



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo**

**MARCOS VINÍCIUS YODONO GARCIA**

**AVALIAÇÃO DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS  
DERIVADOS DE LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO  
UTILIZANDO VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO  
PARA APLICAÇÕES EM ENGENHARIA CIVIL**

**CAMPINAS**

**2020**

**MARCOS VINÍCIUS YODONO GARCIA**

**AVALIAÇÃO DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS  
DERIVADOS DE LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO  
UTILIZANDO VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO  
PARA APLICAÇÕES EM ENGENHARIA CIVIL**

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Transportes.

**Orientador: Prof. Dr. Henrique Candido de Oliveira**

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO MARCOS VINÍCIUS YODONO GARCIA E ORIENTADO PELO PROF. DR. HENRIQUE CANDIDO DE OLIVEIRA.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

---

**CAMPINAS**

**2020**

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

G165a Garcia, Marcos Vinicius Yodono, 1993-  
Avaliação de produtos cartográficos derivados de levantamento topográfico utilizando veículo aéreo não tripulado para aplicações em engenharia civil / Marcos Vinicius Yodono Garcia. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Henrique Candido de Oliveira.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Aeronaves não tripuladas. 2. Fotogrametria. 3. Fotogrametria aérea. I. Oliveira, Henrique Candido de, 1988-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Evaluation of digital cartographic products derived from topographic survey using unmanned aerial vehicle for civil engineering applications

**Palavras-chave em inglês:**

Unmanned aircraft

Photogrammetry

Aerial photogrammetry

**Área de concentração:** Transportes

**Titulação:** Mestre em Engenharia Civil

**Banca examinadora:**

Henrique Candido de Oliveira [Orientador]

Raquel Alves de Oliveira

Daniel Rodrigues dos Santos

**Data de defesa:** 21-08-2020

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Civil

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0003-1273-4602>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/4959738921488335>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E  
URBANISMO**

**AVALIAÇÃO DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS  
DERIVADOS DE LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO  
UTILIZANDO VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO PARA  
APLICAÇÕES EM ENGENHARIA CIVIL**

**Marcos Vinícius Yodono Garcia**

**Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**

Prof. Dr. Henrique Candido de Oliveira  
**Presidente e Orientador/ UNICAMP**

Prof. Dra. Raquel Alves de Oliveira  
**National Land Survey of Finland**

Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos  
**Universidade Federal do Paraná (UFPR)**

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 21 de Agosto de 2020

## Dedicatória

Aos meus pais, Edna e Marcos,  
e à minha irmã, Patrícia.

## Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, ao meu orientador Professor Dr. Henrique Candido de Oliveira, um exemplo de professor, de inteligência, de dedicação, paciência e sabedoria. A sua valiosa e competente presença foi responsável por me fazer acreditar neste projeto e tornar possível sua realização.

A UNICAMP, a Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo (FEC) e ao Departamento de Infraestrutura e Ambiente (InfrA), pela infraestrutura, pelos equipamentos e *software* disponibilizados para a realização desta pesquisa.

Aos Professores da FEC por todo o conhecimento proporcionado durante as disciplinas e por estarem sempre dispostos a me auxiliar durante a busca por conhecimento.

Aos técnicos do InfrA, Anderson e Wagner, por todo auxílio e paciência durante as atividades desenvolvidas nos períodos de estágio docente e nas etapas de coleta de dados para a realização deste trabalho.

Aos meus queridos amigos de pós-graduação, Rafael Francisco, Rafael Lino, Brenda Fernandes, Danilo Rosendo e Luiz Fiscina, pelas discussões técnicas e por terem tornado esta desafiadora etapa da vida em um período de crescimento tanto profissional quanto pessoal.

Aos meus pais, Edna e Marcos, deixo um agradecimento especial, por todas as lições de amor, companheirismo, amizade e dedicação. Sinto-me orgulhoso e privilegiado por ter pais tão especiais. E à minha maravilhosa irmã, Patrícia, sempre disposta a me apoiar e me proteger em todas as situações.

O presente trabalho foi realizado com apoio da bolsa de mestrado fornecida pelo Fundo de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão (FAEPEX), da Pró Reitoria de Pesquisa (PRP) da UNICAMP, processo nº 2859/18.

