (c), coordenadas do ponto principal (x_0, y_0), coeficientes de distorção radial simétrica (k_1, k_2, k_3) e de distorção descentrada (p_1 e p_2). Esse modelo é apresentado na Equação 5.

$$x = -c \frac{m_{11}(X-X_0)+m_{12}(Y-Y_0)+m_{13}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0)+m_{32}(Y-Y_0)+m_{33}(Z-Z_0)} + x_0 + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)(x - x_0) + p_1(r^2 + 2(x - x_0)^2) + 2p_2(x - x_0)(y - y_0) \quad (5)$$

$$y = -c \frac{m_{21}(X-X_0)+m_{22}(Y-Y_0)+m_{23}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0)+m_{32}(Y-Y_0)+m_{33}(Z-Z_0)} + x_0 + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)(y - y_0) + 2p_1(x - x_0)(y - y_0) + p_2(r^2 + 2(y - y_0)^2)$$

na qual:

x, y : Coordenadas com distorção medidas no referencial do espaço-imagem;
 X, Y, Z : Coordenadas no referencial do espaço-objeto;

$X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$: Parâmetros de Orientação Exterior;
 m_{ij} : Elementos da matriz de rotação ($R(\kappa)R(\omega)R(\omega)$).

Todavia, com a inclusão desses parâmetros adicionais, deve-se ter o cuidado de garantir que seja possível realizar a determinação simultânea de POEs e POIs. É importante perceber que, para fotos verticais de terrenos planos, a diferença entre a posição vertical do sensor (Z_0) e a altitude do ponto (Z) torna-se constante, ou seja, a altura de voo é invariante nas imagens tomadas. O principal problema que surge nessa situação é a ocorrência de dependência linear entre os POEs e POIs referentes às coordenadas do CP (X_0, Y_0, Z_0), coordenadas do ponto principal (x_0, y_0) e distância focal (c), inviabilizando a solução matemática de todos esses parâmetros em um mesmo modelo matemático (ANDRADE, 1998; WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

Para contornar essa questão e quebrar a dependência linear desses parâmetros, permitindo a realização da calibração analítica por meio das equações de colinearidade com parâmetros adicionais, é necessário fornecer uma informação de escala ao longo da direção do eixo óptico. Essa escala pode ser definida por diferentes estratégias, como: tomada de fotos oblíquas, aquisição de imagens com diferentes alturas de voo e utilização de campo de prova com grandes variações de profundidade entre os pontos de apoio (LUHMANN *et al.*, 2006). Outra alternativa para quebrar a dependência linear consiste em realizar medidas diretas da posição e orientação da câmara no instante de tomada das fotos, com sensores GNSS+IMU. Assim, os POEs podem ser injuncionados no ajustamento a partir dessas observações, de modo que os POEs são apenas refinados no BBA e somente os POIs e as coordenadas tridimensionais dos pontos fotogramétricos passem a ser estimados analiticamente (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

Tendo isto em vista, a partir das equações de colinearidade com parâmetros adicionais, a calibração pode ser realizada por procedimentos de calibração em campo de teste, calibração *in situ* e autocalibração. Apesar de serem realizadas com o mesmo modelo matemático, existem diferenças conceituais e metodológicas entre esses tipos de calibração que serão brevemente descritas neste estudo.

Segundo Kraus (2007), a calibração em campos de teste consiste em um processo com aquisição de imagens de uma região com alta densidade de pontos de apoio cujas coordenadas tridimensionais são conhecidas, no referencial do espaço-objeto, com alta precisão. Com as medidas de coordenadas fotogramétricas dos pontos de apoio e suas

respectivas coordenadas obtidas em campo, POEs e POIs podem ser determinados no mesmo BBA, bem como as coordenadas dos pontos de apoio ajustadas.

Em termos de especificidades nos procedimentos operacionais, existem diversos tipos de metodologia por métodos com campo de teste proposta em literatura, como a calibração com câmaras convergentes (BROWN, 1971) e a calibração dos campos misturados (MERCHANT, 1972 *apud* ANDRADE, 1998). Em geral, o que essas metodologias possuem em comum é a proposição de reduzir a correlação entre os parâmetros, permitindo que os POIs estimados reflitam os aspectos físicos da formação da imagem no sensor. Para a utilização da calibração analítica em campo de prova, assume-se que os POIs permanecem os mesmos entre o instante de calibração da câmara e de aquisição de fotos para o levantamento fotogramétrico, isto é, são considerados como estáveis ao longo do tempo. Assim, os POIs determinados em campo de teste são considerados como fixos no ajustamento para extração de informações métricas. Por esse motivo é importante que esses POIs estimados possuam significado físico (KRAUS, 2007).

A calibração *in situ*, consiste em um método que envolve o uso de imagens de um campo de prova tomadas no mesmo local do levantamento fotogramétrico. Nesse caso, para que seja realizada nas mesmas condições de uso do sensor, preferencialmente as fotos do campo de prova devem ser obtidas no mesmo dia e mesmo voo aerofotogramétrico. Posteriormente, o sub-bloco que compõe o conjunto de imagens do campo de prova é usado para calcular os POIs por meio do BBA. Esse sub-bloco pode estar localizado próximo à região levantada ou no interior dessa área, considerando qual o local que oferece melhores condições para implantação de pontos de apoio (MITISHITA, *et al*, 2012).

No caso da calibração em trabalho, ou autocalibração, a execução é bem semelhante à calibração *in situ*. A diferença essencial entre estas metodologias é que a autocalibração faz uso dos mesmos dados que são usados para realizar a extração de informações métricas do objeto. Desse modo, em um mesmo ajustamento por feixes de raio é realizada a orientação exterior (POEs), a calibração de câmaras (POIs) e a determinação de coordenadas tridimensionais (X, Y, Z) de pontos homólogos medidos nas imagens. Tanto na calibração *in situ* como na calibração em trabalho é importante que também sejam utilizadas medidas nos pontos de ligação (*tie points*), com o intuito de melhorar a conexão entre as fotos e de permitir uma distribuição de pontos em todas as regiões do sensor e, portanto, modelar as distorções das lentes (LUHMANN *et al*, 2006).

2.2.2 Métodos de Tsai e Zhang

Além do modelo matemático utilizando as equações de colinearidade com parâmetros adicionais, existem dois modelos amplamente utilizados para calibração de câmaras em aplicações fotogramétricas, os métodos propostos por Tsai (1987) e Zhang (2000).

Segundo Galo (1993), o método de Tsai é subdividido em duas etapas que possibilitam a estimação precisa e em tempo real dos parâmetros de orientação interior e exterior da câmara por meio de campo de testes coplanares. Nesse modelo, os POIs considerados são: a distância focal (c), as coordenadas do centro principal (x_0, y_0), o coeficiente de distorção radial simétrica (k) e o fator de escala (S). A primeira etapa desse modelo consiste na solução dos parâmetros de translação nas coordenadas planimétricas X e Y e dos cossenos diretores da matriz de rotação, referente à orientação do sensor. Para isso deve ser incluída no modelo matemático uma equação de injunção que estabeleça a ortogonalidade da matriz de rotação. Posteriormente, a segunda fase da calibração consiste em determinar a distância focal, o produto entre a distância focal e o coeficiente de distorção radial e a translação em Z . Para realizar essas duas etapas, é necessário o conhecimento prévio do fator de escala e das coordenadas do ponto principal, os quais podem ser estimados por uma pré-calibração.

Para o modelo de Zhang (2000) é necessário que sejam obtidas no mínimo duas imagens, com diferentes orientações, de um campo de teste plano. Assim, o padrão a ser utilizado como campo de teste para calibração pode ser impresso por uma impressora laser e fixado a uma superfície relativamente plana, como uma parede ou mesmo a capa de um livro. O processo de aquisição das imagens pode ser realizado com o movimento da câmara ou da superfície plana, mas não é preciso ter o conhecimento do movimento relativo entre as fotos. Posteriormente, os parâmetros de orientação interior são modelados considerando que são invariáveis entre as imagens. O procedimento proposto consiste em uma solução analítica seguida por uma otimização não-linear. Desse modo, o método de Zhang usa o modelo pinhole é considerado um método de calibração flexível e robusto. Além disso, possui um modelo de distorção radial simétrica mais complexo que o método de Tsai, permitindo obter resultados mais acurados (LI *et al.*, 2014). No entanto, conforme Li *et al.* (2014), a calibração de Zhang requer no mínimo 11 imagens para alcançar precisão menor que o pixel.

2.3 Structure from Motion

A técnica para extração de informações espaciais por meio de imagens denominada *Structure from Motion* foi inicialmente proposta por Ullman (1979), estudioso da área de Visão Computacional. Ao longo das décadas seguintes, devido aos avanços tecnológicos na Fotogrametria Digital, no Processamento de Imagens e na Visão Computacional, foi possível desenvolver o SfM como um método para obter informações tridimensionais de superfícies, a partir de imagens, sem a necessidade de conhecer *à priori* a orientação e posição da câmara nem coordenadas tridimensionais de pontos no espaço-objeto (WESTOBY, 2012).

Conforme Fonstad (2013), o SfM foi inicialmente concebido como um método rápido e relativamente econômico quando comparado com a Fotogrametria tradicional. Além disso, o uso da técnica SfM passou a ser amplamente difundido por conta do alto grau de automatização do processo, que conta com algoritmos de detecção de feições, como o SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) desenvolvido por Lowe (2004), capazes de identificar pontos homólogos mesmo em imagens com grandes variações de escala, rotação e iluminação.

Outro fator que impulsionou a utilização do SfM, especialmente para aplicações nas Engenharias, foi o desenvolvimento de plataformas aéreas de baixo custo, em especial o Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). No caso de imagens aéreas adquiridas com uso de VANT, como são plataformas menos estáveis que as aeronaves tripuladas utilizadas na Fotogrametria tradicional, o conjunto de fotos obtidos apresentam maiores variações angulares e de rotações. Outro fator importante é que as fotos com RPAs são adquiridas com altura de voo consideravelmente inferior do que na Fotogrametria convencional, normalmente variando entre dezenas e poucas centenas de metros, de modo que apresentam características similares a aplicações de Fotogrametria à curta distância, como maiores distorções nas perspectivas das imagens, bem como grandes variações de iluminação e escala das fotos. Por conta dessas características, a metodologia SfM é mais aplicável para imagens obtidas com VANTs (ELTNER *et al.*, 2015; TURNER; LUCIEER; WATSON, 2012).

Apesar das vantagens do SfM, deve-se destacar que, como esse método foi desenvolvido com o principal objetivo de extrair informações tridimensionais de imagens com alto nível de automatização, a busca por precisão métrica e controle de qualidade não estava entre os objetivos principais no seu processo de desenvolvimento. Por esse motivo, é necessário maior cuidado para assegurar a exatidão posicional da nuvem de

pontos gerada com SfM, visto que na maioria das implementações o fluxo de trabalho muito direto e que não apresentam resultados intermediários, como os resíduos das medidas fotogramétricas nos pontos homólogos, pode esconder erros que venham a prejudicar a qualidade dos produtos obtidos com SfM (BEMIS *et al.*, 2014; FORLANI *et al.*, 2018).

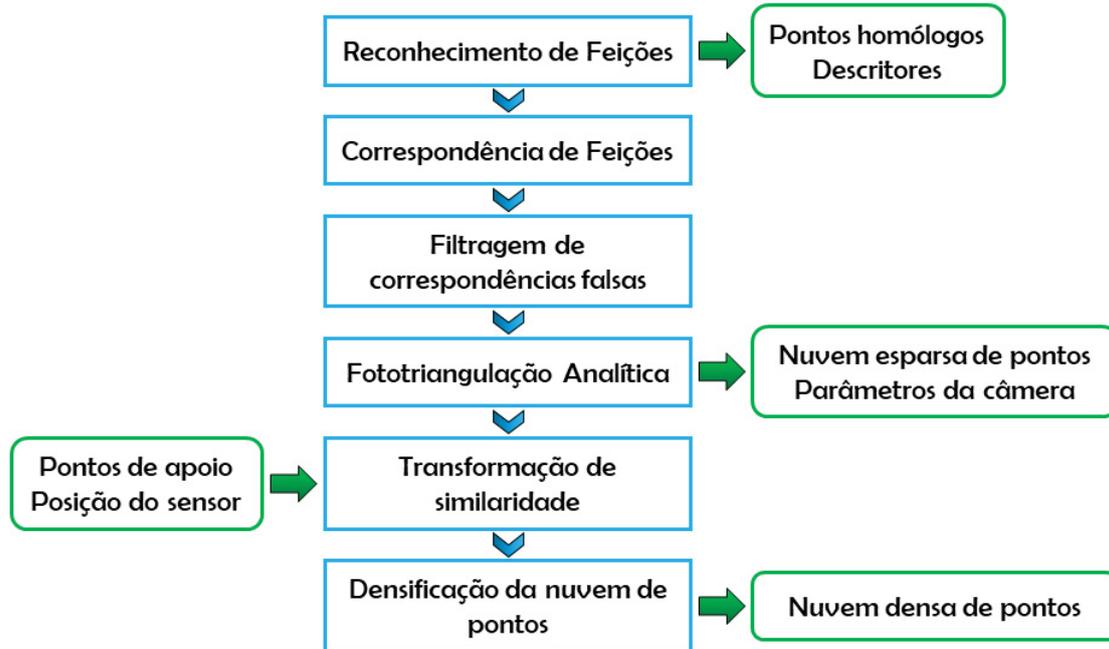
2.3.1 Etapas de processamento

A terminologia *Structure from Motion* é normalmente utilizada para descrever todo o processo de reconstrução tridimensional, desde a etapa de identificação de feições à nuvem de pontos densa. Entretanto, o SfM consiste apenas na parte específica em que são estimados os parâmetros da câmara e a nuvem esparsa de pontos. Apesar de ser possível utilizar esses pontos como produto final, normalmente para aplicações nas Engenharias e Ciências Geodésicas e Cartográficas, essa nuvem de pontos esparsa é densificada com uso de algoritmos de *Multi-View Stereo* (MVS), de modo que o processo como um todo pode ser denominado de SfM-MVS (IGLHAUT, 2019)

Existem diversas ferramentas para reconstrução tridimensional baseada em imagens com o uso do método SfM-MVS, visto que possui implementação em serviços online, como o MicMac (MICMAC, 2017), em programas gratuitos de código aberto como o SFMToolkit (ASTRE, 2010), o VisualSfM (WU, 2021) e o 3DF Samantha (3DFLOW, 2021), e em *softwares* comerciais como o Agisoft Metashape (AGISFOT, 2021) e o Pix4d (PIX4D, 2021). Assim, as etapas e algoritmos de processamento dos dados com SfM-MVS geralmente variam conforme os programas utilizados, contudo conservando aspectos fundamentais entre si que norteiam o fluxo de trabalho a ser seguido (BEMIS *et al.*, 2014; STUMPF *et al.*, 2014). Os principais passos a serem realizados, bem como os produtos gerados com a aplicação do SfM-MVS são representados no fluxograma da Figura 3.

A primeira etapa de processamento consiste na identificação de feições em cada imagem. Para isso, foram desenvolvidos diversos detectores de regiões, como o SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) por Lowe (1999, 2004), SURF (*Speeded-Up Robust Features*) por Bay *et al.* (2008), BRIEF (*Binary Robust Independent Elementary Features*) por Calonder *et al.* (2010), entre outros. No entanto, por ser consideravelmente robusto a variações na escala, na rotação das imagens e parcialmente na iluminação, o SIFT é o algoritmo mais utilizado nas implementações do SfM-MVS (WESTOBY, 2012).

Figura 3 – Fluxo de trabalho padrão do SfM-MVS



Fonte: Autora (2021)

O SIFT pode ser subdividido em 4 passos: detecção de bordas e quinas, localização de pontos notáveis (*keypoints*) nas quinas/bordas, atribuição de orientação e descritor dos pontos notáveis. (LOWE, 2004). Para uma descrição mais detalhada dos processos realizados no SIFT, recomenda-se a leitura de Lowe (1999) e Lowe (2004).

Com os descritores dos *keypoints* em cada imagem provenientes do SIFT, torna-se possível realizar a etapa seguinte do fluxo de trabalho do SfM-MVS que consiste na correspondência de feições homólogas. Existem diversas técnicas que podem ser utilizadas para essa etapa, como árvores de decisão k-dimensionais (*k-d-trees*), mas Lowe (2004) propõe o método de vizinho mais próximo usando distância Euclidiana para definir a correspondência mais provável de ser a correta. Para reduzir possíveis erros nesse processo, a correspondência é descartada se a distância entre os dois vizinhos mais próximos for suficientemente pequena, considerando um limiar definido. Isto é, quando a distância para os dois *keypoints* mais próximos na outra imagem for inferior a este limiar, considera-se uma ambiguidade na solução e a correspondência é descartada.

Apesar do processo anterior reduzir a ocorrência de falsas correspondências, ainda é necessário realizar uma filtragem por meio de um processo de identificação das correspondências consistentes geometricamente. Essa etapa deve ser executada considerando que correspondências detectadas de forma incorreta são erros grosseiros (*outliers*), que se não forem removidos podem afetar de forma expressiva os parâmetros

calculados pelo *Bundle Adjustment*, visto que o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) é sensível à *outliers*. Por isso, é importante que um estimador estatístico mais robusto seja utilizado inicialmente, como a Menor Mediana dos Quadrados dos Resíduos (ROUSSEEUW, 1984) ou o *Random Sample Consensus* (RANSAC) proposto por Fischler e Bolles (1980). Ambos apresentam bons resultados para dados com até 50% de *outliers*, mas o RANSAC costuma ser o método mais usado para eliminação de falsas correspondências de pontos homólogos nas aplicações, com SfM-MVS, por ser um processamento relativamente rápido e possuir alta acurácia.

Em seguida, pode-se dar início à reconstrução tridimensional da superfície e à estimação dos POEs da câmara na etapa do SfM propriamente dito. O objetivo do SfM consiste em solucionar a estrutura tridimensional de um objeto sem que haja inicialmente o conhecimento de coordenadas 3D de pontos no espaço-objeto nem dos POEs do sensor no instante de tomada das fotos. Assim, quando não há nenhuma informação tridimensional do espaço-objeto, surgem várias interpretações possíveis que podem explicar as deformações sofridas nos objetos ao longo do conjunto de imagens. Para eliminar essa ambiguidade e estabelecer uma solução única para essa situação, Ullman (1979, p. 409, tradução nossa) propõe o pressuposto da rigidez, de que: “Qualquer conjunto de elementos submetidos a uma transformação bidimensional que possui uma única interpretação como um corpo rígido se movendo no espaço, deve ser interpretado como esse corpo em movimento”.

Partindo dessa hipótese de rigidez, surge a necessidade de associá-la a uma metodologia que poderá inferir corretamente a geometria da superfície analisada por meio das medidas fotogramétricas nos pontos homólogos, realizadas nas etapas anteriores. Embora existam algoritmos de fatorização que calculam os POEs da câmara e as coordenadas 3D de pontos homólogos usando a decomposição em valores singulares (*Singular Value Decomposition* - SVD) como no estudo de Tomasi e Kanade (1992), o método mais utilizado e com melhores resultados para a estimação simultânea desses parâmetros é o *Bundle Adjustment*, ou ajustamento por feixes de raio (SNAVELY, 2008).

Segundos Triggs *et al.* (2000) o ajustamento por feixes de raio fornece uma solução ótima dos parâmetros de orientação do sensor e das coordenadas tridimensionais dos pontos fotogramétricos, visto que realiza uma minimização não linear robusta dos erros de medida, ou seja, esse ajustamento minimiza a soma do quadrado dos erros de reprojeção. Por isso, o *Bundle Adjustment* é considerado o método mais acurado para recuperar a estrutura tridimensional de objetos a partir de imagens (SZELISKI, 2010).

Entretanto, como o ajustamento por feixes de raio não possui solução linear direta, os parâmetros aproximados utilizados para inicializar o processo devem ser obtidos de forma cautelosa, para evitar que o ajustamento venha a convergir para mínimos locais (SNAVELY, 2008).

Nesse sentido, normalmente o processo de reconstrução tridimensional começa com um único par de imagens as quais devem possuir um grande número de correspondências de *keypoints* entre si para permitir uma estimação mais robusta dos POEs da câmara e dos pontos fotogramétricos. O intuito dessa inicialização consiste em minimizar os erros de reprojeção nesse par inicial, por ajustamento com mínimos quadrados. Posteriormente, outra imagem deve ser adicionada, sendo realizado um novo ajustamento, entretanto, apenas os POEs da nova foto e os *keypoints* presentes nela são calculados, isto é, os parâmetros estimados anteriormente são considerados fixos. Esse processo acontece de modo iterativo até que todas as imagens tenham sido adicionadas. Por fim, para refinar o modelo inteiro, é importante que seja realizado um ajustamento global, utilizando como parâmetros aproximados os valores estimados nos ajustamentos anteriores (CARRIVICK; SMITH; QUINCEY, 2016).

O produto gerado após a execução do SfM é uma nuvem esparsa de pontos. Mesmo que se tenha conhecimento *à priori* de informações tridimensionais como coordenadas de pontos de apoio ou os POEs da câmara, normalmente o SfM é solucionado em um sistema de coordenadas arbitrário. Assim, a etapa de referenciamento da nuvem de pontos a um sistema de coordenadas do espaço-objeto costuma ser realizada após a reconstrução tridimensional, por meio de uma transformação linear de similaridade com 7 parâmetros: três translações, três rotações e um fator de escala (FONSTAD *et al.*, 2013).

Para realizar essa transformação, é necessário o conhecimento de, no mínimo, 3 pontos de apoio (solução única), os quais podem ser pontos terrestres com coordenadas tridimensionais conhecidas (referenciamento indireto) ou posições do sensor no instante de tomada das fotos (georreferenciamento direto). De modo geral, recomenda-se que sejam utilizados mais que três pontos para garantir maior precisão na determinação dos parâmetros da transformação. Alternativamente, também pode ser realizado o método de Orientação Integrada de Sensores (ISO) e utilizar as coordenadas do CP em conjunto com pontos de apoio terrestres para o referenciamento da nuvem esparsa de pontos (FORLANI *et al.*, 2018; WESTOBY, 2012).

Ainda, a nuvem esparsa de pontos pode conter erros não-lineares oriundos da estimação dos POEs no SfM, de modo que uma etapa adicional após a adição de pontos de apoio pode ser executada visando refinar os parâmetros da câmara e as coordenadas dos pontos fotogramétricos. As coordenadas tridimensionais dos pontos determinadas em campo permitem calcular os erros de estimação das coordenadas desses pontos obtidas com SfM. Desse modo, esses erros de estimação também podem ser minimizados no ajustamento por feixes de raio, o qual deve ser executado novamente considerando essas informações. Alguns programas como o *Metashape* permitem que o usuário realize uma otimização na qual os parâmetros da câmara e dos pontos são refinados com base na minimização da soma do quadrado dos erros de reprojeção e de estimação dos pontos (AGISOFT, 2019; CARRIVICK; SMITH; QUINCEY, 2016)

Por fim, a última etapa do fluxo de trabalho do SfM-MVS consiste na densificação da nuvem esparsa de pontos, utilizando como inicialização a orientação do sensor e a posição dos pontos no espaço-objeto obtidas na reconstrução tridimensional da superfície por SfM. Em casos de processamentos com grandes quantidades de fotos, pode ser realizada uma etapa anterior de agrupamento das imagens (*cluster*), permitindo que cada conjunto seja densificado separadamente e depois unidos em uma única nuvem de pontos. Os algoritmos de MVS permitem, então, aumentar o número de pontos em pelo menos dois graus de magnitude em relação à nuvem esparsa, possibilitando uma reconstrução tridimensional da superfície com maior qualidade e menos ruídos. Assim, a nuvem densa de pontos é o principal produto resultante do método SfM-MVS, mas pós-processamentos adicionais podem ser aplicados para geração de ortofotos, ortomosaicos, Modelos Digitais de Terreno (MDT), curvas de nível, entre outros (IGLHAUT, 2019; ROSNELL; HONKAVAARA, 2012; WESTOBY *et al.* 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

A região em que foi realizada este estudo localiza-se na zona urbana do município de Curitiba – PR, no bairro Cidade Industrial, e compreende uma área de aproximadamente 12 ha.

O levantamento fotogramétrico executado é composto por três faixas de voo paralelas, duas no sentido NW-SE e uma no sentido SE-NW, totalizando 60 imagens aéreas verticais com sobreposição aproximada de 80% entre fotos consecutivas. As fotos da área foram obtidas com uma altura de voo de 100 m, resultando em um tamanho médio no pixel no terreno (*Ground sample distance* - GSD) de 2,84 cm.

Para a aquisição das imagens foi utilizado um Veículo Aéreo Não Tripulado da empresa DJI, modelo Phantom 4 Pro, com autonomia de voo máxima de 30 minutos. Segundo o fabricante, esse RPAS possui sensor CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) de 1” (5472 × 3648 pixels), com tamanho do pixel de 2,4µm e distância focal nominal de 8,8 mm. O sistema de posicionamento por satélite utilizado na aeronave consiste em um receptor GNSS de navegação (GPS/GLONASS) com precisão horizontal de 1,5 m e vertical de 0,5 m em voo pairado.

O receptor GNSS-PPK aerotransportado no VANT, da empresa Guandalini, fornece a posição do sensor com precisão de 10 cm nas componentes horizontais e 20 cm na componente vertical, considerando o pós-processamento das observações GNSS realizadas no *software* próprio da empresa. Nesse processamento estão incluídas as correções dos parâmetros de montagem do sistema e do atraso na sincronia entre as medidas GNSS e a captura das imagens.

O apoio de campo, para determinação das coordenadas geodésicas de pontos notáveis no terreno, foi realizado por posicionamento cinemático (RTK) com um par de receptor GNSS da Topcon, modelo Hiper SR, o qual possui precisão horizontal de 10 mm + 0,8 ppm e vertical de 15 mm + 1,0 ppm.

Para os processamentos fotogramétricos de autocalibração e Orientação Integrada de Sensores com o uso da técnica SfM, utiliza-se a versão de teste do programa Agisoft Metashape v 1.5. As observações dos pontos homólogos de ligação nas imagens (*tie points*) com recobrimento comum são realizadas de forma autônoma, enquanto os pontos de apoio e de verificação são medidos de forma monoscópica e manual. Para todos os experimentos executados no *Metashape* é definido o nível de detalhamento “Elevado” no processo de observações de pontos de ligação, os quais dão origem a uma nuvem esparsa de pontos fotogramétricos.

Já para os procedimentos de Orientação Integrada do Sensor e calibração *in situ* com sub-bloc de imagens usando Fotogrametria tradicional, as observações dos pontos fotogramétricos de ligação são executadas no Módulo de Fotogrametria do Erdas Imagine, também denominado Leica Photogramme Suite (LPS), também de modo autônomo, com exceção dos pontos de apoio e verificação cuja leitura é desempenhada de modo manual e monocular. Além disso, no Erdas também são realizados processamentos de Orientação Integrada de Sensores.

O programa CALIBRAV da Universidade Federal do Paraná é utilizado para determinação dos Parâmetros de Orientação Interior por meio de calibração *in situ* com sub-bloco de imagens, bem como para realização de Orientação Integrada de Sensores.

3.2 Metodologia

Os métodos para extração de geoinformações tridimensionais propostos neste estudo, bem como os pormenores das etapas e dos experimentos a serem realizados, são descritos nas subseções seguintes.

3.2.1 Autocalibração Sem Pontos De Apoio No Metashape

Para os experimentos iniciais com o SfM, o Parâmetro de Orientação Interior aproximado disponibilizado pelo fabricante consiste na distância focal nominal de 8,8 mm. Por esse motivo, os POIs foram deixados livres para serem estimados no ajustamento do *Metashape*, concomitantemente à extração de informações tridimensionais. Desse modo, os processamentos com imagens VANT descritas nesta subseção consistem em processos de autocalibração sem o uso de pontos de apoio terrestres.

Com o intuito de analisar a qualidade posicional da nuvem de pontos gerada por Fotogrametria com imagens obtidas com VANT, foi utilizado neste estudo um bloco com 60 imagens e três faixas de voo, cuja posição do sensor no instante de tomada das fotos foi determinada com o sistema de posicionamento por satélite utilizado para navegação do RPAS modelo Phantom 4 Pro e, adicionalmente, com receptor GNSS-PPK de alta precisão aerotransportados.

O modelo de Conrady-Brown foi adotado para obter a orientação interior do sensor, considerando os seguintes POIs a serem estimados: a distância focal (c), as coordenadas do ponto principal (x_0, y_0) e os coeficientes de distorção radial simétrica (k_1, k_2, k_3) e de distorção descentrada (p_1 e p_2). Quanto às observações fotogramétricas nos pontos de ligação, o SfM faz

uso de algoritmos, como o SIFT (LOWE, 2004), que permitem a identificação, correspondência e medida automática dos pontos homólogos. Assim, com a integração dessas observações fotogramétricas e das medidas diretas da posição do sensor, é realizado um Ajustamento por feixes de raios com o objetivo de refinar os POEs, determinar os POIs da câmara e extrair informações tridimensionais métricas da região imageada.

São propostos dois experimentos de autocalibração no *Metashape* com o intuito de avaliar o ganho em acurácia advindo da utilização do receptor GNSS-PPK de alta precisão, sem a utilização de pontos de apoio no terreno em ambos os casos. Em um primeiro experimento, se analisará o desempenho da autocalibração do *Metashape* apenas com as observações de posição obtidas pelo sensor de baixo-custo do VANT. Para isso, são utilizadas as informações presentes no *Exchangeable Image File Format* (Exif), o qual consiste em um conjunto de metadados das imagens que registra dados como o tipo de câmara, a distância focal e a posição do sensor no instante de tomada das fotos obtida com o GNSS de navegação do RPAS. As informações do Exif são lidas automaticamente no *Metashape* quando as fotos são importadas no programa. Assim, é realizado um processamento em que as coordenadas do CP medidas pelo GNSS de baixa precisão são usadas como parâmetros aproximados, mas são mantidos livres no ajustamento. Do mesmo modo, os ângulos de orientação também permanecem livres para serem estimados.

No segundo experimento será analisado o ganho na qualidade posicional obtido com a autocalibração que utiliza medidas diretas da posição do sensor com alta precisão. Assim, são incluídas as coordenadas do CP (X_0 , Y_0 , Z_0), observadas pelo receptor GNSS-PPK, como injunções de posição no ajustamento. Para isso, as medidas da posição do sensor são incluídas como observações adicionais com pesos relativos à incerteza nominal do receptor PPK, o qual possui precisão de 10 cm para as coordenadas planimétricas (X_0 e Y_0) e de 20 cm para a coordenada altimétrica (Z_0), segundo o fabricante. Já os ângulos de orientação (ω , ϕ , κ) obtidos não são injuncionados e permanecem livres para serem estimados no ajustamento, assim como no processamento anterior.

Em seguida, com o intuito de avaliar a acurácia na extração tridimensional de geoinformações obtidas com SfM nesses experimentos, 12 pontos de verificação geometricamente distribuído na região estudada (Figura 5), não alinhados e com detalhes pontuais facilmente identificáveis nas imagens, foram levantados em campo por métodos geodésicos, com uso do receptor GNSS Topcon Hiper SR.

Figura 5 – Distribuição de pontos de verificação



Fonte: Autora (2021)

Desse modo, foram lidos manualmente nas imagens, por leituras monoscópicas, os 12 pontos definidos como pontos de verificação. Com a interseção fotogramétrica dos raios homólogos no espaço-objeto, torna-se possível estimar as coordenadas destes mesmos pontos por Fotogrametria. Portanto, a acurácia posicional das nuvens de pontos pode ser avaliada por meio da discrepância entre as coordenadas medidas em campo e as obtidas pelos métodos fotogramétricos. A Figura 6 abaixo apresenta resumidamente os experimentos descritos nessa subseção.

Figura 6 – Esquema-resumo dos experimentos de autocalibração sem pontos de apoio *Metashape*

Fonte: Autora (2021)

3.2.2 Orientação Integrada De Sensores Com POIs Obtidos Por Autocalibração

Em seguida, faz-se necessário analisar a qualidade da estimação de POIs pelo processo de autocalibração realizado na implementação do SfM no *Metashape*. Para isso, são realizadas experimentações pelo método fotogramétrico tradicional, aplicando como fixos os POIs estimados na autocalibração com uso da posição do sensor medida por GNSS-PPK, isto é, no segundo processamento descrito na subseção 3.2.1. Nesses experimentos, os POIs utilizados são: a distância focal (c), a posição do ponto principal (x_0, y_0) e apenas o coeficiente k_1 para descrever a distorção radial das lentes. Desse modo, propõe-se realizar a Orientação Integrada de Sensores, sem pontos de apoio terrestres, nos programas Erdas e CALIBRAV.

Para que as medidas dos pontos homólogos pudessem ser realizadas de maneira autônoma no módulo de Fotogrametria do Erdas, foram injuncionadas as coordenadas do CP medidas diretamente pelo receptor GNSS-PPK. No caso dos ângulos de orientação, os valores advindos do *Metashape* foram utilizados como valores aproximados, mas os parâmetros permanecem livres na Fototriangulação. Segundo parecer do suporte técnico da Agisfot em fórum da empresa (PASUMANSKY, 2016) e corroborando com investigações comparativas entre os programas realizadas nessa pesquisa, no *Metashape* o ângulo de rotação em torno do eixo Z ($kappa$) é contado no sentido anti-horário. Portanto, faz-se necessário ter o cuidado de converter esse ângulo para o sentido horário para ser utilizado como parâmetro inicial nos programas de Fotogrametria Tradicional Erdas Imagine e CALIBRAV.

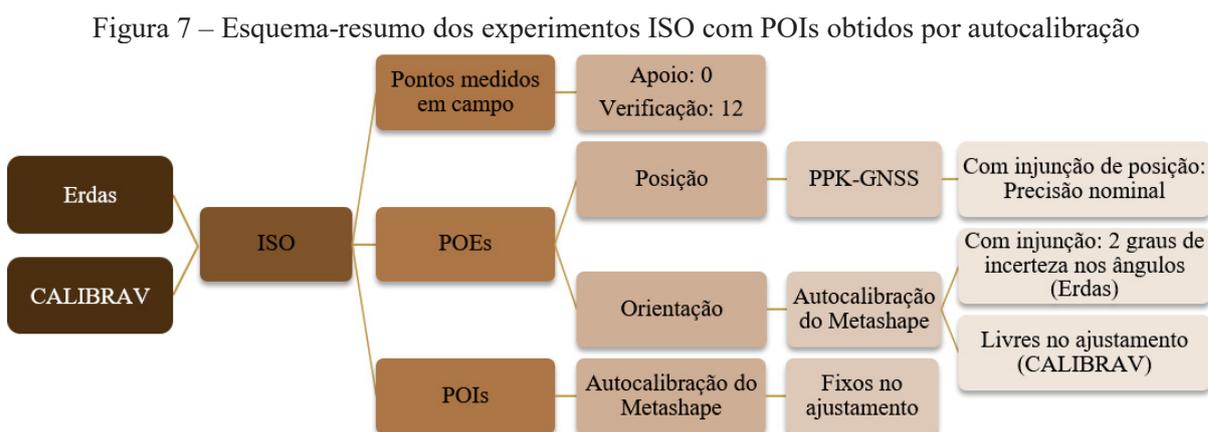
Ao contrário do *Metashape*, ambos os programas utilizados para processamentos com Fotogrametria Tradicional apresentam um relatório com os resíduos das medidas fotogramétricas nos pontos de ligação, tornando possível realizar uma análise mais minuciosa da qualidade dessas medidas e da precisão do ajustamento. Assim, as medidas automáticas dos pontos de ligação realizadas no Erdas com resíduos acima de 3 pixels foram eliminadas, assegurando que todos os pontos medidos continuassem com observações em pelo menos duas imagens. Em seguida, foram observados nas imagens os 12 pontos de verificação de maneira manual e monocular.

No Orientação Integrada do Sensor realizada no Erdas, o modelo de distorção radial de lentes não é definido pelos mesmos coeficientes do modelo de Conrady-Brown apresentado na Equação 5, por isso foram calculadas as distorções referentes a raios de 0 a 8 mm, devido ao raio máximo do sensor ser de 7,92 mm. Os valores dos raios, variando a cada 0,5 mm, e distorções correspondentes foram inseridos no programa, permitindo que os coeficientes de distorção radial fossem obtidos no modelo adotado no Erdas.

Nesse experimento, como o referencial não foi fixado no terreno (pela ausência de pontos de apoio), no programa Erdas não foi possível realizar a Fototriangulação apenas com a injunção de posição das coordenadas do CP, visto que o programa só permite a realização do ajustamento se a orientação e posição do sensor foram fixadas ou injuncionadas. Desse modo, para permitir que os ângulos de orientação exterior da câmara pudessem ser estimados com maior flexibilidade no ajustamento, foi estabelecido um peso significativamente baixo para essas medidas, considerando a incerteza de 2 graus para os ângulos importados do *Metashape*.

Para a Orientação Integrada de Sensores realizada no CALIBRAV foram utilizadas as medidas de pontos de ligação e de verificação observadas no Erdas. Como este programa já realiza a correção das fotocoordenadas em relação ao ponto principal e às distorções da lente, nesse experimento no CALIBRAV, o único parâmetro de orientação interior utilizado foi a distância focal obtida na autocalibração do *Metashape* (3.2.1). Nesse experimento foi possível injuncionar a posição do sensor conforme a precisão nominal do GNSS-PPK e manter a orientação livre para ser ajustada, com os ângulos provenientes do *Metashape* sendo usados apenas como parâmetros iniciais.

Assim, com intuito de determinar a exatidão desses processamentos, foram calculadas as discrepâncias nos 12 pontos de verificação presentes no bloco (Figura 5). As características das Orientações Integrada de Sensores descritas nesta subseção são resumidos na representação esquemática da Figura 7.



Fonte: Autora (2021)

3.2.3 Autocalibração Com Pontos De Apoio No Metashape

Com o intuito de refinar os POEs por autocalibração do bloco de imagens obtidas com o VANT Phantom 4 Pro, foram realizados experimentos incluindo as medidas diretas da

posição do sensor e medidas em campo de coordenadas de pontos de apoio como observações adicionais na Fototriangulação, com injeção de posição referente à precisão nominal dos respectivos equipamentos utilizados. Para esses experimentos, os ângulos de orientação serão considerados como parâmetros livres a serem determinados no ajustamento. De maneira similar à metodologia descrita em 3.2.1, serão analisados os processos fotogramétricos com a técnica SfM implementada no *Metashape*. Os POIs estimados nesses experimentos seguem o modelo de Conrady-Brown em cada experimento.

Para investigar a qualidade da autocalibração, serão realizados experimentos com diferentes distribuições de pontos de apoio, variando nos processamentos a quantidade de apoio em 1, 4, 5 e 6 pontos de apoio. Dessa forma, têm-se o intuito de verificar a condição mínima de pontos de apoio que permite que a determinação de coordenadas tridimensionais no espaço-objeto no ajustamento atenda às tolerâncias de acurácia planimétrica e altimétrica estabelecidas para aplicações fotogramétricas de alta precisão.

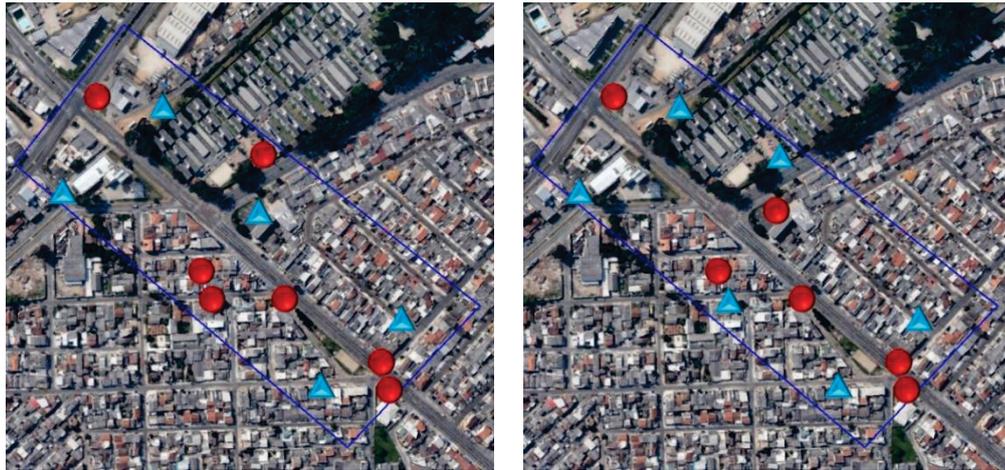
Os experimentos executados no *Metashape* são empregados com as mesmas observações realizadas manualmente nas imagens para os 12 pontos, considerando como pontos de verificação, em cada caso, os pontos que não são utilizados como apoio nos respectivos processamentos. Assim, a Figura 8 (a) apresenta a distribuição com 1 ponto na porção central do bloco, a Figura 8 (b) mostra os 4 pontos distribuídos nas extremidades do bloco, a Figura 8 (c) representa a distribuição com 5 pontos, 4 nas extremidades e 1 na região central e a Figura 8 (d) apresenta os 6 pontos distribuídos dois a dois no início, meio e fim do bloco.

Figura 8 – Configurações de pontos de apoio



(a) Configuração com 1 ponto de apoio

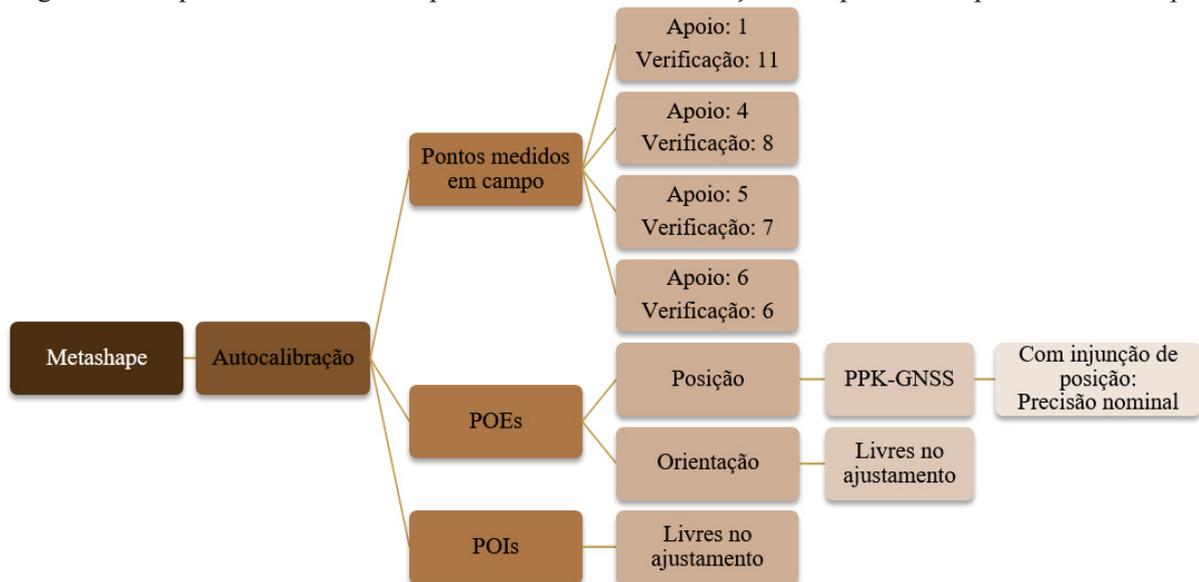
(b) Configuração com 4 pontos de apoio



(c) Configuração com 5 pontos de apoio (d) Configuração com 6 pontos de apoio
Fonte: Autora (2021)

Visando analisar a precisão e acurácia tridimensional das informações métricas extraídas por meio dos procedimentos fotogramétricos com aplicação de autocalibração com pontos de apoio, serão obtidas as discrepâncias entre as coordenadas calculadas por Fotogrametria e as medidas em campo por métodos geodésicos, nos pontos de apoio e de verificação. A Figura 9 esquematiza os detalhes dos processamentos de autocalibração apresentados nesta subseção.

Figura 9 – Esquema-resumo dos experimentos de autocalibração com pontos de apoio no *Metashape*



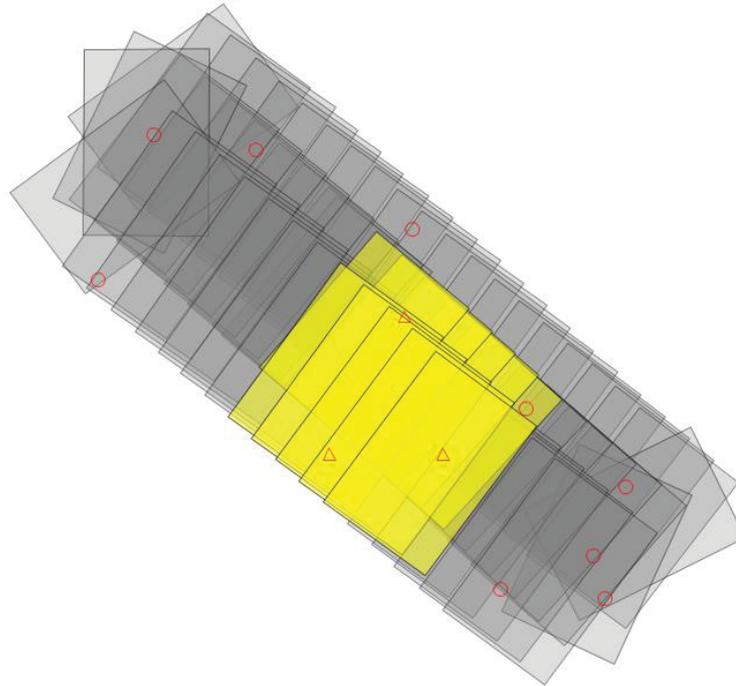
Fonte: Autora (2021)

3.2.4 Calibração *In Situ*

O primeiro passo para a realização da calibração *in situ* com sub-bloco consiste na escolha de quais imagens irão compor esse sub-bloco, em termos de quantidade de fotos,

quantas faixas, quais os sentidos de voo e sua localização em relação ao bloco de imagens. Neste estudo, foi escolhido um conjunto de 10 imagens presentes na porção central do bloco para compor o sub-bloco de fotos a serem utilizadas na calibração *in situ*, em conformidade com as investigações propostas por Costa, Mitishita e Martins (2018) de que o sub-bloco na região central apresentou os melhores resultados de exatidão posicional na Orientação Integrada de Sensores entre as 5 regiões analisadas no estudo, nas 4 extremidades do bloco e na porção central. Quanto à geometria do sub-bloco, o conjunto de fotos definido envolve duas faixas em sentidos opostos, com 5 fotos em cada, bem como é localizado em uma região com três pontos de apoio visíveis em pelo menos duas imagens. Na Figura 10 o sub-bloco é representado destacado em amarelo, os pontos de apoio como triângulos vermelhos e os de verificação como círculos em vermelho.

Figura 10 – Configuração do sub-bloco e dos pontos de apoio



Fonte: Autora (2021)

O modelo matemático adotado para o ajustamento consiste nas equações de colinearidade com 8 parâmetros adicionais para modelagem dos POIs da câmara, segundo proposto por Conrady-Brown: distância focal, coordenadas do ponto principal, coeficientes de distorção radial simétrica e de distorção descentrada. Assim, os pontos de ligação serão observados no Erdas, próximos as regiões propostas por Von Gruber.

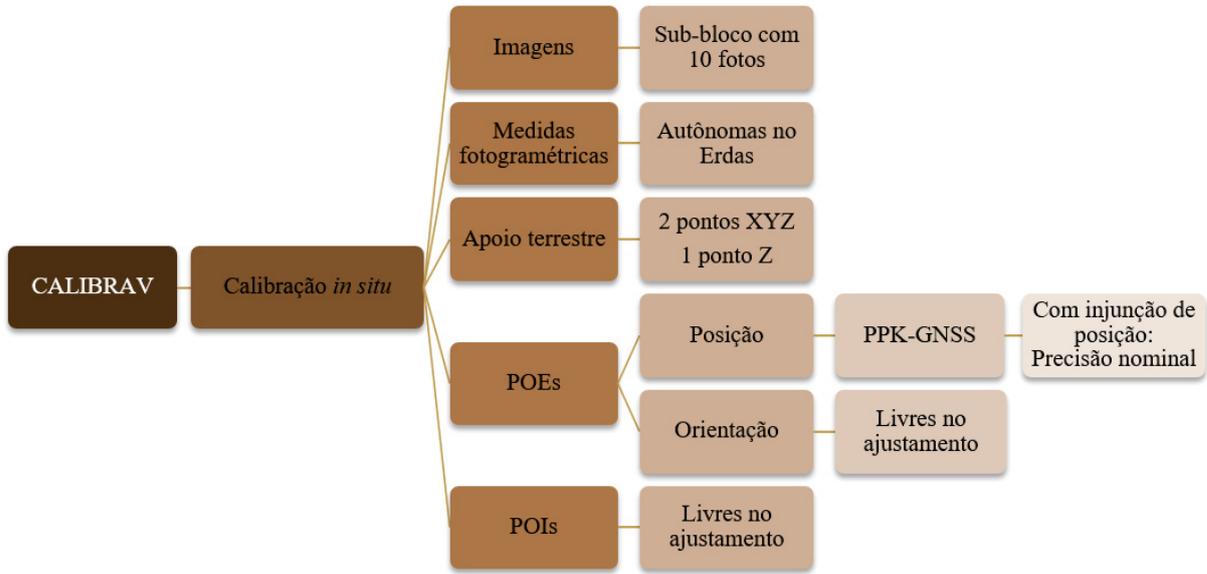
Desse modo, é realizada uma calibração com pontos homólogos e com três pontos de apoio presentes no sub-bloco, sendo dois horizontais e verticais (G11 e G18) e um vertical (G17), condição mínima para fixar o referencial no terreno. Esse processo de Calibração *in situ* será realizado no programa CALIBRAV, devendo ser adicionado um arquivo de entrada com as seguintes informações:

- As medidas fotogramétricas das coordenadas dos pontos de ligação e dos pontos de apoio nas imagens do sub-bloco, realizadas no Erdas.
- As coordenadas do CP, determinados por posicionamento direto do sensor via receptor GNSS-RTK, devidamente injuncionadas conforme a precisão nominal do instrumento (10 cm para as coordenadas planimétricas e 20 cm para a coordenada altimétrica).
- Os valores aproximados dos ângulos de orientação do sensor e das coordenadas tridimensionais dos pontos de ligação, ambos oriundos do processamento do sub-bloco no Erdas com os três pontos de apoio, dois horizontais e verticais e um vertical.
- O valor aproximado da distância focal fornecida pelo fabricante.
- O tamanho do pixel da imagem no sensor e a precisão das observações fotogramétricas considerada como 1 pixel.
- As coordenadas UTM dos pontos de apoio terrestre, injuncionadas conforme a precisão nominal do instrumento.

Devido à correlação direta existente entre os Parâmetros de Orientação Exterior e Interior ($X_0 - x_0$; $Y_0 - y_0$; $Z_0 - c$) espera-se que os POIs determinados pela calibração *in situ* possam modelar possíveis erros sistemáticos nas observações diretas da posição do sensor. A Figura 11 representa as principais características desse experimento de calibração

Por fim, torna-se necessário realizar uma análise mais criteriosa das correlações existentes entre os POEs e POIs resultante dessa calibração, visando identificar quais parâmetros são realmente significativos para a modelagem das deformações das lentes da câmara utilizada. Para isso, também deve-se investigar a precisão do ajustamento e a qualidade da determinação dos POIs, por meio da verificação dos resíduos das observações dos ajustamentos, bem como da análise da razão entre a variância à posteriori e a variância à *priori* (adotada como valor unitário em no experimento).

Figura 11 – Esquema-resumo do experimento de calibração *in situ* com sub-bloco de imagens



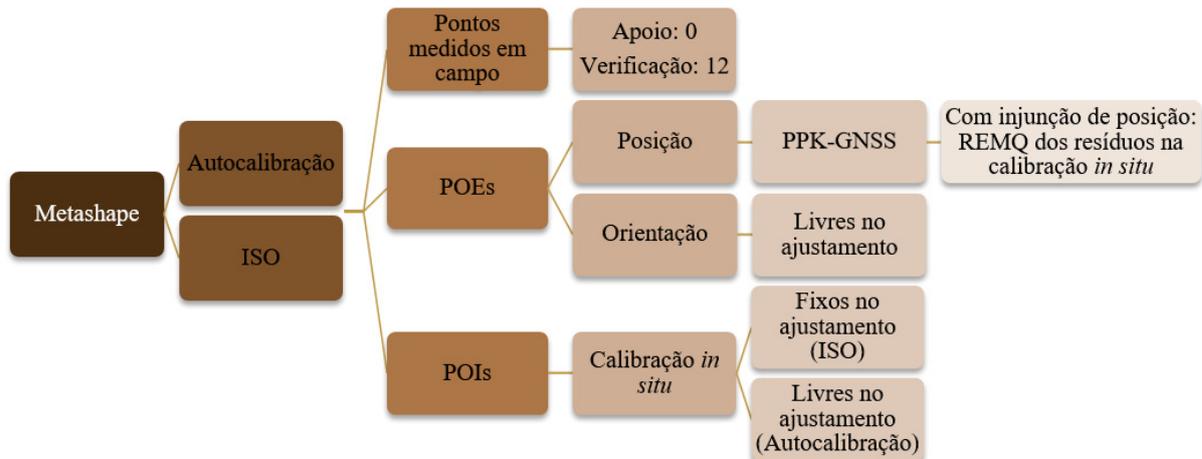
Fonte: Autora (2021)

3.2.5 Experimentos No Metashape Com POIs Obtidos Por Calibração In Situ

A proposição de realizar uma calibração *in situ* controlada possui o intuito de melhorar a qualidade da extração de informações tridimensionais pelo SfM implementado no *Metashape*. Para alcançar esse objetivo, são realizados dois experimentos fotogramétricos com os valores de POIs estimados pela pré-calibração da câmara *in situ* com sub-bloco de 10 imagens (descrita em 3.2.4). Em ambos, as coordenadas do CP (X_0 , Y_0 , Z_0) serão injuncionadas no ajustamento segundo os valores de REMQ dos resíduos desses parâmetros, obtidos na calibração *in situ*, e a orientação permanece livre para ser determinada no ajustamento.

Para o primeiro experimento, uma Orientação Integrada de Sensores é executada considerando os POIs estimados em 3.2.4 como fixos e as medidas diretas da posição do sensor como observações adicionais. No segundo experimento, os parâmetros de orientação interior também são inseridos no programa como sendo oriundos de uma pré-calibração, no entanto, são considerados como valores aproximados, possibilitando que seja realizada uma autocalibração no *Metashape* com parâmetros iniciais mais representativos das condições físicas do sensor que a distância focal de fábrica adotada como parâmetro inicial nos demais processos de autocalibração descritos 3.2.1 e 3.2.3. A Figura 12 abaixo apresenta resumidamente os experimentos descritos nessa subseção.

Figura 12 – Esquema-resumo dos experimentos no *Metashape* com POIs obtidos por calibração *in situ*



Fonte: Autora (2021)

Para essas análises, os experimentos foram executados sem pontos de apoio e com 12 pontos de verificação (Figura 5), com exatidão calculada pelas discrepâncias nos pontos de verificação em cada processamento.

3.2.6 Orientação Integrada De Sensores Com POIs Obtidos Por Calibração In Situ

Visando analisar se ocorre acréscimo na acurácia posicional da Orientação Integrada de Sensores, por Fotogrametria Tradicional, com os POIs calculados na calibração *in situ* com sub-bloco de imagens (3.2.4) em relação à ISO com POIs estimados por autocalibração sem pontos de apoio no *Metashape*, realizou-se experimentos no programa Erdas e CALIBRAV. Nesses processamentos foram considerados os POIs da calibração *in situ* como fixos e a incerteza nas medidas de posição direta do sensor (X_0 , Y_0 , Z_0) como sendo correspondentes aos valores de REMQ dos resíduos nessas coordenadas na calibração *in situ*.

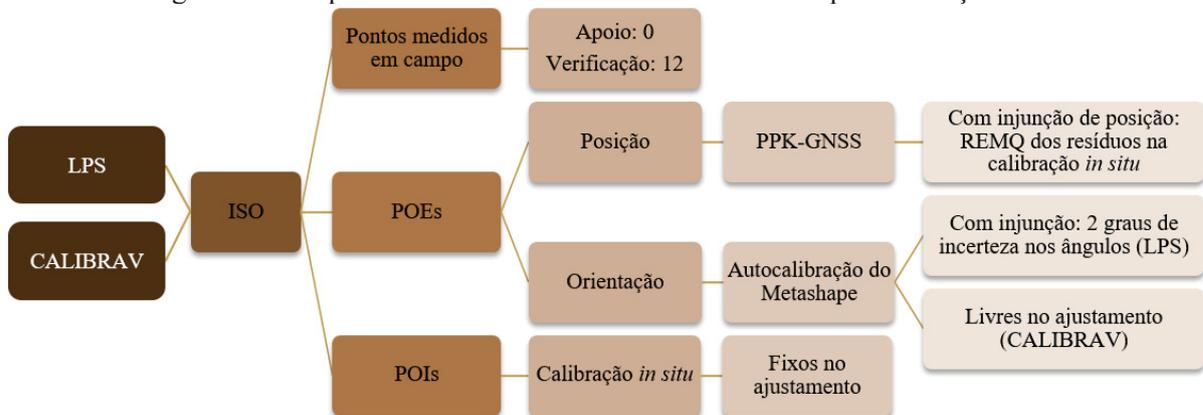
Assim, no experimento de Orientação Integrada de Sensores realizado com o Erdas, foram importadas as mesmas medidas automáticas de pontos de ligação utilizados nos experimentos de Orientação Integrada de Sensores com POIs estimados por autocalibração (3.2.2), cujas observações com resíduos acima de 3 pixels foram excluídas, e as mesmas medidas manuais dos pontos de verificação. Ainda de maneira análoga ao experimento descrito em 3.2.2, foi necessário calcular as distorções radiais simétricas referentes a raios de 0 a 8 mm, considerando os coeficientes de distorção radial obtidos na calibração *in situ*, para que fosse possível determinar os coeficientes no modelo adotado no Erdas. Para a realização do ajustamento por feixes de raio, foram seguidos os seguintes critérios: (1) os POIs da calibração *in situ* foram considerados como fixos; (2) as coordenadas do CP medidas com o GNSS-PPK aerotransportado no RPAS foram estabelecidas como observações adicionais com injeção de

posição, conforme o REMQ dos resíduos na calibração *in situ*; (3) os ângulos de orientação das imagens, estimados no *Metashape*, foram utilizados com desvio-padrão de 2° nas medidas, permitindo que fossem estimados com maior flexibilidade no processamento.

Para o experimento de ISO realizada no CALIBRAV, foram utilizadas as medidas de pontos de ligação e de verificação observadas no Erdas e corrigidas em relação ao deslocamento do ponto principal e da distorção de lentes obtidos na calibração *in situ*. Desse modo, utilizou-se no CALIBRAV apenas a distância focal estimada na calibração *in situ* com sub-bloco de imagens. Nesse experimento as observações das coordenadas do CP foram consideradas como observações adicionais com injeção de posição, também considerando o REMQ dos resíduos das coordenadas na calibração, enquanto a orientação permaneceu livre para ser ajustada, com valores aproximados provenientes dos ângulos estimados no *Metashape*.

Desse modo, essas experimentações nos dois programas foram realizadas sem pontos de apoio e com 12 pontos de verificação (Figura 5), sendo a acurácia posicional determinada a partir das discrepâncias nos pontos de verificação em cada processamento. As características dos experimentos de Orientações Integrada de Sensores discutidos nesta subseção são resumidas no esquema da Figura 13.

Figura 13 – Esquema-resumo das ISO Com POIs obtidos por calibração *in situ*



Fonte: Autora (2021)

3.2.7 Análise de Acurácia Posicional

Com o intuito de verificar a qualidade da aquisição de dados espaciais resultantes dos experimentos fotogramétricos realizados neste estudo, são analisadas as discrepâncias nos pontos de verificação entre as coordenadas medidas em campo por métodos geodésicos e as coordenadas estimadas por Fotogrametria, segundo a metodologia proposta em cada processamento. Desse modo, a acurácia das componentes tridimensionais pode ser estimada

por meio dos valores da Raiz do Erro Médio Quadrático (*Root Mean Squared Error*), calculados conforme a Equação 6.

$$REM_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{a}_i - a_i)^2}{n}} \quad (6)$$

na qual:

n : Número de observações;

\hat{a}_i : Valor da coordenada estimada pelo método fotogramétrico;

a_i : Valor observado em campo.

Desse modo, o REMQ é determinado tanto para cada componente das coordenadas ($REQM_X$, $REQM_Y$, $REQM_Z$), como para o erro planimétrico ($REQM_{XY}$), como mostra a Equação 7.

$$REQM_{XY} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2 + (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (7)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados de procedimentos fotogramétricos de autocalibração, Orientação Integrada de Sensores e calibração *in situ* com sub-bloco de imagens. Para isso foi utilizado um bloco com 60 imagens obtidas pela câmara digital do Veículo Aéreo Remotamente Pilotado (RPAS) modelo Phantom Pro 4. Além disso, é realizada a integração com medidas diretas da posição do sensor obtidas pelo receptor GNSS-PPK aerotransportado da empresa Guandalini.

4.1 Autocalibração Sem Pontos de Apoio no Metashape

Com o uso do bloco de imagens obtido, foram executados no *Metashape* os experimentos propostos em 3.2.1 de autocalibração sem pontos de apoio terrestres. Assim, o processamento inicial utiliza as coordenadas do CP (X_0, Y_0, Z_0) medidas diretamente pelo GNSS de navegação presente no RPAS. Em seguida, busca-se analisar o ganho em qualidade posicional da integração de observações da posição direta do sensor com alta precisão, realizadas com um receptor GNSS-PPK aerotransportado. Para isso é executado um segundo experimento de autocalibração. Na Tabela 1, são apresentados os valores de REMQ referentes aos resíduos do ajustamento para cada método de observação das coordenadas dos CPs das 60 imagens do bloco.

Tabela 1 – REMQ dos resíduos na posição do sensor das autocalibrações sem pontos de apoio

Posição do sensor	REMQ			REMQ (GSD)		
	X0	Y0	Z0	X0	Y0	Z0
GNSS de navegação	3,076	2,653	1,803	107,937	93,084	63,255
GNSS-RTK	0,131	0,104	0,017	4,588	3,650	0,605

Fonte: Autora (2021)

Na autocalibração com as coordenadas medidas diretamente com GNSS de navegação, os parâmetros de posição do sensor permaneceram livres para serem estimados no ajustamento. Assim, como pode ser observado na Tabela 1, as coordenadas do CP obtidas apresentaram REMQ dos resíduos acima de 1 metro, visto que as observações diretas da posição do sensor com GNSS de navegação são determinadas com baixa precisão, apenas para fins de posicionamento do RPAS durante a tomada de fotos.

Já no experimento utilizando as coordenadas dos CPs medidas pelo receptor PPK aerotransportado, os valores de X_0, Y_0 e Z_0 dos CPs foram injuncionados no ajustamento, segundo a precisão nominal do equipamento. Nesse processamento, como pode ser observado

na Tabela 1, o valor de REMQ de X_0 e Y_0 foi equivalente ao valor de precisão assumido a *priori*, correspondente a incerteza nominal de 10 cm para X e Y. Já em relação à coordenada Z_0 , o valor de REMQ dos resíduos (0,017 m) foi 10 vezes inferior à precisão adotada inicialmente (20 cm). Esse resultado pode ser explicado pela alta correlação existente entre a distância focal (c) e a coordenada altimétrica do CP (Z_0), o que possibilita que incertezas presentes na determinação das componentes de posição do sensor sejam absorvidas pelos POIs.

Nos dois experimentos realizados, foi considerado o modelo de Conrady-Brown para estimar os POIs, nos quais são determinados 8 parâmetros que permitem recuperar a condição de colinearidade dos raios de luz: distância focal (c), coordenadas do ponto principal (x_0 , y_0), coeficientes de distorção radial simétrica (k_1 , k_2 , k_3) e coeficientes de distorção descentrada (p_1 , p_2). Os valores desses parâmetros e seus respectivos desvios-padrão, estimados nos processamentos de autocalibração do *Metashape* sem pontos de apoio, são representados na Tabela 2.

Tabela 2 – POIs estimados nas autocalibrações sem pontos de apoio

POIs	GNSS de navegação		GNSS-PPK	
	Valor	Desvio-padrão	Valor	Desvio-padrão
c (mm)	8,812	0,027	8,951	0,018
x_0 (mm)	-0,002	1,42E-04	-0,001	1,25E-04
y_0 (mm)	0,035	4,10E-04	0,037	2,89E-04
k_1 (mm ⁻²)	1,03E-05	3,62E-07	1,02E-05	1,25E-07
k_2 (mm ⁻⁴)	-2,99E-05	4,58E-07	-3,33E-05	4,10E-07
k_3 (mm ⁻⁶)	3,14E-05	6,27E-07	3,59E-05	5,06E-07
p_1 (mm ⁻¹)	1,50E-06	8,44E-09	1,50E-06	7,71E-09
p_2 (mm ⁻¹)	-6,13E-07	6,75E-09	-5,94E-07	6,03E-09

Fonte: Autora (2021)

Como pode ser observado na Tabela 2, a distância focal varia cerca de 0,140 mm entre o experimento realizado com as observações diretas da posição do sensor por GNSS de navegação (8,812 mm) e o experimento com GNSS-PPK (8,951 mm). O impacto dessa variação de 0,140 mm, considerando a altura de voo de 100 m e a distância focal nominal de 8,8mm, é equivalente a 1,59 m nas coordenadas Z_0 , portanto, pode representar um erro sistemático considerável no experimento com GNSS de navegação. Uma possível explicação para essa variação é a alta correlação dos Parâmetros de Orientação Interior com as coordenadas do CP, principalmente da distância focal com a coordenada Z_0 nesse processamento com GNSS de

navegação, visto que nesse experimento os Parâmetros de Orientação Exterior são deixados livres para serem estimados na autocalibração.

Na autocalibração com medidas mais precisas da posição do sensor, determinadas pelo receptor GNSS-PPK aerotransportado, espera-se que os resíduos no ajustamento sejam menores e, conseqüentemente, que a variância *a posteriori* e o desvio-padrão dos parâmetros estimados apresentem valores mais baixos que no experimento com GNSS de navegação. Assim, com base na Tabela 2, é possível analisar que no ajustamento com coordenadas do CP determinadas diretamente por GNSS-PPK os desvios-padrão estimados são menores para todos os Parâmetros de Orientação Interior.

Posteriormente, a exatidão alcançada nesses experimentos é investigada a partir das discrepâncias obtidas entre as coordenadas dos 12 pontos de verificação. A Tabela 3 resume os principais resultados referentes a essas discrepâncias, apresentando os valores de REMQ calculados para as coordenadas X, Y e Z dos pontos, bem como de REMQ planimétrico (XY).

Tabela 3 – REMQ das discrepâncias nos pontos de verificação das autocalibrações sem pontos apoio

Posição do sensor	REMQ (m)				REMQ (GSD)	
	X	Y	XY	Z	XY	Z
GNSS de navegação	0,363	1,298	1,348	5,777	47,283	202,686
GNSS-RTK	0,277	0,803	0,849	0,595	29,787	20,868

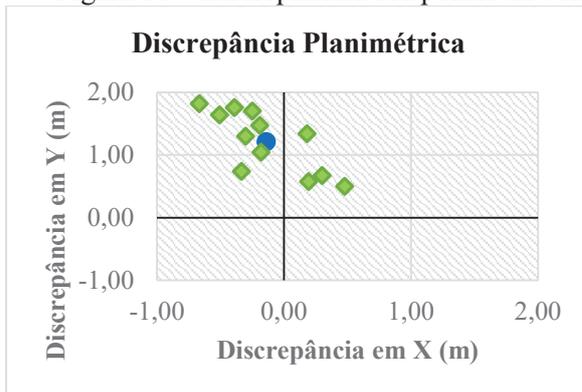
Fonte: Autora (2021)

Com base nos valores de REMQ dos dois processamentos de autocalibração, o ganho em exatidão posicional do experimento com receptor GNSS-PPK em relação ao experimento com GNSS de navegação foi de 37% em planimetria e 90% em altimetria. Desse modo, o uso das posições do sensor obtidas com alta precisão permitiu aumentar consideravelmente a exatidão da autocalibração em relação ao experimento com GNSS de navegação, principalmente na componente vertical dos pontos de verificação. No entanto, mesmo com a utilização das coordenadas do CP observadas pelo receptor PPK aerotransportado, a nuvem de pontos apresentou acurácia acima de 80 cm para planimetria e 50 cm para altimetria no experimento sem pontos de apoio. Portanto, esse resultado apresenta a limitação da autocalibração sem pontos de apoio, no bloco estudado, para aplicações fotogramétricas que requeiram melhor precisão.

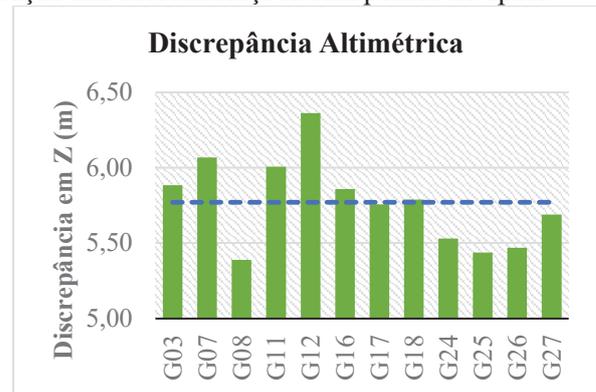
Nesse sentido, para a verificação de possíveis erros sistemáticos nesses experimentos, faz-se necessário realizar uma análise mais aprofundada das discrepâncias nos pontos de verificação. Para isso, os gráficos das Figuras 14 (a) e (b) exibem, respectivamente, as

discrepâncias planimétricas e altimétricas dos pontos de verificação em torno do seu valor médio (em azul), no processamento com GNSS de navegação. De modo análogo, as Figuras 14 (c) e (d) mostram as discrepâncias planimétricas e altimétricas da autocalibração com receptor GNSS-PPK.

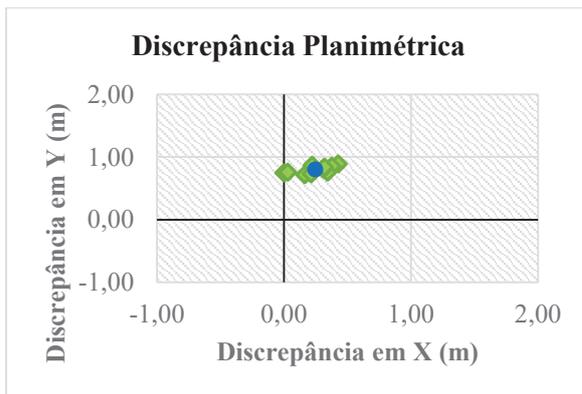
Figura 14 – Discrepâncias dos pontos de verificação nas autocalibrações sem pontos de apoio



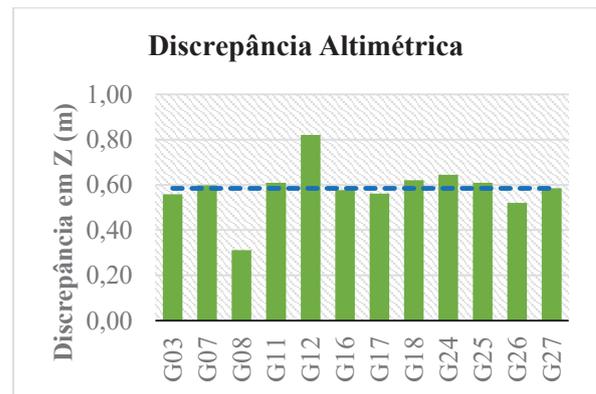
(a) Discrepância em XY com GNSS de navegação



(b) Discrepância em Z com GNSS de navegação



(c) Discrepância em XY com GNSS-PPK



(d) Discrepância em Z com GNSS-PPK

Fonte: Autora (2021)

Analisando as Figuras 10 (a) e (b) é possível identificar que o valor médio de X encontra-se próximo de zero, mas em Y e Z existem erros sistemáticos nos experimentos realizados com as posições do sensor obtidas com GNSS de navegação. Como pode ser observado no valor médio das discrepâncias planimétricas, a componente Y possui tendência acima de 1 metro nas discrepâncias dos pontos de verificação. Já na coordenada Z, o valor médio indica a existência de uma tendência positiva de magnitude de aproximadamente 5,8 metros. Esse erro significativamente alto na componente altimétrica provavelmente está relacionado à correlação dos valores de Z_0 e distância focal estimados nessa autocalibração, visto que os POEs permanecem livres para serem determinados simultaneamente aos POIs. Desse modo, como a região de trabalho possui pouca variação no relevo e todas as imagens

foram tomadas próximas à vertical, a altura de voo permanece praticamente a mesma ao longo do bloco, provocando uma correlação consideravelmente alta entre os parâmetros Z_0 e f que pode estar causando esse erro sistemático na altimetria dos pontos.

Com base nas Figuras 10 (c) e (d) observa-se a presença de tendências positivas nas coordenadas X, Y e Z para os processamentos utilizando medidas diretas da posição do sensor com GNSS-PPK. Conforme a análise do valor médio nas discrepâncias planimétricas, a componente X possui tendência de aproximadamente 25 cm, enquanto a componente Y apresenta tendência de 80 cm. Nas discrepâncias altimétricas é possível perceber uma tendência de 60 cm. Assim, o erro sistemático na coordenada altimétrica foi reduzido substancialmente com o uso das coordenadas do CP estimadas com o receptor PPK com injeção de posição segundo a precisão nominal do equipamento. Isso ocorre porque os POEs são fixados pelas injeções, de modo que a correlação entre POEs e POIs é reduzida nesse processo de autocalibração.

De modo geral, é notório que o experimento realizado com o receptor GNSS-PPK apresentou melhoras consideráveis na exatidão posicional e na redução de tendências, principalmente altimétricas, em comparação ao experimento com GNSS de navegação. Entretanto, a REMQ planimétrica do experimento com GNSS-PPK foi de 0,849 m e altimétrica de 0,595 m. Além disso, foram identificadas tendências positivas em todas as componentes tridimensionais das discrepâncias dos pontos de verificação. Esses resultados indicam que, para o bloco de imagens estudado, o método de autocalibração sem pontos de apoio não apresenta acurácia posicional adequada para aplicações fotogramétricas que requeiram maior precisão, mesmo que sejam integradas determinações da posição do sensor com alta precisão.

Desse modo, visando melhorar a qualidade posicional da nuvem de pontos gerada no *Metashape*, serão adicionadas diferentes quantidades de pontos de apoio no processo de autocalibração. Posteriormente, serão realizados experimentos de Orientação Integrada de Sensores utilizando calibração *in situ* com sub-bloco, também com o intuito de aumentar a acurácia e reduzir os erros sistemáticos na extração de informações métricas.

4.2 Orientação Integrada de Sensores com POIs obtidos por Autocalibração

Realizou-se experimentos pelo método fotogramétrico tradicional com o intuito de analisar a qualidade dos parâmetros de orientação interior estimados pela autocalibração sem pontos de apoio desempenhada no *Metashape* com as medidas diretas da posição do sensor observadas com GNSS-PPK aerotransportado. Desse modo, foi realizada a Orientação

Integrada de Sensores nos programas Erdas Imagine e CALIBRAV, conforme especificado em 3.2.2, sem pontos de apoio, injuncionando a posição das coordenadas do CP medidas com alta-precisão e usando como parâmetros iniciais os ângulos de orientação estimados na autocalibração citada.

Os Parâmetros de Orientação Interior fixados nesses experimentos correspondem à distância focal (8,951 mm), coordenadas do ponto principal (-0,001 mm, 0,037 mm) e coeficiente de distorção radial simétrica k_1 ($1,02E-05 \text{ mm}^{-2}$) apresentados na Tabela 2, referentes ao processamento de autocalibração com medidas da posição do sensor pelo GNSS-PPK. Vale ressaltar que o Erdas Imagine adota um modelo de distorção radial diferente do *Metashape*, tendo sido necessário calcular no Erdas os coeficientes que correspondiam às mesmas distorções do modelo de Conrady-Brown para raios variando entre 0 e o raio máximo do sensor (7,29 mm). Além disso, para o experimento realizado no CALIBRAV foram utilizadas as medidas no referencial fotogramétrico dos pontos de ligação e verificação observadas no Erdas e, portanto, já corrigidas em relação à distorção radial e desalinhamento do ponto principal. Por isso, o único POI considerado nesse experimento foi a distância focal de 8,951 mm. Assim, a Tabela 4 indica os valores de REMQ correspondentes aos resíduos nas componentes horizontais e vertical da posição do sensor.

Tabela 4 – REMQ dos resíduos na posição do sensor nas ISO com POIs obtidos por autocalibração

Programa	REMQ (m)			REMQ (GSD)		
	X ₀	Y ₀	Z ₀	X ₀	Y ₀	Z ₀
Erdas Imagine	0,517	0,573	0,061	18,143	20,101	2,154
CALIBRAV	0,263	0,373	0,044	9,215	13,075	1,535

Fonte: Autora (2021)

Analisando os resultados da Tabela 4, observa-se que o REMQ dos resíduos nas componentes horizontais X₀ e Y₀ resultantes do experimento no programa Erdas Imagine apresentaram valores aproximadamente 5 vezes maiores que a precisão assumida *à priori* conforme a incerteza do GNSS-PPK de 10 cm. Já no experimento do CALIBRAV, o resultado dos resíduos nessas componentes permaneceu em torno de 3 vezes o valor de 10 cm. Nesse sentido, pode-se perceber que nos ajustamentos com Orientação Integrada de Sensores por processos fotogramétricos tradicionais, a injunção de posição estabelecida para as medidas diretas da posição do sensor referentes às coordenadas X₀ e Y₀ do CP não corresponderam à magnitude dos resíduos nessas coordenadas. Esse resultado indica a possibilidade de que os pesos dessas medidas podem estar superestimados no ajustamento, isto é, que provavelmente

as observações diretas da posição do sensor, planimétricas, foram determinadas pelo GNSS-PPK com uma incerteza superior à 10 cm.

Ainda com base na Tabela 4, é interessante observar que o REMQ dos resíduos na componente vertical (Z_0), nos experimentos realizados em ambos os programas, resultou em valores consideravelmente inferiores (6,1 cm e 4,4 cm) ao assumido inicialmente, conforme a precisão nominal do equipamento (20 cm). Como os POIs fixados nesses processamentos são provenientes da autocalibração no *Metashape* em que foram utilizadas também as medidas diretas da posição do sensor, a alta correlação existente entre a distância focal (c) e a coordenada altimétrica do CP (Z_0), possibilitou que incertezas presentes na determinação dessa componente de posição do sensor tenham sido modeladas pela distância focal. Desse modo, nos processamentos com Orientação Integrada do Sensor sem pontos de apoio em que foram utilizados os POIs da autocalibração, os resíduos na coordenada altimétrica do CP se mantiveram inferiores à precisão do GNSS-PPK, de modo análogo ao resultado do REMQ dos resíduos desta coordenada (Z_0) no experimento de autocalibração (1,7 cm), apresentado na Tabela 1.

Em seguida, para investigar a acurácia posicional desses experimentos, foram utilizados 12 pontos de verificação. Na Tabela 5 são expostos os valores de REMQ das discrepâncias nas coordenadas X, Y e Z desses pontos, enfatizando também a REMQ planimétrica (XY).

Tabela 5 – REMQ das discrepâncias nos pontos de verificação nas ISO com POIs obtidos por autocalibração

Programa	REMQ (m)				REMQ (GSD)	
	X	Y	XY	Z	XY	Z
Erdas Imagine	0,181	1,001	1,017	0,721	35,686	25,308
CALIBRAV	0,167	0,876	0,892	0,675	31,303	23,699

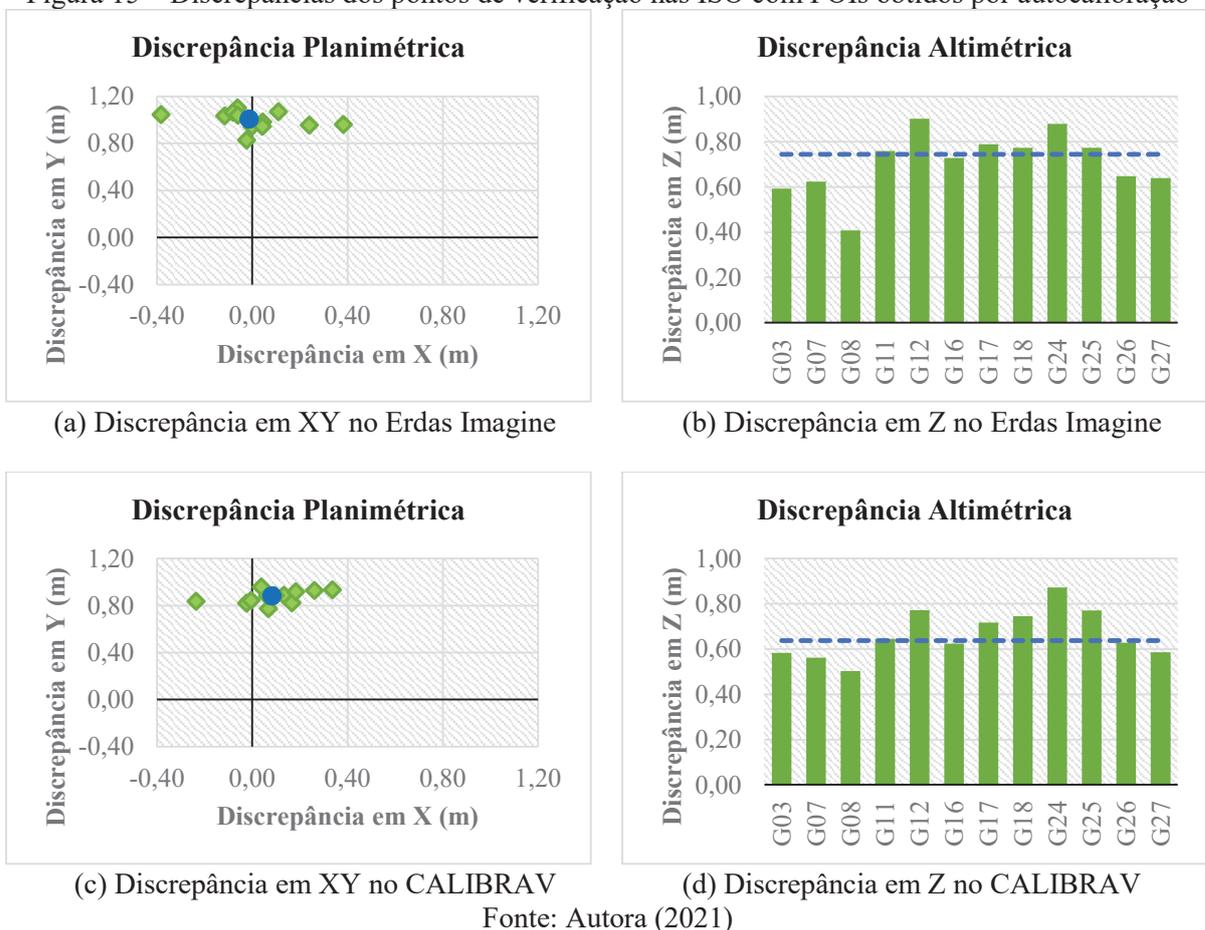
Fonte: Autora (2021)

Segundo os resultados de REMQ das coordenadas horizontais nos dois experimentos com Fotogrametria tradicional, é possível analisar que a discrepância na componente Y foi substancialmente maior que na componente X, assim como nos resíduos do experimento sem pontos de apoio (Tabela 3). Nesse caso, o valor de REMQ da resultante planimétrica foi majoritariamente contribuído pelo erro na direção Y, mantendo-se aproximadamente entre 0,9 m (CALIBRAV) e 1 m (Erdas). Em relação à coordenada altimétrica, os valores de REMQ nos experimentos se mantiveram em torno de 70 cm de erro, apresentando valor inferior ao erro planimétrico em ambos os experimentos. Ainda analisando as discrepâncias nos pontos de verificação, observa-se que os resultados do ajustamento no CALIBRAV foram melhores que

no Erdas Imagine para todas as componentes tridimensionais, indicando que esse programa permitiu realizar uma Orientação Integrada de Sensores com maior exatidão posicional.

Assim, com o intuito de investigar a presença de erros sistemáticos nesses procedimentos fotogramétricos é preciso analisar mais especificamente tendências nas discrepâncias dos 12 de pontos de apoio. Os gráficos das Figuras 15 (a) e (b) mostram as discrepâncias, respectivamente, nas componentes horizontais e vertical para o experimento de ISO no Erdas Imagine, com o valor médio indicado em azul. Da mesma maneira, nas Figuras 15 (c) e (d) são apresentadas as discrepâncias planimétricas e altimétricas do processamento no CALIBRAV.

Figura 15 – Discrepâncias dos pontos de verificação nas ISO com POIs obtidos por autocalibração



Para o experimento no Erdas Imagine, baseado na Figuras 15 (a), percebe-se que as discrepâncias na componente X estão bem distribuídas, com média próxima a zero, indicando a ausência de erros sistemáticos. No entanto, na coordenada Y é notória a tendência positiva nas discrepâncias, com valor médio de cerca de 1 m. Em relação à componente vertical Z, a

Figura 15 (b) revela também um erro sistemático positivo nas discrepâncias, com magnitude de aproximadamente 70 cm.

Considerando a Figura 15 (c) com as discrepâncias planimétricas do processamento no CALIBRAV, a coordenada X apresenta um pequeno deslocamento positivo da média em relação ao eixo, apresentando-se em torno de 10 cm, enquanto a coordenada Y possui menor dispersão dos dados, mas com erro sistemático consideravelmente alto, próximo de 80 cm. Analisando a Figura 15 (d), as discrepâncias na componente Z são distribuídas com baixa dispersão, mas com tendência positiva perceptível mantendo o valor médio em cerca de 60 cm.

Esses resultados permitem inferir que os valores de REMQ das discrepâncias nos pontos de verificação para as componentes Y e Z foram significativamente altos nos dois experimentos com Fotogrametria tradicional por conta de erros sistemáticos não modelados no ajustamento. Assim, essas tendências positivas podem ser oriundas da estimação de POIs na autocalibração do *Metashape*, devido principalmente a ausência de pontos de apoio nesse processamento. No tocante à performance da Orientação Integrada de Sensores, foi possível notar que, com exceção da coordenada X, o experimento no programa CALIBRAV apresentou tendências de menor magnitude, bem como valores de REMQ dos resíduos e das discrepâncias menores em todas as componentes tridimensionais.

Em comparação com a autocalibração sem pontos de apoio realizada no *Metashape* com a integração de medidas diretas da posição do sensor pelo GNSS-RTK, os processamentos de ISO com POIs da autocalibração fixos e a adição das coordenadas do CP com injunções de posição atingiu resultados piores de exatidão posicional. No experimento realizado no Erdas Imagine, houve redução de 20% na exatidão planimétrica, com REMQ de 0,849 m (Tabela 3) na autocalibração para 1,017 m na ISO, bem como de 21% na acurácia planimétrica, com variação do REMQ de 0,595 m para 0,721 m. Já na ISO processada no CALIBRAV, o REMQ planimétrico passou a ser 0,892 m e altimétrico 0,675 m, respectivamente com decréscimo de 5% e 14% em relação à exatidão da autocalibração.

Deve ser levado em consideração que os POIs utilizados como fixos nos procedimentos fotogramétricos tradicionais foram determinados segundo o processo de autocalibração no *Metashape*, o qual utiliza o *Structure-from-Motion* para estimação dos parâmetros de orientação interior e exterior. Assim, é esperado que esses parâmetros resultem em melhores acurácias posicionais por serem otimizados para a extração de informações com SfM. Entretanto, vale destacar que os resultados no CALIBRAV foram bem próximos aos encontrados no *Metashape*,

indicando que os POIs estimados nessa autocalibração podem ser utilizados também em processamentos com programas de Fotogrametria tradicional e atingir resultados similares.

Apesar disso, os erros sistemáticos presentes nas componentes tridimensionais nos experimentos de autocalibração e ISO utilizando integração com observações diretas da posição do CP, sem pontos de apoio, revelam a necessidade de investigações mais contundentes visando melhorar a qualidade da extração de informações métricas. Para isso, foram realizados experimentos com calibração *in situ* (CALIBRAV) e autocalibração (*Metashape*) incluindo pontos de apoio, os quais serão discutidos nas subseções seguintes.

4.3 Autocalibração Com Pontos de Apoio no Metashape

Seguindo com a aplicação de autocalibração para extração de geoinformações, foram realizados processamentos de autocalibração no *Metashape* com pontos de apoio, executados conforme disposto em 3.2.3, variando a quantidade de pontos de apoio em 1, 4, 5 e 6 pontos. Para todos esses experimentos, as coordenadas do CP utilizadas foram medidas diretamente com o GNSS-PPK e adicionadas com injunções de posição, segundo a precisão nominal do equipamento, isto é, 10 cm para as coordenadas X e Y e 20 cm para a coordenada Z. Desse modo, com o objetivo de verificar os resíduos dos ajustamentos, a Tabela 6 exibe os valores de REMQ das coordenadas do CP e dos pontos de apoio terrestre usados em cada ajustamento.

Tabela 6 - REMQ dos resíduos na autocalibração com pontos de apoio

Qtd. de pontos de apoio	REMQ nos POEs (m)			REMQ nos Pontos de Apoio (m)			REMQ nos POEs (GSD)			REMQ nos Pontos de Apoio (GSD)		
	X ₀	Y ₀	Z ₀	X	Y	Z	X ₀	Y ₀	Z ₀	X ₀	Y ₀	Z ₀
1	0,152	0,140	0,394	0,012	0,014	0,000	5,328	4,901	13,829	0,405	0,501	0,007
4	0,204	0,582	0,097	0,057	0,045	0,049	7,172	20,419	3,410	2,000	1,589	1,727
5	0,216	0,633	0,100	0,054	0,045	0,048	7,582	22,196	3,525	1,889	1,587	1,699
6	0,217	0,630	0,086	0,066	0,047	0,070	7,627	22,118	3,022	2,315	1,651	2,455

Fonte: Autora (2021)

Com base nos resíduos das coordenadas do CP presentes na Tabela 6, o REMQ de X₀ permanece com pequena variação entre os experimentos analisados com diferentes distribuições de pontos de apoio, com valores próximos ao da precisão adotada à *priori* (10 cm). Em contrapartida, o REMQ da coordenada Y₀ apresenta aumento com a adição de pontos de apoio, chegando ao valor de 0,633m no experimento com 5 pontos de apoio, resultado 6x superior ao desvio-padrão de 10 cm assumido inicialmente. Esse resíduo indica que a componente Y₀ pode possuir algum erro sistemático, assim como nos resultados dos

experimentos anteriores. Já o REMQ de Z_0 melhora no experimento com 4 pontos de apoio em relação ao experimento com 1 ponto, mas se mantém estável para os experimentos com 4, 5 e 6 pontos, com valor inferior à precisão de 20 cm adotada *a priori*.

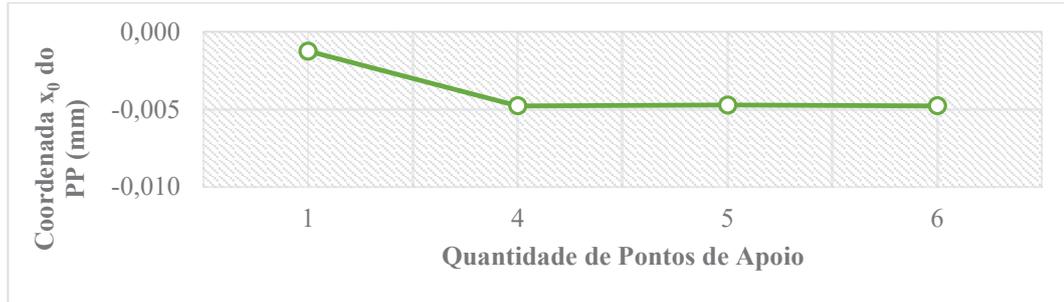
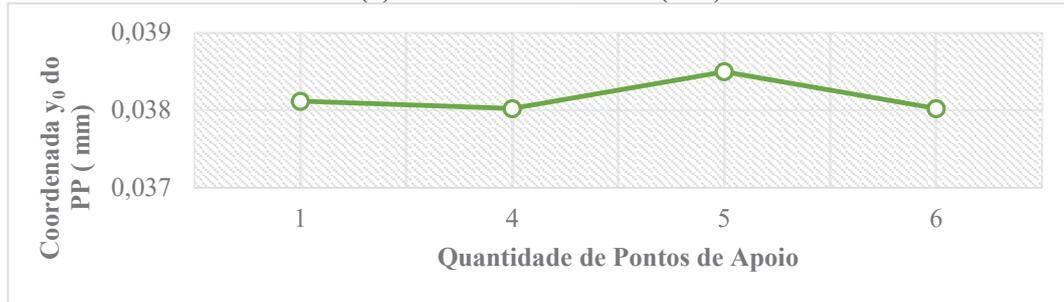
Quanto ao REMQ dos resíduos nos pontos de apoio, no experimento com 1 ponto o REMQ de X e Y é de aproximadamente 1 cm, enquanto o REMQ de Z apresenta valor bem próximo de zero. No processamento com 4 pontos, os resíduos das três coordenadas apresentam REMQ de cerca de 5 cm. É interessante observar que com a adição de mais pontos de apoio, o REMQ das coordenadas continua próximo aos valores obtidos com 4 pontos, indicando que os resíduos se estabilizam.

Como a nuvem esparsa de pontos pode conter erros não-lineares oriundos da autocalibração realizada no SfM, uma etapa opcional pode ser realizada após a adição de pontos de apoio visando refinar os parâmetros da câmara e as coordenadas dos pontos fotogramétricos. O *Metashape* permite que seja executado um novo ajustamento considerando a minimização da soma do quadrado dos erros de reprojeção dos pontos de ligação e dos erros de referenciamento dos pontos de apoio. Assim, esse procedimento de refinamento dos parâmetros foi realizado em todos os experimentos com diferentes distribuições de pontos de apoio, resultando em diferentes POIs para cada experimento. Os valores encontrados para distância focal são dispostos na Figura 16 (a), e as coordenadas x_0 e y_0 do PP são apresentadas respectivamente nas Figuras 16 (b) e (c). Os demais Parâmetros de Orientação Interior, referentes aos coeficientes de distorção de lentes, não apresentaram variações significativas entre os experimentos analisados e, portanto, não foram evidenciados nos resultados preliminares deste estudo.

Figura 16 – POIs refinados na autocalibração com pontos de apoio



(a) Distância focal em mm

(b) Coordenada x_0 do PP (mm)(c) Coordenada y_0 do PP (mm)

Fonte: Autora (2021)

Segundo os resultados da Figura 16 (a), a distância focal varia cerca de 0,025 mm entre o experimento com 1 ponto de apoio e o experimento com 4 pontos de apoio, mas se mantém estável com valor de aproximadamente 9,010 mm para os experimentos com 4, 5 e 6 pontos de apoio. Para as coordenadas do ponto principal, a variação sofrida entre todos os experimentos foi inferior à 0,005 mm para o valor de x_0 e inferior à 0,001 mm para o valor de y_0 .

Comparando a variação de 0,025 mm entre as distâncias focais calculadas nos processamentos com diversas quantidades de pontos de apoio e a variação de 0,140 mm entre as distâncias focais calculadas nas autocalibrações com diferentes precisões nas medidas diretas da posição do sensor, é possível perceber que os valores estimados oscilaram menos com mudanças na geometria de distribuição do apoio no ajustamento. Esse resultado corrobora com o esperado, pois as imprecisões na componente altimétrica da posição do sensor (Z_0) foram absorvidas pela distância focal no experimento com GNSS de navegação, devido à alta correlação existente entre esses parâmetros. Os POIs analisados (f , x_0 , y_0) são correlacionados com as coordenadas do CP e nos experimentos com pontos de apoio a posição do sensor foi fixada por inunção de peso, procedimento que reduz essa correlação. Assim, as diferentes distribuições de pontos de apoio provocam pouca influência na estimação dos POIs.

Em seguida, visando analisar a qualidade da extração de informações tridimensionais obtidas com autocalibração utilizando pontos de apoio terrestres, a Tabela 7 exhibe os valores de REMQ das discrepâncias nos pontos de verificação. Os resultados de REMQ planimétricos

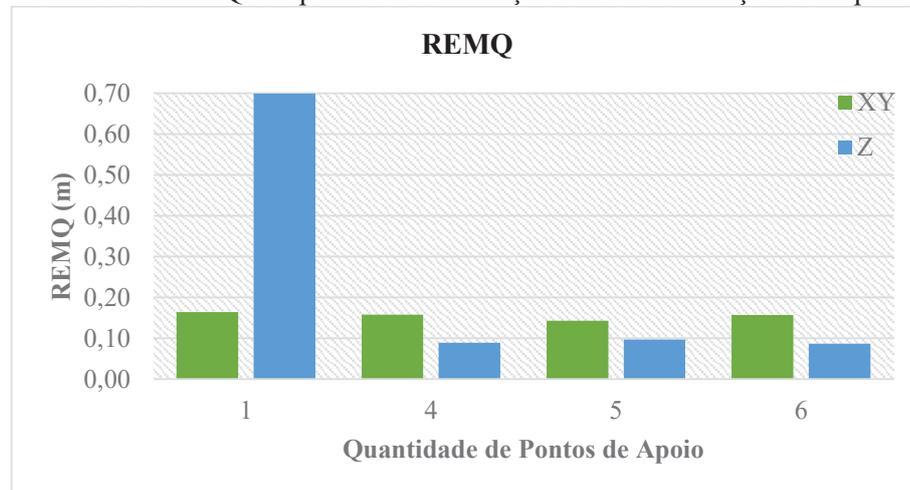
e altimétricos para as diferentes configurações de pontos de apoio são evidenciados no gráfico da Figura17.

Tabela 7 - Discrepâncias nos pontos de verificação das autocalibrações com pontos de apoio

Qtd. de pontos de Apoio	REMQ (m)				REMQ (GSD)	
	X	Y	XY	Z	XY	Z
1	0,149	0,068	0,164	0,699	5,754	24,532
4	0,127	0,093	0,158	0,089	5,540	3,138
5	0,132	0,056	0,143	0,097	5,031	3,407
6	0,141	0,070	0,157	0,087	5,524	3,043

Fonte: Autora (2021)

Figura 17- Gráfico de REMQ dos pontos de verificação das autocalibrações com pontos de apoio



Fonte: Autora (2021)

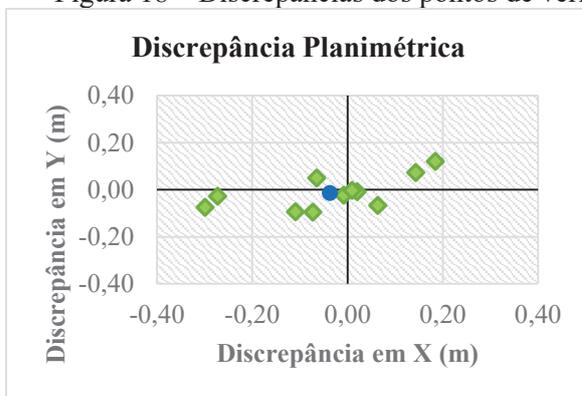
Analisando a REMQ das discrepâncias dos processamentos é possível perceber que a exatidão planimétrica praticamente não sofreu variação entre os experimentos. Quanto as componentes altimétricas, os valores de REMQ do processamento com 1 ponto de apoio foi consideravelmente maior em relação aos demais, variando em cerca de 60 cm quando comparado aos experimentos com 4, 5 e 6 pontos de apoio.

Em relação ao experimento de autocalibração com receptor GNSS-PPK sem pontos de apoio, o processamento com 1 ponto de apoio apresentou ganho de 81% na acurácia planimétrica, com 4 pontos de 81%, com 5 pontos de 83% e com 6 pontos ganho de 81%. Nesse sentido, todos os experimentos apresentaram melhora equivalente (cerca de 80%), de modo que o acréscimo de apenas único ponto de apoio terrestre, na região central do bloco, já apresentou uma melhora significativa de exatidão planimétrica, visto que o valor de REMQ nos pontos de verificação passou de 0,849 m no processamento sem pontos de apoio para 0,164 m no processamento com um ponto.

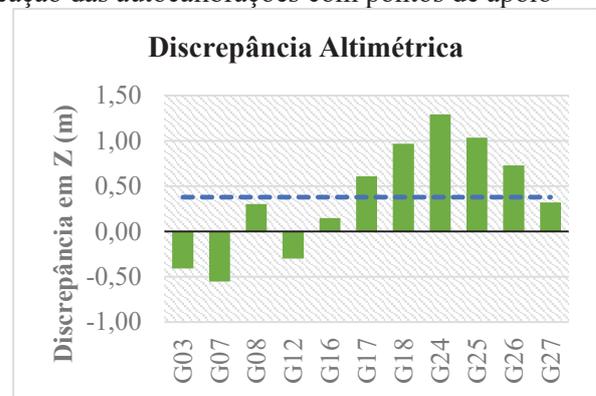
Analisando a componente altimétrica, a utilização de um ponto de apoio na região central do bloco gerou uma piora da exatidão quando comparada aos resultados da autocalibração sem pontos de apoio terrestres, pois o REMQ nos pontos de verificação aumentou de 0,595 m para 0,699 m, representando um decréscimo de 18% na acurácia vertical. Para os experimentos com 4, 5 e 6 pontos de apoio, o aumento na exatidão altimétrica em relação ao processamento sem pontos de apoio foi, respectivamente, de 85%, 84% e 85%. Baseado nesse resultado, a distribuição com 4 pontos de apoio apresentou exatidão altimétrica equivalente às distribuições com 5 e 6 pontos de apoio. Assim, a adição de 4 pontos de apoio na autocalibração já apresenta um acréscimo considerável na acurácia altimétrica, considerando que o valor de REMQ nos pontos de verificação reduziu de 0,595 m no experimento sem pontos de apoio terrestre para 0,089 m com 4 pontos.

Com o intuito de investigar de modo mais específico as discrepâncias nos pontos de verificação para os experimentos com diferentes configurações de pontos de apoio, os gráficos das Figuras 18 (a), (c), (e) e (g) apresentam as discrepâncias planimétricas e das Figuras 18 (b), (d), (f) e (h) as discrepâncias altimétricas, todas em torno do seu valor médio, destacado em azul.

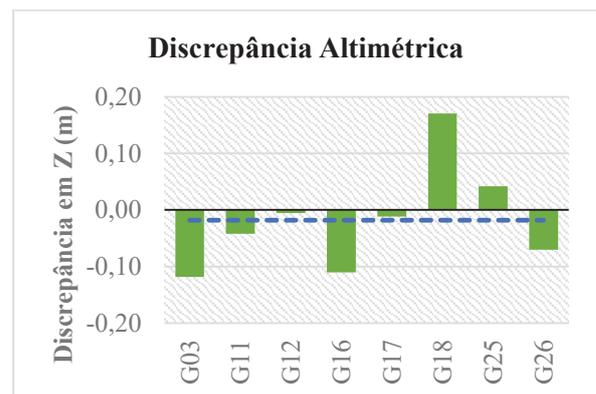
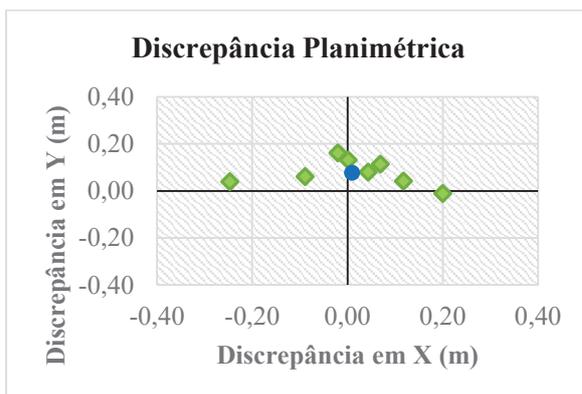
Figura 18 – Discrepâncias dos pontos de verificação das autocalibrações com pontos de apoio



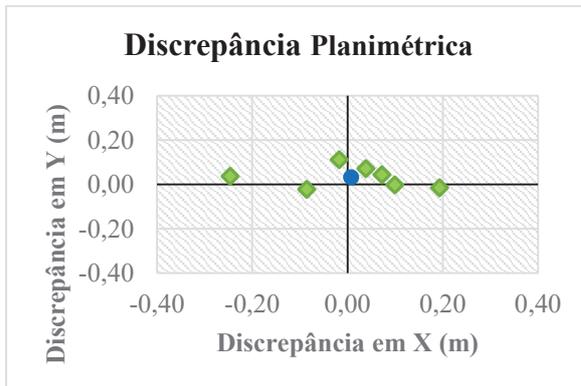
(a) Discrepância em XY com 1 ponto de apoio



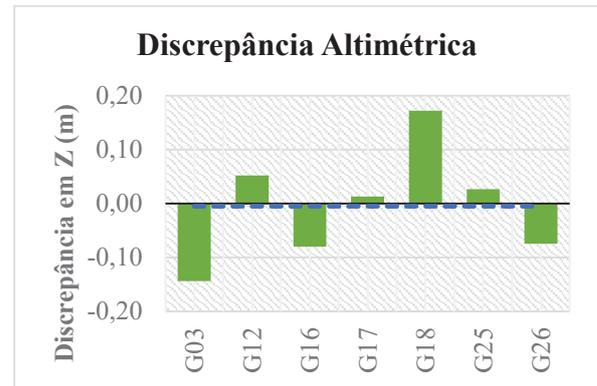
(b) Discrepância em Z com 1 ponto de apoio



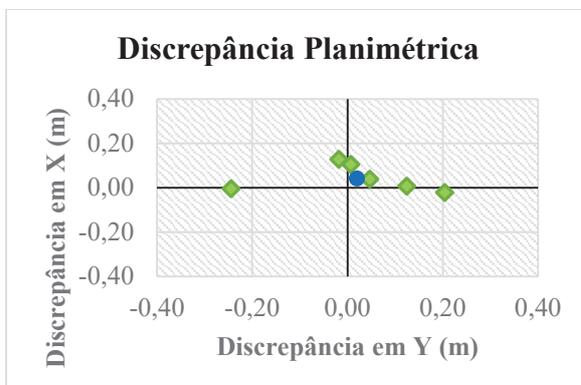
(c) Discrepância em XY com 4 pontos de apoio



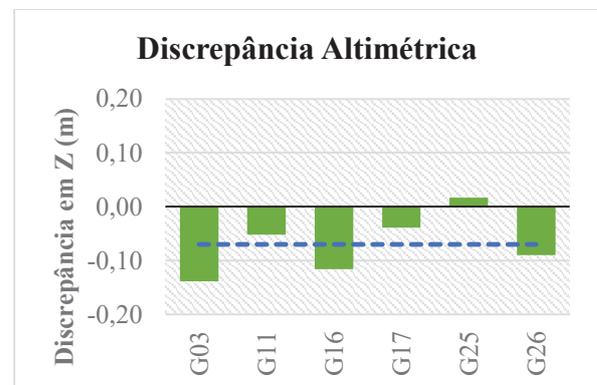
(d) Discrepância em Z com 4 pontos de apoio



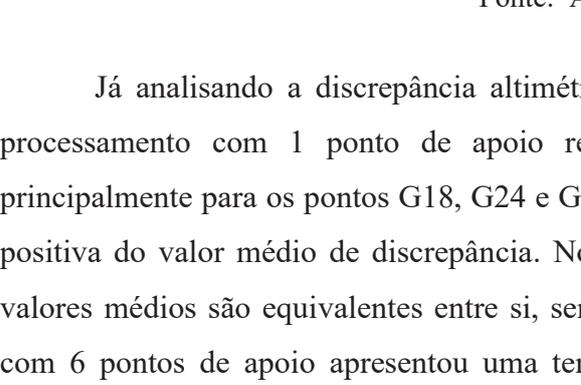
(e) Discrepância em XY com 5 pontos de apoio



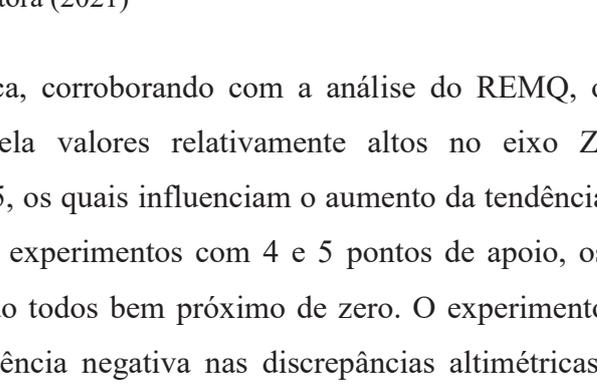
(f) Discrepância em Z com 5 pontos de apoio



(g) Discrepância em XY com 6 pontos de apoio



(h) Discrepância em Z com 6 pontos de apoio



Fonte: Autora (2021)

Já analisando a discrepância altimétrica, corroborando com a análise do REMQ, o processamento com 1 ponto de apoio revela valores relativamente altos no eixo Z, principalmente para os pontos G18, G24 e G25, os quais influenciam o aumento da tendência positiva do valor médio de discrepância. Nos experimentos com 4 e 5 pontos de apoio, os valores médios são equivalentes entre si, sendo todos bem próximo de zero. O experimento com 6 pontos de apoio apresentou uma tendência negativa nas discrepâncias altimétricas, deslocando o valor médio para aproximadamente -7 cm. Apesar desse resultado inesperado, analisando as discrepâncias nos pontos de verificação, a REMQ altimétrica desse experimento (8,7 cm) apresentou o menor valor dentre as distribuições de pontos de apoio analisadas, indicando que essa tendência não influenciou significativamente na exatidão altimétrica do experimento.

Em relação aos processamentos de autocalibração com medidas diretas do CP por GNSS-RTK e diferentes distribuições de pontos de apoio, é possível observar que, com exceção do processamento com um único ponto, os demais experimentos apresentaram resultados similares em todas as análises preliminares realizadas. Para o bloco de imagens analisado,

considerando apenas a adição de pontos de apoio terrestre, o mínimo de 4 pontos de apoio dispostos nas extremidades do bloco já resulta em um aumento considerável na exatidão do experimento sem pontos de apoio, com ganho de 81% na acurácia planimétrica e 85% na altimétrica, além de assegurar a eliminação de tendências nas discrepâncias dos pontos de verificação.

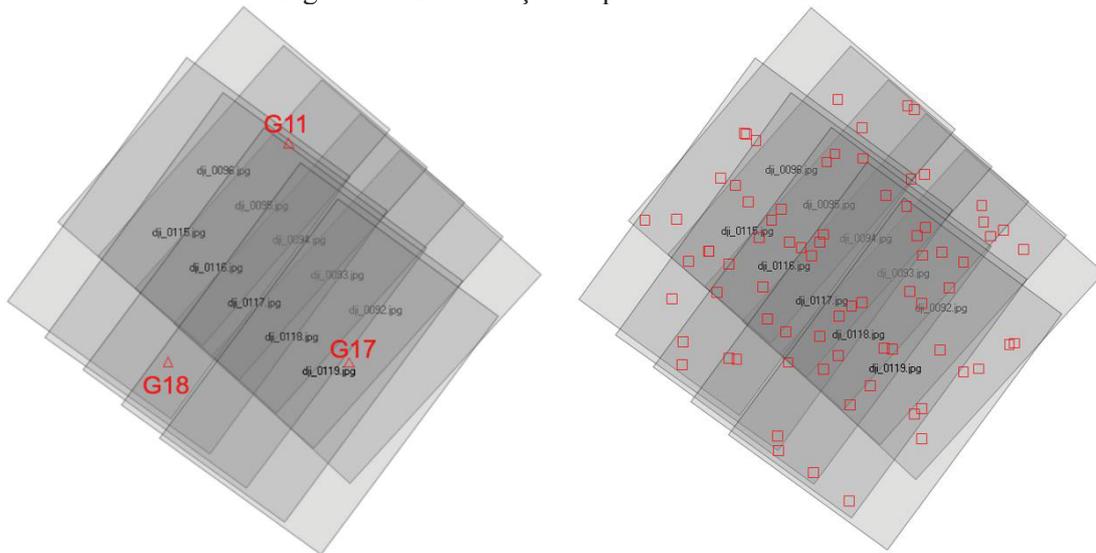
4.4 Calibração *In Situ*

Visando melhorar a qualidade da extração tridimensional por meio da Orientação Integrada de Sensores utilizando observações diretas da posição do sensor pelo receptor GNSS-PPK de alta precisão, foi proposta a realização de uma calibração de câmaras *in situ* com um sub-bloco de 10 imagens localizado na porção central no bloco. Seguindo as características definidas em 3.2.4, o sub-bloco escolhido inclui duas faixas de voo em sentidos opostos com 5 imagens em cada e três pontos de apoio, todos visíveis em pelo menos duas imagens.

Para a realização desse procedimento fotogramétrico foi usado o programa CALIBRAV da Universidade Federal do Paraná, cujo modelo matemático para calibração de câmaras consiste nas equações de colinearidade com parâmetros adicionais (Equação 5), sendo estes: distância focal (c), coordenadas do ponto principal (x_0 , y_0), coeficientes de distorção radial simétrica (k_1 , k_2 , k_3) e coeficientes de distorção descentrada (p_1 , p_2). Nesse experimento realizou-se a condição mínima de pontos para fixar o referencial no terreno, isto é, dois pontos (G11 e G17) considerados como apoio tridimensional (X, Y e Z) e um ponto (G18) com apoio vertical (Z).

As medidas dos pontos de ligação necessários para a realização da calibração *in situ* foram desempenhadas no Erdas Imagine de maneira automática, com informações iniciais de distância focal fornecida pelo fabricante (8,8 mm) e da posição do sensor observada pelo GNSS-PPK, totalizando 76 pontos homólogos. Nos pontos de apoio, as medidas foram realizadas de maneira manual e monoscópicas nas imagens. Ainda no Erdas, foram calculadas as coordenadas aproximadas dos pontos de ligação para que pudessem ser utilizados como parâmetros iniciais na calibração. As configurações de pontos de apoio e pontos de ligação no sub-bloco são exibidas nas Figuras 19 (a) e (b), respectivamente.

Figura19 – Distribuição de pontos no sub-bloco



(a) Pontos de apoio medidos manualmente (b) Pontos de ligação medidos de modo autônomo
 Fonte: Autora (2021)

Em seguida, foi editado um arquivo de entrada para o programa CALIBRAV com os seguintes dados: (1) fotocoordenadas dos pontos de apoio e ligação no sistema digital em milímetros, (2) as respectivas coordenadas aproximadas desses pontos no referencial geodésico (3) a posição do sensor medida pelo receptor de alta precisão, (4) os ângulos de orientação estimados na autocalibração sem pontos de apoio no *Metashape*, (5) o valor inicial de distância focal de 8,8 mm, (6) a variância das coordenadas dos pontos de apoio e da posição do sensor conforme a precisão nominal dos equipamentos, (7) a variância das medidas na imagem, considerando a incerteza de $\frac{1}{2}$ pixel, (8) variância *à priori* do ajustamento igual a 1.

Para a calibração da câmara, foram consideradas as coordenadas dos pontos de apoio e a posição do CP das imagens como observações adicionais com injeção de posição. Inicialmente foram estimados os 8 POIs conforme o modelo de Conrady-Brown. No entanto, com o intuito de investigar a significância dos parâmetros para modelagem da condição de colinearidade na câmara, primeiramente foram analisados os desvios-padrão e os valores calculados dos coeficientes de distorção das lentes. Para a calibração com todos os parâmetros adicionais, a variância *à posteriori* estimada no ajustamento foi de 1,35.

Em seguida, é necessário realizar um controle de qualidade das medidas dos pontos homólogos nas imagens. Nesse sentido, foi adotado o valor de 3 pixels (aprox. 7 μm) como tolerância máxima para os resíduos nas fotocoordenadas dos pontos, eliminando as observações que estivessem com resíduos acima desse limiar. Com base nesse critério, apenas uma medida foi removida, sendo realizada uma nova calibração após a eliminação dessa observação, a qual reduziu o valor de *variância à posteriori* para 1,19.

O valor encontrado para o coeficiente p_1 foi de $6,336E-05 \text{ mm}^{-1}$ e de p_2 foi de $7,381E-07 \text{ mm}^{-1}$, com desvios-padrão de $1,190E-05 \text{ mm}^{-1}$ e $9,426E-06 \text{ mm}^{-1}$, respectivamente. Nesse caso, a incerteza na determinação desses coeficientes foi bem alta em relação ao valor do próprio parâmetro. Isso indica que provavelmente estes parâmetros não são significativos para a câmera utilizada. Assim, devido à alta correlação (66%) do parâmetro p_1 com a coordenada do ponto principal x_0 e do parâmetro p_2 com a coordenada y_0 do ponto principal (72%), foi realizado um segundo experimento atribuindo valor nulo para p_1 e p_2 , considerando que a distorção modelada por esses parâmetros seria absorvida e modelada por x_0 e y_0 .

Com novo experimento fixando o valor de p_1 e p_2 como igual a zero, realizou-se uma nova calibração com as mesmas características da anterior no CALIBRAV. Nesse ajustamento a *variância à posteriori* permaneceu como 126, indicando que anular os coeficientes p_1 e p_2 não resultou grandes variações nos resíduos do ajustamento e, conseqüentemente, os parâmetros realmente não era significativo para recuperar a geometria de formação da imagem do sensor utilizado. De maneira análoga ao processo anterior, foram analisadas as significâncias dos demais coeficientes de distorção de lentes, considerando os valores dos parâmetros, a incerteza de sua estimação no ajustamento, as correlações com os demais POIs e a *variância a posteriori* antes e após fixar seus valores como nulos na calibração.

Ao fim desse processo, k_1 foi o único coeficiente de distorção de lentes mantido no ajustamento, resultando em uma calibração com apenas quatro parâmetros de orientação interior: distância focal (c), coordenadas do ponto principal (x_0, y_0) e coeficiente de distorção radial simétrica (k_1). Vale destacar que, comparado ao experimento em que os 8 parâmetros foram estimados, a *variância à posteriori* da calibração com 4 POIs variou muito pouco, de 1,19 para 1,27. Portanto, os resultados desse ajustamento foram considerados, então, como os valores finais dos POIs estimados por calibração *in situ* com sub-bloco de imagem. Os parâmetros estimados e seus respectivos desvios-padrão são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – POIs estimados na calibração *in situ* com sub-bloco

POIs	Valor	Desvio-padrão
c (mm)	9,005	0,007
x_0 (mm)	-0,021	0,003
y_0 (mm)	-0,046	0,002
k_1 (mm ⁻²)	8,22E-06	6,81E-06

Fonte: Autora (2021)

Outro resultado importante da calibração *in situ* consiste na análise dos resíduos das coordenadas do CP, os quais foram injuncionadas segundo a precisão nominal de 10 cm para as componentes X_0 e Y_0 e 20 cm para a componente Z_0 . Nesse experimento, o valor de Raiz do Erro Médio Quadrático dos resíduos foi de 13,4 cm para X_0 , 29,6 cm para Y_0 e 16,0 cm para Z_0 . Comparando com o valor de precisão assumido inicialmente para essas medidas diretas da posição do sensor, o resíduo de Y_0 apresentou REMQ 3 vezes maior, corroborando com os resultados das autocalibrações com pontos de apoio realizadas no *Metashape* (Tabela 6). Em contrapartida, o REMQ das coordenadas X_0 e Z_0 foram próximos à incerteza assumida *à priori*.

Em seguida, os parâmetros de orientação interior estimados na calibração *in situ* serão utilizados em experimentos posteriores de Orientação Integrada de Sensores. Além disso, os REMQ dos resíduos das coordenadas do CP serão adotados como novos valores de precisão para as medidas diretas da posição do sensor nesses experimentos de ISO, considerando que por terem sido determinados *in situ*, podem ser mais representativos do que a precisão nominal do equipamento. Desse modo, têm-se o intuito de investigar se é possível melhorar a acurácia da extração de informações tridimensionais em relação aos experimentos com POIs da autocalibração sem pontos de apoio realizado no *Metashape*.

4.5 Experimentos no Metashape com POIs obtidos por Calibração *In Situ*

Para a analisar se os parâmetros de orientação interior determinados na calibração *in situ* com o sub-bloco de imagens permitem obter uma nuvem de pontos com maior qualidade posicional que a autocalibração sem pontos de apoio e apenas com a distância focal de fábrica como valor inicial, foram realizados dois experimentos no *Metashape*. O primeiro consiste na Orientação Integrada de Sensores utilizando os POIs da calibração *in situ* como parâmetros fixos no ajustamento. Para isso, foi definida uma pré-calibração no *Metashape*, sendo necessário realizar a conversão dos valores em milímetros (Tabela 8) para pixels. Ainda referente a esse experimento, as coordenadas do CP utilizadas como observações adicionais foram injuncionadas conforme o REMQ dos resíduos das respectivas coordenadas nas imagens do sub-bloco.

Posteriormente, realizou-se um experimento de autocalibração considerando os POIs definidos na calibração *in situ* como parâmetros iniciais sem injunção, para serem estimados no *Metashape*. De maneira similar ao processamento da ISO, as medidas diretas do sensor também foram adicionadas com injunção de posição referente ao REMQ dos resíduos na calibração *in situ*. A principal finalidade destes experimentos é analisar se a utilização dos POIs da pré-

calibração permite alcançar melhores acurácias na extração de informações métricas se forem usados como parâmetros fixos ou com parâmetros aproximados estimados na calibração *in situ*.

A Tabela 9 expõe os resultados de Raiz do Erro Médio Quadrático para as componentes da posição do sensor (X_0 , Y_0 , Z_0) nos processamentos com POIs oriundos da calibração *in situ* como fixos no ajustamento e como parâmetros aproximados.

Tabela 9 – REMQ dos resíduos na posição do sensor dos experimentos no *Metashape* com POIs obtidos por calibração *in situ*

POIs calibração <i>in situ</i>	REMQ (m)			REMQ (GSD)		
	X_0	Y_0	Z_0	X_0	Y_0	Z_0
Fixos	0,757	0,530	0,380	26,575	18,589	13,329
Iniciais	0,134	0,119	0,017	4,718	4,174	0,597

Fonte: Autora (2020)

Com base nos resultados REMQ dos resíduos nas coordenadas do CP, é possível perceber que no experimento de Orientação Integrada de Sensores, isto é, em que os POIs são fixos, os valores de REMQ para todas as componentes da posição do sensor são superiores aos valores assumidos *à priori*. Nesse caso, a coordenada X_0 foi a que apresentou maior diferença entre a incerteza assumida inicialmente (13,4 cm), apresentando valor quase 6 vezes maior. Já a REMQ das coordenadas Y_0 e Z_0 foi aproximadamente o dobro das precisões assumidas *à priori* de 29,6 cm e 16,0 cm, respectivamente. Esses resultados revelam que as imprecisões nas medidas diretas da posição do sensor não puderam ser absorvidas pelos POIs, de modo análogo às ISO realizados em 4.2, corroborando com a suposição de que as coordenadas do CP foram determinadas com incertezas maiores do que a precisão nominal do GNSS-PPK fornecida pelo fabricante.

No tocante ao experimento de autocalibração, é perceptível a discrepância para os resíduos da ISO, de modo que a REMQ nas coordenadas foi menor do que o desvio-padrão adotado inicialmente para as coordenadas Y_0 e Z_0 . Para a componente X_0 , a REMQ dos resíduos foi a mesma da REMQ na calibração *in situ*, considerado nesse experimento como precisão das medidas do GNSS-PPK. É interessante perceber que, apesar da mudança nos valores adotados como incerteza das observações diretas da posição do sensor e da utilização de POIs iniciais oriundos da calibração *in situ*, os resíduos nesse processamento de autocalibração foram equivalentes aos resíduos do experimento com autocalibração realizado em 4.1, com REMQ de 13,1cm, 10,4cm e 1,7 cm para as coordenadas X_0 , Y_0 , Z_0 , respectivamente.

Ademais, também fica evidenciado que no processo de autocalibração do *Metashape*, devido às correlações existentes entre os POEs e POIs ($c - Z$, $x_0 - X_0$, $y_0 - Y_0$), os POIs estimados provavelmente estão absorvendo parcialmente a imprecisão nas medidas das coordenadas do CP, principalmente da coordenada Z_0 cujo resíduo é significativamente inferior (aproximadamente 10 vezes menor) à precisão nominal do equipamento.

Desse modo, seguindo com a análise dos resultados dos experimentos realizados no *Metashape*, na Tabela 10 podem ser observados os valores de REMQ as discrepâncias nos 12 pontos de verificação.

Tabela 10 – REMQ das discrepâncias nos pontos de verificação dos experimentos no *Metashape* com POIs obtidos por calibração *in situ*

POIs calibração <i>in situ</i>	REMQ (m)				REMQ (GSD)	
	X	Y	XY	Z	XY	Z
Fixos	0,653	1,400	1,545	0,584	54,211	20,506
Iniciais	0,279	0,829	0,875	0,556	30,689	19,505

Fonte: Autora (2020)

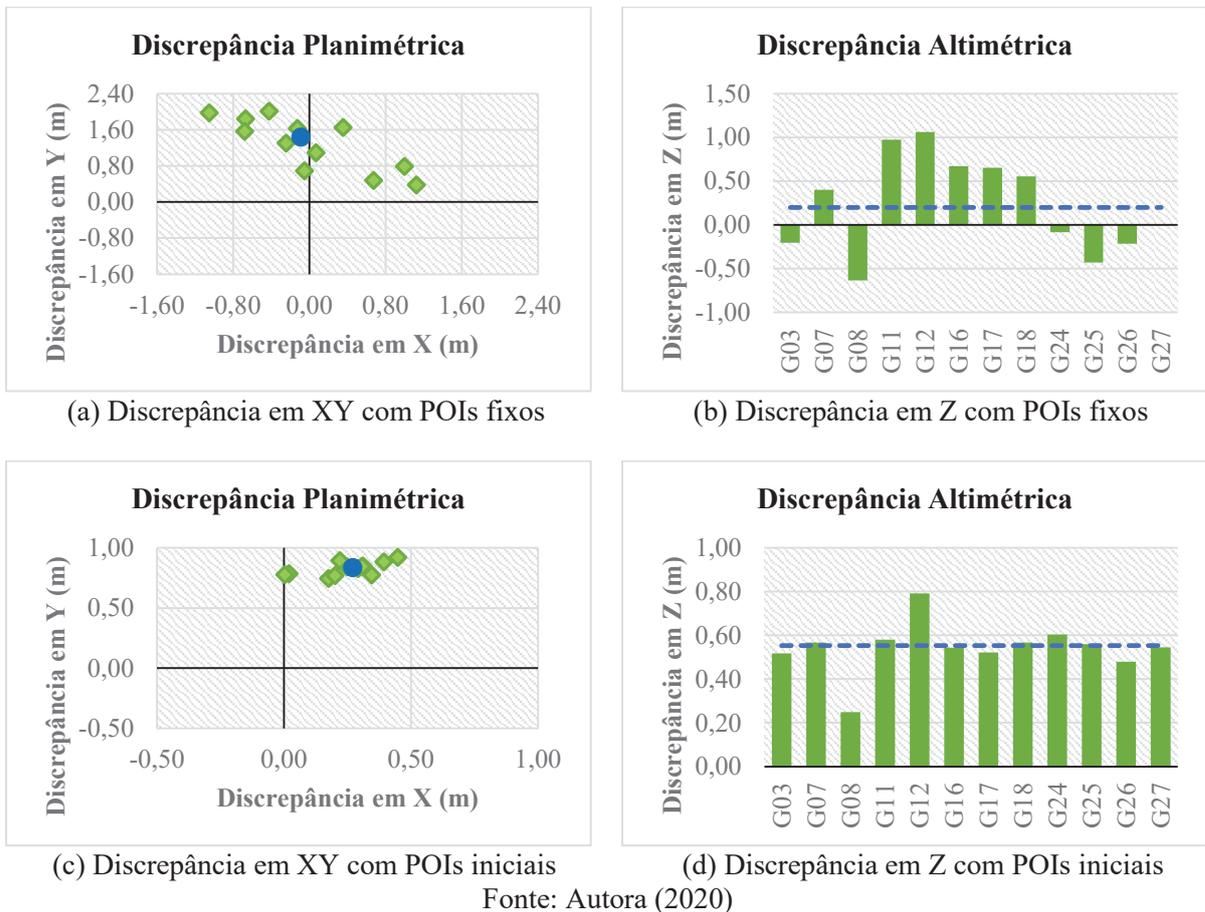
Conforme as REMQs das discrepâncias nos processamentos com POIs fixos e iniciais, é possível perceber visivelmente que a utilização dos POIs da calibração *in situ* como fixos resultou em um erro planimétrico consideravelmente alto na coordenada Y, refletindo em um REMQ planimétrico de 1,545 m. Já no experimento de autocalibração com POIs aproximados, o REMQ da coordenada Y também apresentou valor maior que da coordenada X, mas a resultante planimétrica permaneceu com erro sub-métrico, com 0,875 m. Em relação à componente vertical, o REMQ de ambos foi similar, com valores de inferiores a 60 cm. Desse modo, relativo ao experimento de autocalibração (subseção 4.1) sem POIs pré-calibrados e com as medidas da posição do sensor injuncionadas conforme a precisão do GNSS-PPK, a exatidão da ISO com POIs da calibração *in situ* sofreu decréscimo de 82% em planimetria e 3% de acréscimo em altimetria. Ainda em relação ao experimento de autocalibração sem POIs pré-calibrados, a autocalibração realizada com POIs iniciais oriundos da calibração *in situ* sofreu redução de 3% em acurácia planimetria e aumento de 7% em acurácia altimétrica

Nesse contexto, é possível afirmar que o uso dos POIs e dos resíduos nas coordenadas do CP provenientes da calibração *in situ* não apresentou melhora na qualidade da extração de informações tridimensionais com o processo de Orientação Integrada de Sensores no *Metashape*. Quanto aos processos de autocalibração com e sem parâmetros iniciais, os valores de REMQ das discrepâncias podem ser considerados como equivalentes devido à pequena variação entre seus resultados. Ademais, os parâmetros de orientação interior estimados em

ambas as autocalibrações citadas acima, com exceção da coordenada y_0 do ponto principal, também apresentaram valores bem similares, fator que corrobora para a correspondência entre as acurácias horizontais e verticais.

Por fim, para averiguar se existem tendências consideráveis nas discrepâncias dos 12 pontos de apoio, que possam revelar possíveis erros sistemáticos, os gráficos das Figuras 20 (a) e (b) representam as discrepâncias planimétricas e altimétricas do experimento de ISO fixando os POIs determinados na calibração *in situ*, com suas respectivas médias destacadas em azul. Do mesmo modo, as Figuras 20 (c) e (d) exibem gráficos com as discrepâncias horizontais e verticais da autocalibração com POIs iniciais.

Figura 20 – Discrepâncias dos pontos de verificação nos experimentos no *Metashape* com POIs obtidos por calibração *in situ*



No processamento de Orientação Integrada de Sensores, analisando as discrepâncias planimétricas, a coordenada X apresenta média bem próxima de zero e valores distribuídos em torno do eixo, enquanto a coordenada Y notoriamente possui tendência positiva, representada pelo valor médio de cerca 1,4 m. Quanto às discrepâncias verticais, observa-se que mesmo

distribuídas em torno do eixo Z, existe um erro sistemático de cerca de 20 cm que mantém as discrepâncias majoritariamente positivas.

Baseado no gráfico da Figura 20 (c), o experimento de autocalibração com POIs aproximados possui tendências positivas nas discrepâncias em ambas as componentes horizontais, com valor médio de 30 cm na direção X e 80 cm Y. Já o gráfico da Figura 20 (d) revela que essa autocalibração também apresenta uma tendência positiva na direção Z, com magnitude de aproximadamente 55 cm.

Analisando esses resultados, é possível perceber que a Orientação Integrada de Sensores com POIs da calibração *in situ* permitiu reduzir significativamente a tendência dos dados em X e Z em relação à autocalibração sem pontos de apoio que utiliza como parâmetro inicial apenas a distância focal de fábrica, isto é, o experimento com GNSS-PPK da subseção 4.1 Entretanto, a componente Y apresentou um erro sistemático acima de 1 metro, fator que reduziu substancialmente a qualidade posicional desse experimento de ISO. Por outro lado, o experimento de autocalibração com uso dos POIs da calibração *in situ* como valores iniciais aproximados apresentou resultados similares à autocalibração com o valor inicial apenas da distância focal nominal, de modo que não houve ganho em exatidão no processo.

Esses resultados revelam que, na utilização do SfM no programa *Metashape*, a execução de uma calibração *in situ* com sub-bloco de imagens não permitiu melhorar a qualidade da extração de informações tridimensionais em experimentos sem pontos de apoio para o bloco de imagens analisado. Nesse sentido, serão realizados outros experimentos de Orientação Integrada de Sensores com programas que não utilizam a técnica SfM, para verificar se o uso da calibração de câmara com sub-bloco *in situ* melhora a acurácia da ISO do procedimento.

4.6 Orientação Integrada de Sensores com POIs obtidos por Calibração *In Situ*

Prosseguindo com os experimentos utilizando o método fotogramétrico tradicional, realizou-se o processo de Orientação Integrada de Sensores considerando como fixos os POIs estimados na calibração *in situ* com sub-bloco de imagens e adicionando as medidas diretas da posição do sensor, determinadas pelo GNSS-PPK, como observações com injunção de posição no ajustamento. Desse modo, foram realizados procedimentos de ISO, sem pontos de apoio, nos programas Erdas Imagine e no CALIBRAV, seguindo as etapas descritas em 3.2.5.

Para esses experimentos, os valores para os POIs fixados foram determinados na calibração *in situ* (Tabela 8), com distância focal de 9,005 mm, coordenadas do ponto principal de -0,021mm (x_0) e -0,046 mm (y_0) e coeficiente de distorção radial k_1 de $8,22E-06 \text{ mm}^{-2}$. Além

disso, as coordenadas do CP utilizadas como observações adicionais foram injuncionadas conforme o REMQ dos resíduos das coordenadas X_0 , Y_0 e Z_0 nas imagens do sub-bloco da calibração *in situ*. Desse modo, a Tabela 11 exibe os valores de REMQ dos resíduos nas componentes horizontais e vertical da posição do sensor nos experimentos realizados no Erdas e no CALIBRAV, respectivamente.

Tabela 11 – REMQ dos resíduos na posição do sensor nas ISO com POIs obtidos por calibração *in situ*

Programa	REMQ (m)			REMQ (GSD)		
	X_0	Y_0	Z_0	X_0	Y_0	Z_0
Erdas Imagine	0,129	0,127	0,036	4,535	4,454	1,273
CALIBRAV	0,279	0,411	0,035	9,799	14,413	1,242

Fonte: Autora (2021)

Com base na Tabela 11, é possível observar que a Orientação Integrada de Sensores realizada no Erdas Imagine resultou em valores de REMQ dos resíduos bem próximo à incerteza adotada inicialmente (13,4 cm) para a componente X_0 . Em contrapartida, a REMQ dos resíduos em Y_0 nesse experimento atingiu valor correspondente à menos da metade da precisão proposta *à priori* de 29,6 cm. Ainda sobre o processamento de ISO executado no Erdas, o valor de REMQ dos resíduos para a componente vertical foi cerca de 4 vezes menor que a incerteza adotada de 16,0 cm.

No experimento de ISO executado no CALIBRAV, o REMQ dos resíduos nas componentes horizontais foram ambos superiores aos valores da incerteza adotada *à priori*. No entanto, a coordenada Z_0 apresentou REMQ bem similar ao do experimento no Erdas, isto é, 4 vezes menor que a precisão assumida inicialmente. Esses resultados de resíduos podem indicar que os POIs da calibração *in situ* conseguiram modelar imprecisões em Z_0 devido à correlação existente entre esse parâmetro e a distância focal da câmara.

Os resíduos das coordenadas do CP na ISO realizada no *Metashape*, fixando os POIs da calibração *in situ*, foram bem superiores aos resíduos dos experimentos de ISO realizados em ambos os programas de Fotogrametria tradicional. Como pode ser visto na Tabela 10, a REMQ dos resíduos em X_0 foi de 0,653 m, em Y_0 de 1,400 m e em Z_0 de 0,584 m. Segundo o manual do usuário (AGISOFT, 2019), o modelo de distorção de lentes adotado pelo *Metashape*, consiste no modelo de Conrady-Brown. Apesar disto, devido aos resíduos significativamente maiores nas coordenadas do CP quando fixados os POIs provenientes da calibração *in situ*, executada no CALIBRAV, pode-se levantar a hipótese de que a modelagem das distorções de

lentes possui diferenças que não são conhecidas pelo usuário, por ser um programa de código fechado.

Após a análise dos resíduos nas coordenadas do CP, é necessário investigar a exatidão desses processamentos. Para isso, foram distribuídos 12 pontos de apoio no bloco de imagens e calculadas as discrepâncias entre as coordenadas medidas em campo e estimadas nos experimentos de ISO. Assim, a Tabela 12 apresenta os valores de REMQ das discrepâncias para as coordenadas (X, Y, Z) e para a resultante planimétrica (XY).

Tabela 12 – REMQ das discrepâncias nos pontos de verificação nas ISO com POIs obtidos por calibração *in situ*

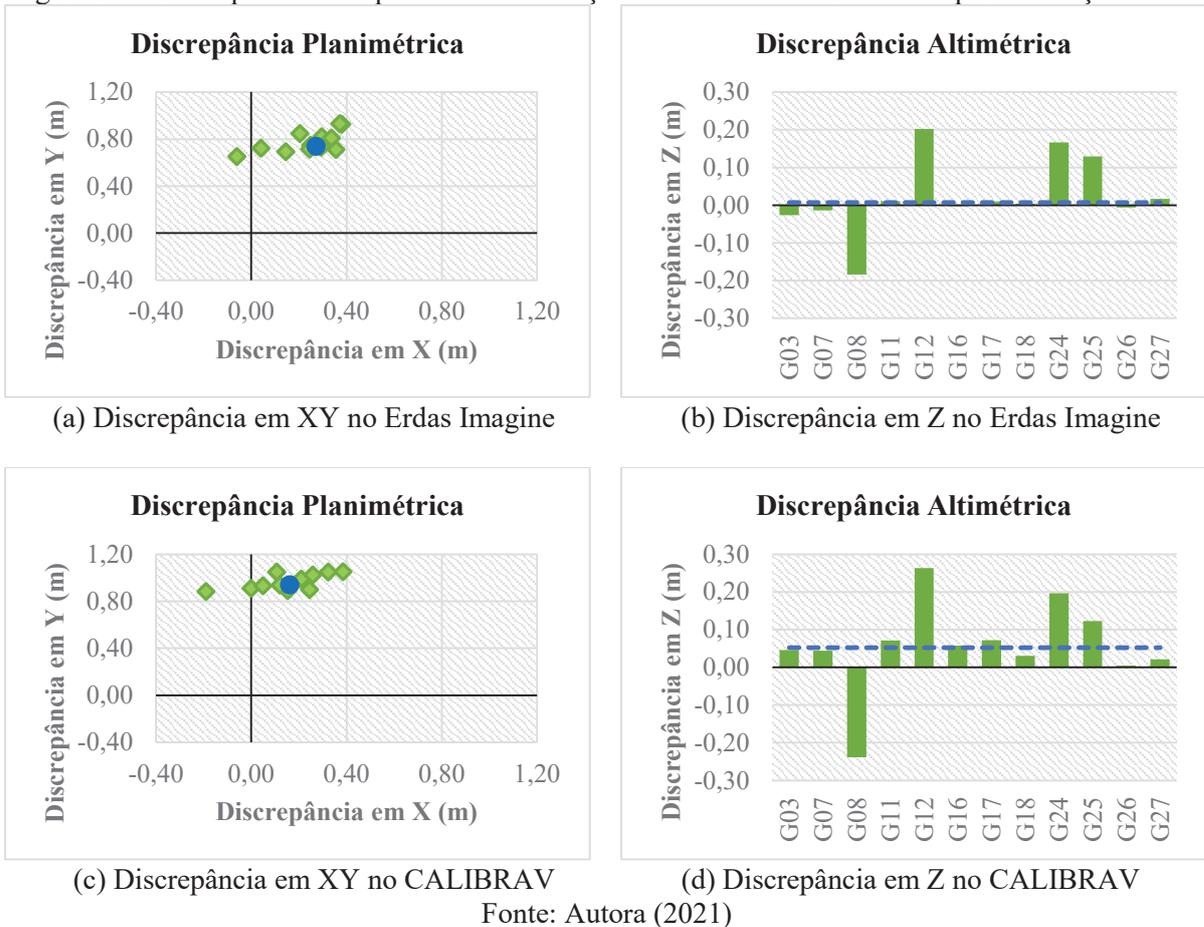
Programa	REMQ (m)				REMQ (GSD)	
	X	Y	XY	Z	XY	Z
Erdas Imagine	0,272	0,781	0,827	0,100	29,004	3,517
CALIBRAV	0,213	0,965	0,989	0,129	34,689	4,522

Fonte: Autora (2021)

A Raiz do Erro Médio Quadrático calculada para o experimento no Erdas Imagine revela que o erro na componente Y foi significativamente maior que na componente X, resultando em um REMQ planimétrico de 82,7 cm. Para a ISO desempenhada no CALIBRAV, a coordenada Y também apresentou REMQ superior à coordenada X, mas a REMQ horizontal alcançou resultados menos acurados que o experimento no Erdas, com valor bem próximo a um metro, de modo similar aos resíduos nas coordenadas do CP nos experimentos de Orientação Integrada de Sensores com os POIs da autocalibração no *Metashape* (Tabela 5). Em relação ao erro altimétrico, ambos os experimentos revelaram REMQ na coordenada Z de aproximadamente 10 cm, isto é, com boa qualidade posicional considerando a ausência de pontos de apoio.

Posteriormente, para analisar de modo mais incisivo as discrepâncias nos pontos de verificação nas Orientação Integrada de Sensores executadas com POIs da calibração *in situ*, foram analisadas a existência de tendências nessas discrepâncias. Os gráficos das Figuras 21 (a) e (b) representam as discrepâncias planimétricas e altimétricas para os experimentos no programa Erdas Imagine, bem como seu valor médio (em azul). Nas Figuras 21 (c) e (d) são exibidos os gráficos com as discrepâncias horizontais e verticais do experimento no CALIBRAV.

Figura 21 – Discrepâncias dos pontos de verificação nas ISO com POIs obtidos por calibração *in situ*



A partir do gráfico na Figura 21 (a) referentes à ISO executada no Erdas, pode ser observada a presença de erros sistemáticos na coordenada X, cuja magnitude correspondente à aproximadamente 30 cm. Para a coordenada Y, é notória a tendência positiva das discrepâncias, resultando no valor médio de cerca de 80 cm. No tocante às discrepâncias verticais, presentes na Figura X (b), pode-se perceber que as discrepâncias estão distribuídas em torno do eixo Z, oscilando entre valores negativos e positivos. Desse modo, a média resultante para as discrepâncias altimétricas é bem próxima de zero, indicando a ausência de erros sistemáticos.

No tocante aos experimentos realizados no CALIBRAV, as discrepâncias planimétricas também apresentaram tendências positivas para X e Y, com valores médios de cerca de 15 cm e 90 cm, respectivamente. Para a componente altimétrica também é possível perceber o deslocamento da média no sentido positivo do gráfico, indicando um erro sistemático de aproximadamente 5 cm nas discrepâncias dos pontos de verificação.

Por fim, faz-se necessário realizar uma análise geral dos resultados das Orientações Integrada de Sensores por métodos fotogramétricos tradicionais executadas nos programas Erdas Imagine e CALIBRAV, sem uso de pontos de apoio, fixando os POIs oriundos da

calibração *in situ* com sub-bloco e integrando as medidas diretas da posição do sensor pelo GNSS-PPK.

Em comparação com os experimentos de ISO executados no Erdas em 4.2., com uso dos POIs da autocalibração no *Metashape*, os ajustamentos realizados com POIs da calibração *in situ* apresentaram melhora de 19% na exatidão planimétrica, com decréscimo no valor de REMQ das discrepâncias de 1,017 m para 0,827 m. Na acurácia altimétrica, o ganho do experimento com calibração *in situ* foi de 86% em relação ao experimento de ISO com POIs da autocalibração, com redução da REMQ das discrepâncias nos pontos de verificação de 0,721 m para 0,100 m. Em relação às tendências nas discrepâncias, com uso da calibração *in situ* foi possível eliminar os erros sistemáticos na coordenada Z e reduzir o erro em Y de 1 m para 80 cm. Todavia, as discrepâncias em X passaram a ter uma tendência positiva de 30 cm. De maneira geral, os experimentos de Orientação Integrada dos Sensores sem pontos de apoio no Erdas Imagine apresentaram melhoras de qualidades posicionais da extração de informações no terreno com o uso da calibração *in situ*, principalmente em altimetria.

Para os processamentos de Orientação Integrada de Sensores sem pontos de apoio no CALIBRAV, a utilização de POIs da calibração *in situ* apresentaram decréscimo de 11% na acurácia planimétrica em relação ao experimento com POIs da autocalibração do *Metashape*, com aumento do REMQ horizontal das discrepâncias de 0,892 m para 0,982 m. Em contrapartida, o experimento com calibração *in situ* resultou no acréscimo de 81% na exatidão altimétrica, com redução do REMQ vertical das discrepâncias de 0,675 m para 0,129 m. No referente à análise de erros sistemáticos, o uso dos POIs com calibração *in situ* resultou em um aumento nas tendências positivas das coordenadas X e Y em relação aos experimentos com POIs da autocalibração, cujo valor médio variou de 10 cm para 15 cm em X e de 80 cm para 90 cm em Y. Na coordenada Z, a tendência reduziu significativamente, com a média das discrepâncias verticais diminuindo de 60 cm para 5 cm. Considerando esses pormenores, pode-se dizer que a utilização da calibração *in situ* para experimentos de ISO no CALIBRAV resultou em melhoras significativas na exatidão altimétrica do processo, mas com o ônus de reduzir a qualidade planimétrica da extração de informações tridimensionais.

Para fins desta pesquisa, como a exatidão posicional planimétrica e altimétrica das Orientações Integradas de Sensores no CALIBRAV e Erdas foram próximas, pode-se considerar que os resultados para os programas de Fotogrametria tradicional foram equivalentes. Assim, comparando os experimentos realizados entre métodos fotogramétricos (SfM e Fotogrametria tradicional), a qualidade posicional da Orientação Integrada de Sensores

sem pontos de apoio com calibração *in situ*, no Erdas, em relação à autocalibração sem pontos de apoio no *Metashape*, apresentou resultados equivalentes em planimetria, de 0,849 m para 0,827 m (3%) e um ganho substancial de 83% em altimetria, com REMQ vertical de 0,595 na autocalibração (Tabela 3) para 0,100 na ISO. Essa melhora na exatidão deve-se ao fato da calibração *in situ* utilizada no procedimento ISO dispor da condição mínima para fixar o referencial no terreno, isto é, três pontos de apoio (dois tridimensionais e um vertical) no sub-bloco de imagens.

Por outro lado, para os experimentos com pontos de apoio, realizados com autocalibração no *Metashape* (em 4.3), observa-se que com 4, 5 e 6 pontos de apoio os resíduos nas coordenadas do CP aumentam consideravelmente nas componentes planimétricas. Nesse caso, quando o referencial é fixado no terreno com 4 pontos de apoio, os resíduos em X_0 e Y_0 são de 0,204 m e 0,582 m (Tabela 6), respectivamente. Assim, devido a esses resultados, pode-se inferir a hipótese mais provável que as medidas diretas da posição do sensor estariam menos precisas do que a precisão nominal do GNSS-PPK fornecida pelo fabricante, de 10 cm para X e Y, foram realizadas investigações para confirmar essa hipótese.

Para verificar essa possibilidade, foi realizado um experimento de Orientação Integrada de Sensores com 4 pontos de apoio no programa CALIBRAV, mudando as incertezas para as componentes X_0 e Y_0 , assumindo valores de 30 cm e 60 cm, com base nos resíduos das autocalibrações com pontos de apoio. Assim, a posição do sensor pôde ser estimada no ajustamento com menor peso nas coordenadas horizontais do CP. Para a componente altimétrica foi mantida a precisão nominal do equipamento (20 cm). Posteriormente, a posição do sensor calculada nesse ajustamento foi considerada como medida direta na realização da calibração *in situ* com sub-bloco de imagens. Os demais parâmetros para essa calibração, realizada no CALIBRAV, foram os mesmos da calibração *in situ* com as coordenadas medidas GNSS-PPK, descrita em 4.4.

Em seguida, foram realizados novamente experimentos de ISO sem pontos de apoio no Erdas Imagine e no CALIBRAV, fixando os parâmetros de orientação interior estimadas nessa nova calibração *in situ*. Desta forma, as coordenadas do CP estimadas no processamento ISO com 4 pontos de apoio, foram consideradas como sendo as medidas diretas da posição do sensor, e foram injuncionadas conforme a precisão nominal do equipamento (10 cm para X e Y e 20 cm para Z). No experimento realizado no Erdas, a RSME das discrepâncias dos 12 pontos de verificação foi de 0,168m para planimetria e 0,100 m altimetria. Para a ISO executada

no CALIBRAV, a RSME das discrepâncias foi de 0,142 m na resultante horizontal e 0,105 m na vertical.

Esses resultados obtidos nessa experimentação, apesar de usar coordenadas fictícias das posições do sensor, mostram que a metodologia de estimar os POIs do sensor (calibração *in situ*) com sub-bloco poderá ser aplicada com sucesso. Entretanto, as coordenadas das posições do sensor, determinadas diretamente com o posicionamento geodésico, não devem possuir erros sistemáticos. Assim, pode-se inferir que existem erros sistemáticos não modelados nas medidas realizadas no referencial geodésico, isto é, na posição do sensor no instante de tomada das fotos ou nas observações dos pontos terrestres. Por esse motivo, na calibração *in situ* realizada em 4.4, ao fixar o referencial no terreno, os erros nas coordenadas X_0 e Y_0 do CP excedem a precisão nominal do equipamento, adotada *à priori*, de modo que as imprecisões nas componentes horizontais não podem ser absorvidas pelos POIs com maiores correlações com essas coordenadas ($x_0 - X_0$, $y_0 - Y_0$).

Apesar dessa conclusão, não foi possível investigar mais incisivamente as causas desse erro sistemático, visto que os dados utilizados neste trabalho foram cedidos por terceiros e o período de pandemia do COVID-19 dificultou a execução de trabalhos de campo por parte da comunidade acadêmica. Desse modo, a influência da imprecisão na determinação das coordenadas do CP na exatidão da extração de informações tridimensionais, com uso de calibração *in situ*, serão estudados em trabalhos futuros.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O referente estudo tem o objetivo de analisar a influência da metodologia de calibração de câmara *in situ* na qualidade da extração de informações tridimensionais com uso de um bloco de 60 imagens obtidas com Veículo Aéreo Não Tripulado e considerando a integração de medidas diretas da posição do sensor obtidas com receptor GNSS-PPK aerotransportado. Para isso, os parâmetros de orientação interior do sensor foram estimados por dois métodos: autocalibração, no programa *Metashape*, com o processo fotogramétrico *Structure-from-Motion* e calibração *in situ* com sub-bloco de imagens, no programa CALIBRAV, por Fotogrametria tradicional, que se baseia no uso das equações de colinearidade com parâmetros adicionais. Assim, foram realizados experimentos de autocalibração e Orientação Integrada de Sensores com o intuito de investigar a qualidade posicional da extração de dados espaciais com uso dos POIs determinados nas calibrações propostas e com a adição de medidas diretas da posição do sensor como observações adicionais com injeção de posição. A análise de acurácia de todos os procedimentos fotogramétricos foi realizada com base na Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) das discrepâncias das coordenadas nos pontos de verificação. Ademais, também foi realizada uma análise de tendências dessas discrepâncias para investigar a possível presença de erros sistemáticos.

Considerando os experimentos realizados no *Metashape*, podem ser destacadas as principais conclusões:

- Para os processamentos de autocalibração sem pontos de apoio, foram inicialmente comparadas a utilização de observações das coordenadas do centro de perspectiva (X_0, Y_0, Z_0) determinadas pelo GNSS de navegação do RPAS e pelo GNSS-PPK aerotransportado. Esses experimentos permitiram analisar o ganho em exatidão da utilização de medidas diretas da posição do sensor medidas com alta precisão, resultando no acréscimo de 37% na exatidão planimétrica e 90% na exatidão altimétrica, além da redução de tendências nas coordenadas Y e Z.
- As autocalibrações realizadas com adição de pontos de apoio terrestres e integração com as medidas da posição do sensor com GNSS-PPK resultaram em melhoras significativas no valor de REMQ das discrepâncias nos pontos de verificação em relação ao experimento sem pontos de apoio. Entre as diferentes quantidades de pontos de apoio analisadas, a configuração mínima de 4 pontos terrestres distribuídos nas extremidades do bloco permitiu eliminar a tendência

positiva do experimento sem pontos de apoio, com ganho de 81% na acurácia planimétrica e 85% na altimétrica em relação ao experimento de autocalibração sem pontos de apoio.

- No processamento de Orientação Integrada do Sensor fixando os Parâmetros de Orientação Interior determinados na calibração *in situ*, foi possível constatar que houve uma redução na tendência dos dados em X e Z em relação à autocalibração sem pontos de apoio que utiliza como parâmetro inicial apenas a distância focal de fábrica, mas a componente Y apresentou um erro sistemático acima de 1 metro, fator que diminuiu significativamente a qualidade posicional desse experimento. Por outro lado, o processamento de autocalibração com uso dos POIs da calibração *in situ* como valores aproximados apresentou resultados similares à autocalibração com valor inicial apenas da distância focal nominal. Esses resultados revelam que, na implementação do SfM no programa *Metashape*, a execução de uma calibração *in situ* com sub-bloco de imagens não permite melhorar a qualidade da extração de informações tridimensionais em experimentos sem pontos de apoio.

Considerando os dados utilizados na referente pesquisa e os processamentos realizados com Fotogrametria tradicional nos programas Erdas Imagine e CALIBRAV, pode-se concluir que:

- Nos experimentos de Orientação Integrada de Sensores quando são fixados os Parâmetros de Orientação Interior (POIs) no processo de autocalibração do SfM, sem pontos de apoio e com valor inicial apenas da distância focal nominal, melhores resultados foram obtidos com a calibração efetuada no Calibrav em relação ao ERDAS. Na análise de erros sistemáticos, ambos os processamentos apresentaram altas tendências positivas nas componentes Y e Z. Comparativamente à autocalibração do *Metashape*, os processamentos de Orientação Integrada de Sensores utilizando os mesmos POIs revelaram qualidade posicional inferior. No entanto, o processamento no CALIBRAV resultou em uma diminuição de apenas 5% em exatidão planimétrica e 14% em altimetria, indicando que os POIs estimados no SfM são razoavelmente acurados e podem ser utilizados para produzir resultados similares por meio da Fotogrametria tradicional.

- O processamento de Orientação Integrada de Sensores executado no Erdas Imagine, fixando os Parâmetros de Orientação Interior (POIs) obtidos na calibração *in situ*, apresentou melhora de 19% na exatidão planimétrica e de 86% na exatidão altimétrica em relação ao experimento de ISO realizado no mesmo programa com POIs da autocalibração do *Metashape*. Em relação às tendências nas discrepâncias, com uso da calibração *in situ* foi possível eliminar os erros sistemáticos na coordenada Z e reduzir o erro em Y. Assim, o experimento de Orientação Integrada de Sensores no Erdas Imagine apresentou melhora na qualidade posicional, especialmente em altimetria, com o uso da calibração *in situ*.
- Para os experimentos de Orientação Integrada de Sensores no CALIBRAV, a utilização de Parâmetros de Orientação Interior da calibração *in situ* apresentaram decréscimo de 11% na acurácia planimétrica e acréscimo de 81% na exatidão altimétrica em relação ao experimento com POIs da autocalibração do *Metashape*. Na análise de tendências, o uso dos POIs com calibração *in situ* resultou em um aumento nas tendências positivas das coordenadas X e Y e redução do erro sistemático na coordenada Z. Desse modo, a utilização da calibração *in situ* com sub-bloco de imagens para experimentos de ISO no CALIBRAV resultou ganho substancial na exatidão altimétrica, mas com a desvantagem de reduzir a qualidade planimétrica do processo.
- Como a exatidão posicional planimétrica e altimétrica das Orientações Integradas de Sensores no CALIBRAV e Erdas foram próximas, pode-se considerar que os resultados para os programas de Fotogrametria tradicional foram equivalentes.
- Comparando os experimentos realizados entre os métodos fotogramétricos (SfM e Fotogrametria tradicional), a qualidade posicional da Orientação Integrada de Sensores sem pontos de apoio com calibração *in situ*, no Erdas, em relação à autocalibração sem pontos de apoio no *Metashape*, apresentou resultados equivalentes em planimetria e ganho de 83% em altimetria. Essa melhora na exatidão deve-se ao fato da calibração *in situ* utilizada no procedimento ISO dispor de três pontos de apoio no sub-bloco de imagens.
- Provavelmente existem erros sistemáticos não modelados nas medidas realizadas no referencial geodésico, seja na posição do sensor no instante de

tomada das fotos ou nas observações dos pontos terrestres. Assim, na calibração *in situ* realizada com o sub-bloco de imagens, as imprecisões presentes nas componentes horizontais não podem ser absorvidas pelas coordenadas do ponto principal, mesmo com a alta correlação desses parâmetros com as coordenadas X_0 e Y_0 do centro de perspectiva.

Por fim, podem ser sugeridas como recomendações para trabalhos futuros:

- Realizar estudos com análise da exatidão e precisão de procedimentos fotogramétricos no *Metashape*, com medidas diretas da posição do sensor e considerando outras metodologias de calibração de câmaras que incluam imagens oblíquas e/ou aquisição de fotos em diferentes alturas de voo.
- Realizar pesquisas que busquem investigar a influência da integração de imagens com dados LiDAR, ambos obtidos com a plataforma VANT, na exatidão da extração de informações métricas no SfM.
- Realizar análises da influência que erros sistemáticos presentes nas medidas diretas da posição do sensor exercem na exatidão da extração de informações tridimensionais por Orientação Integrada de Sensores, com uso de POIs estimados por calibração *in situ*.

REFERÊNCIAS

- 3DFLOW. **3DF Samantha**. Disponível em: <<https://www.3dflow.net/samantha-structure-from-motion/#samantha>>, 2021. Acesso em: 05 jun. 2021.
- AGISOFT. **Agisoft Metashape User Manual**: Professional Edition, Version 1.5. 2019.
- AGISOFT. **Discover intelligent photogrammetry with Metashape**: Process digital images and generate 3D spatial data. Fast and highly accurate. Disponível em: <<https://www.agisoft.com/>>, 2021. Acesso em: 05 jun. 2021.
- AMORIM, N. C. de. **Avaliação do desempenho de uma implementação da técnica Structure from motion para mapeamento de corredores**. 2020. 99f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2020.
- ANDRADE, J. B de. **Fotogrametria**. 1ed. Curitiba: SBEE, 1998. 258p.
- ANDRADE, J. B de. **Fotogrametria**. 2ed. Curitiba: SBEE, 2003. 274p.
- ASPRS - AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. **Manual of Photogrammetry**. 5ed. Estados Unidos: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004. 1151p.
- ASTRE, H. **SFMTToolkit**. Disponível em: <<http://www.visual-experiments.com/demos/sfmttoolkit/>>, 2010. Acesso em: 05 jun. 2021.
- BAY, H.; ESS, A.; TUYTELAARS, T.; GOOL, L. V. Speeded-up robust features (SURF). **Computer vision and image understanding**, v. 110, n. 3, p. 346-359, 2008.
- BEMIS, S. P.; MICKLETHWAITE, S.; TURNER, D.; JAMES, M. R.; AKCIZ S.; THIELE S. T.; BANGASH, H. A. Ground-based and UAV-based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. **Journal of Structural Geology**, v. 69, p. 163-178, 2014.
- BROWN, D. C. Close-range camera calibration. **Photogrammetric Engineering**. v. 37, n. 8, p. 855-866, 1971.
- BRYSON, M.; JOHNSON-ROBERSON, M.; MURPHY, R. J.; BONGIORNO, D. Kite aerial photography for low-cost, ultra-high spatial resolution multi-spectral mapping of intertidal landscapes. **PloS one**, v. 8, n. 9, e73550, 2013.
- CALONDER, M.; LEPETIT, V.; STRECHA, C.; FUA, P. Brief: Binary robust independent elementary features. In: EUROPEAN CONFERENCE ON COMPUTER VISION. 2010. Springer, Berlin, Heidelberg. **Proceedings...2010**. p. 778-792.
- CARBONNEAU, P. E.; DIETRICH, J. T. Cost-effective non-metric photogrammetry from consumer-grade sUAS: implications for direct georeferencing of structure from motion photogrammetry. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 42, n. 3, p. 473-486, 2017.

CARRIVICK, J. L.; SMITH, M. W.; QUINCEY, D. J. **Structure from Motion in the Geosciences**. John Wiley & Sons, 2016.

CASTILLO, C.; PÉREZ, R.; JAMES, M. R.; QUINTON, J. N.; TAGUAS, E. V.; GÓMEZ, J. A. Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 4, p. 1319-1332, 2012.

CHIANG, K. W.; TSAI, M. L.; CHU, C. H. The development of an UAV borne direct georeferenced photogrammetric platform for ground control point free applications. **Sensors**, v. 12, n. 7, p. 9161-9180, 2012.

CLÉDAT, E.; CUCCI, D. A.; SKALOUD, J. Camera Calibration Models and Methods for Corridor Mapping with UAVs. **Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 1, p. 231-238, 2020.

CURRIER, K. Mapping with strings attached: Kite aerial photography of Durai Island, Anambas Islands, Indonesia. **Journal of Maps**, v. 11, n. 4, p. 589-597, 2015.

CONRADY, A. E. Decentered Lens-systems. **Monthly notices of the royal astronomical society**, v. 79, p. 384-390, 1919.

COSTA, F. A. L.; MITSHITA, E. A.; MARTINS, M. The influence of sub-block position on performing integrated sensor orientation using in situ camera calibration and lidar control points. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 260, 2018. CURRIER, 2015

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DE ESPAÇO AÉREO. **Tenha uma operação segura com sua AERONAVE NÃO TRIPULADA(Unmanned Aircraft - UA)**. Disponível em: <<https://www.decea.gov.br/drone/>>, 2020. Acesso em: 12 nov. 2020.

EISENHART, C. Realistic evaluation of the precision and accuracy of instrument calibration systems. **Journal of Research of the National Bureau of Standards-C**, v. 67, n.2, p. 161-187, 1963.

EKASO, D.; NEX, F.; KERLE, N. Accuracy assessment of real-time kinematics (RTK) measurements on unmanned aerial vehicles (UAV) for direct geo-referencing. **Geo-spatial information science**, v. 23, n. 2, p. 165-181, 2020.

ELTNER, A.; BAUMGART, P.; MAAS, H. G.; FAUST, D. Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 40, n. 6, p. 741-755, 2015.

FERRER-GONZÁLEZ, E.; AGÜERA-VEGA, F.; CARVAJAL-RAMÍREZ, F.; MARTÍNEZ-CARRICONDO, P. UAV Photogrammetry Accuracy Assessment for Corridor Mapping Based on the Number and Distribution of Ground Control Points. **Remote Sensing**, v. 12, n. 15, p. 2447, 2020.

FISCHLER, M. A.; BOLLES, R.C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. **Communications of the ACM**, v. 24, n. 6, p. 381-395, 1980.

- FONSTAD, M. A.; DIETRICH, J. T.; COURVILLE, B. C.; JENSEN, J. L.; CARBONNEAU, P.E. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, n. 4, p. 421-430, 2013.
- FORNALI, G.; DALL'ASTA, E.; DIOTRI, F.; CELLA, U. M.; RONCELLA, R.; SANTISE, M. Quality assessment of DSMs produced from UAV flights georeferenced with on-board RTK positioning. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 311, 2018.
- GABRLIK, P.; JELINEK, A.; JANATA, P. Precise multi-sensor georeferencing system for micro UAVs. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 25, p. 170-175, 2016
- GABRLIKA, P.; COUR-HARBO, A.; KALVODOVA, P.; ZALUD, L.; JANATA, P. Calibration and accuracy assessment in a direct georeferencing system for UAS photogrammetry. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 15-16, p. 4931-4959, 2018.
- GALO, M. **Calibração e aplicação de câmaras digitais**. 1993. 163f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1993
- GERKE, M.; PRZYBILLA, H. J. Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. **Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)**, n. 1, p. 17-30, 2016.
- GONÇALVES, J. A.; HENRIQUES, R. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 104, p. 101-111, 2015.
- HABIB, A.; KERSTING, A. P.; BANG, K. Comparative Analysis of Different Approaches for the incorporation of position and orientation information in integrated sensor orientation procedures. In: **Proceedings of Canadian Geomatics Conference 2010 and ISPRS Commission I Symposium**. 2010.
- HARWIN, S.; LUCIEER, A. Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. **Remote Sensing**, v. 4, n. 6, p. 1573-1599, 2012.
- IGLHAUT, J.; CABO, C.; PULITI, S.; PIERMATTEI, L.; O'CONNOR, J.; ROSETTE, J. Structure from motion photogrammetry in forestry: A review. **Current Forestry Reports**, v. 5, n. 3, p. 155-168, 2019.
- IP, A. W. L. **Analysis of integrated sensor orientation for aerial mapping**. 2005. 202f. Dissertação (Departamento of Geomatics Engineering) – The University of Calgary. Calgary, 2005.
- JACOBSEN, K. Direct integrated sensor orientation-pros and cons. In: **Proceedings of the XXth ISPRS Congress**. 2004.

JAMES, M. R.; ROBSON, S. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 39, n. 10, p. 1413-1420, 2014.

JAMES, M. R.; ROBSON, S. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, n. F3, 2012.

JAMES, M. R.; VARLEY, N. Identification of structural controls in an active lava dome with high resolution DEMs: Volcán de Colima, Mexico. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 22, 2012.

JOHNSON, K.; NISSEN, E.; SARIPALLI, S.; ARROWSMITH, J. R.; MCGAREY, P.; SCHARER, K.; WILLIAMS, P.; BLISNIUK, K. Rapid mapping of ultrafine fault zone topography with structure from motion. **Geosphere**, v. 10, n. 5, p. 969-986, 2014.

KRAUS, K. **Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans**. Tradução: Ian Harley e Stephen Kyle. 2ed. Berlim: Walter de Gruyter GmbH & Co. Tradução de: Photogrammetrie, Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen.

LI, W; GEE, T.; FRIEDRICH, H.; DELMAS, P. A practical comparison between Zhang's and Tsai's calibration approaches. In: **Proceedings of the 29th International Conference on Image and Vision Computing New Zealand**. p. 166-171, 2014.

LOWE, D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. **International journal of computer vision**, v. 60, n. 2, p. 91-110, 2004.

LOWE, D.G. Object recognition from local scale-invariant features. In INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION, 1999. Corfu, Greece. **Proceedings...1999**. p. 1150-1157.

LUCIEER, A.; JONG, S. M. de; TURNER, D. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. **Progress in Physical Geography**, v. 38, n. 1, p. 97-116, 2014.

LUHMANN, T. Robson, S.; KYLE, S.; HARLEY, I. **Close range photogrammetry**. Whittles, Caithness, 2006.

MIAN, O.; LUTES, J.; LIPA, G.; HUTTON, J. J.; GAVELLE, E.; BORGHINI, S.; Direct georeferencing on small unmanned aerial platforms for improved reliability and accuracy of mapping without the need for ground control points. **The international archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences**, v. 40, n. 1, p. 397, 2015.

MICMAC. **Presentation**. Disponível em: <<https://micmac.ensg.eu/index.php/Presentation>>, 2017. Acesso em: 05 jun 2021.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. Nova York: John Wiley&Sons. Inc., 2001. 479p.

MITISHITA, E.; BARRIOS, R.; CENTENO, J. The influence of the in situ camera calibration for direct georeferencing of aerial imagery. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, v. 40, n.1, 2014.

MITISHITA, E. ERCOLIN FILHO, L.; GRAÇA, N.; CENTENO, J.; Approach for Improving the Integrated Sensor Orientation. **ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, v. 3, n. 1, 2016.

MITISHITA, E. DEBIASI, P.; HAINOSZ, F.; CENTENO, J. Calibration of low cost digital camera using data from simultaneous Lidar and photogrammetric surveys. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 39, p. B1, 2012.

NIETHAMMER, U.; JAMES, M. R.; ROTHMUND, S.; TRAVELLETTI, J.; JOSWIG, M. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. **Engineering Geology**, v. 128, p. 2-11, 2012.

PASUMANSKY, A. **Definitive help in how Photoscan defines its Yaw Pitch and Roll Angles**. Suporte Técnico Agisoft, Fórum do Agisoft Metashape. Disponível em: <<https://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=6126.0>>, 2016. Acesso em: 10 mar. 2021.

PESSOA, G. G.; CARRILHO, A. C.; MIYOSHI, G. T; AMORIM, A.; GALO, M. Assessment of UAV-based digital surface model and the effects of quantity and distribution of ground control points. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, p. 1-19, 2020. DOI:10.1080/01431161.2020.1800122

PIX4D. **Measure from images**: A unique photogrammetry software suite for mobile and drone mapping. Disponível em: <<https://www.pix4d.com/>>, 2021. Acesso em: 05 jun. 2021.

QU, Y.; HUANG, J.; ZHANG, X. Rapid 3D reconstruction for image sequence acquired from UAV camera. **Sensors**, v. 18, n. 1, p. 225, 2018.

ROSNELL, T.; HONKAVAARA, E. Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadcopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera. **Sensors**, v. 12, n. 1, p. 453-480, 2012.

ROUSSEEUW, P. J. Least median of squares regression. **Journal of the American statistical association**, v. 79, n. 388, p. 871-880, 1984.

RYAN, J. C.; HUBBARD, A. L.; BOX, J. E.; TODD, J.; CHRISTOFFERSEN, P.; CARR, J. R.; HOLT, T. O.; SNOOKE, N. UAV photogrammetry and structure from motion to assess calving dynamics at Store Glacier, a large outlet draining the Greenland ice sheet. **The Cryosphere**, v. 9, p.1-11, 2015.

SANZ-ABLONEDO, E. CHANDLER, J. H.; RODRÍGUEZ-PÉREZ, J. R.; ORDÓÑEZ, C.; Accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. **Remote Sensing**, v. 10, n. 10, p. 1606, 2018.

- SMITH, M. J.; CHANDLER, J.; ROSE, J. High spatial resolution data acquisition for the geosciences: kite aerial photography. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 34, n. 1, p. 155-161, 2009.
- 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.
- SNAVELY, N., 2008. **Scene reconstruction and visualization from Internet photo collections**. 2008. 210f. Tese (Doutorado em Ciências da Computação e Engenharia) - University of Washington. Seattle, 2008.
- SNAVELY, N.; SEITZ, S. M.; SZELISKI, R. Modeling the world from internet photo collections. **International journal of computer vision**, v. 80, n. 2, p. 189-210, 2008.
- SNAVELY, N.; SEITZ, S. M.; SZELISKI, R. Photo tourism: exploring photo collections in 3D. **ACM transactions on graphics**, v. 25, n. 3, p. 835-846, 2006.
- STÖCKER, C.; NEX, F.; KOEVA, M.; GERKE, M. 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.
- STUMPF, A.; MALET, J. P.; ALLEMAND, P.; PIERROT-DESEILLIGNY, M.; SKUPINSKI, G.; GROUND-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion. **Geomorphology**, v. 231, p. 130-145, 2015.
- SZELISKI, R. **Computer vision: algorithms and applications**. Springer Science & Business Media, 2010.
- TAVANI, S.; CORRADETTI, A.; BILLI, A. High precision analysis of an embryonic extensional fault-related fold using 3D orthorectified virtual outcrops: The viewpoint importance in structural geology. **Journal of Structural Geology**, v. 86, p. 200-210, 2016.
- TOMASI, C.; KANADE, T. Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method. **International Journal of Computer Vision**, v. 9, n. 2, p. 137-154, 1992.
- TRIGGS, B. MCLAUCHLAN, P.; HARTLEY, R.; FITZGIBBON, A. Bundle adjustment—a modern synthesis. In: **International workshop on vision algorithms**. Corfu, Greece. Springer-Verlag 2000. p. 298-372.
- TSAI, R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. **IEEE Journal on Robotics and Automation**, v. 3, n. 4, p. 323-344, 1987.
- TUFFEN, H. JAMES, M. K.; CASTRO, J. M.; SCHIPPER, C. Exceptional mobility of an advancing rhyolitic obsidian flow at Cordón Caulle volcano in Chile. **Nature Communications**, v. 4, p. 2709, 2013.

TURNER, D.; LUCIEER, A.; WALLACE, L. Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 5, p. 2738-2745, 2014.

TURNER, D.; LUCIEER, A.; WATSON, C. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds. **Remote sensing**, v. 4, n. 5, p. 1392-1410, 2012.

ULLMAN, S. The interpretation of structure from motion. **Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences**, v. 203, n. 1153, p. 405-426, 1979.

VASUKI, Y. HOLDEN, E. J.; KOVESI, P.; MICKLETHWAITE, S. Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. **Computers & Geosciences**, v. 69, p. 22-32, 2014.

VERICAT, D.; BRASINGTON, J.; WHEATON, J.; COWIE, M.; Accuracy assessment of aerial photographs acquired using lighter-than-air blimps: low-cost tools for mapping river corridors. **River Research and Applications**, v. 25, n. 8, p. 985-1000, 2008.

WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300-314, 2012.

WHITEHEAD, K.; MOORMAN, B. J.; HUGENHOLTZ, C. H. Brief Communication: Low-cost, on-demand aerial photogrammetry for glaciological measurement. **The Cryosphere**, v. 7, n. 6, p. 1879-1884, 2013.

WOLF, P. R. **Elements of photogrammetry**. 2ed. Estados Unidos: McGraw-Hill Inc., 1983. 628p.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A.; WILKINSON, B. E. **Elements of photogrammetry with applications in GIS**. 4 ed. Estados Unidos: McGraw-Hill Education, 2014. 676 p.

WU, C. **VisualSFM : A Visual Structure from Motion System**. Disponível em: <<http://ccwu.me/vsfm/>>, 2021. Acesso em: 05 jun. 2021.

YASTIKLI, N.; JACOBSEN, K. Influence of system calibration on direct sensor orientation. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 71, n. 5, p. 629-633, 2005.

ZHANG, Z. A flexible new technique for camera calibration. **IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence**, v. 22, n. 11, p. 1330-1334, 2000.

ZHOU, Y.; RUPNIK, C. M.; THOM, C.; PIERROT-DESEILLIGNY, M. Simulation and Analysis of Photogrammetric UAV Image Blocks—Influence of Camera Calibration Error. **Remote Sensing**, v. 12, n. 1, p. 22, 2020.