## Resumo

O avanço da tecnologia computacional, o desenvolvimento de componentes eletrônicos compactos e a disseminação de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), facilitaram a coleta e processamento de dados para a elaboração de produtos cartográficos digitais com alta resolução e precisão. O aumento na utilização dessas tecnologias e de VANTs é decorrente da capacidade da plataforma em realizar automaticamente um voo pré-programado, decolar verticalmente, sobrevoar um determinado ponto para obter imagens, e pousar em um ponto específico. Além disso, é possível monitorar todos os sensores em tempo real. Entretanto, algumas desvantagens como a limitação de carga que a plataforma transporta, autonomia limitada da bateria, dependência de fatores externos e a baixa qualidade dos sensores se fazem presentes. No entanto, a geometria para aquisição dos dados, a definição do número de pontos de controle para o georreferenciamento indireto das imagens, e para a calibração da câmara, ainda não estão bem definidos para muitos usuários. Em muitos casos, os produtos obtidos, como os Modelos Digitais de Terreno (MDT) e as ortoimagens, não passam por avaliações considerando a regulamentação nacional, como o Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), um conjunto de normativas nacionais que devem ser seguidas para a geração de produtos confiáveis para serem utilizados em projetos de infraestrutura e transportes. Neste trabalho, foram realizados experimentos sob diferentes configurações de processamento, utilizando-se de dados oriundos de um VANT de baixo-custo. O objetivo é avaliar os produtos gerados à diferentes configurações e sugerir uma solução ótima, em relação ao custo e tempo, para a aquisição e geração de produtos PEC - Classe A, conforme a legislação brasileira. Os resultados obtidos sugerem que é possível gerar produtos Classe A na escala 1:500 (planimetria) e 1:1000 (altimetria dos pontos cotados com equidistância entre curvas de nível de 0,50m) sobrevoando uma área de 3,85ha, com recobrimento de 80%/60% (longitudinal e lateral, respectivamente), a 31m de altura com um elemento de resolução espacial aproximado de 1 cm, câmara pré-calibrada e 5 pontos de controle.

**Palavras-chave:** VANT, Fotogrametria, Controle de Qualidade, Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais, Engenharia Civil.

## Abstract

The advance of computational technology, the development of compact electronic components and the dissemination of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), has facilitated the data collection and processing for the generation of accurate and high resolution digital cartographic products. The growth in the usage of these technologies and UAVs is due to the aerial platform ability to automatically follow a preprogrammed flight plan, vertically take off, hover on a waypoint to acquire images, and to land at a specific point. In addition, it is possible to monitor all sensors in real time. The drawback of this flexibility is in regard to the limited Maximum Take-off Weight (MTOW), battery endurance, weather conditions and low accuracy sensors. However, the block geometry for data acquisition, the definition of number of ground control points for indirect imagery georeferencing, and for camera calibration, are still not well defined for many users. In several cases, the quality of the generated digital products, mainly Digital Terrain Model (DTM) and orthomosaic are not evaluated considering national regulations, such as the Cartographic Accuracy Standard for Digital Cartographic Products (PEC-PCD), a set of national regulations that must be followed in order to generate accurate and reliable products - to be used in infrastructure and transportation projects. In this research, experiments were carried out under different processing configurations, using data acquired by a low-cost UAV. The aim was to evaluate the generated products at different configurations and to suggest an optimal set of parameters, in terms of time and cost, for the acquisition and generation of Class A products according to Brazilian regulation. The analysis suggests that an optimum survey configuration for an area of 3.85 ha is: 80% and 60% overlap rate (longitudinal and lateral, respectively), at 31 m Above Ground Level (AGL) with a Ground Sample Distance (GSD) of around 1 cm, with pre-calibrated camera and 5 control points, generates Class A products at a scale of 1:500 (planimetry) and 1:1.000 (DTM altimetry with contour interval of 0.50 m).

**Keywords:** UAV, Photogrammetry, Quality Control, Cartographic Accuracy Standard for Digital Cartographic Products, Civil Engineering.

## Lista de Figuras

Figura 1. Paralaxe e profundidade. ....	36
Figura 2. Transformação de coordenada tela para sistema fotogramétrico. ....	38
Figura 3. Condição de colinearidade. ....	41
Figura 4. Recobrimento das imagens. ....	42
Figura 5. Geometria de aquisição de imagens para o SfM. ....	44
Figura 6. Escala de uma fotografia vertical. ....	46
Figura 7. Imagens com diferentes resoluções. a) 72x72 pixel. b) 36x36 pixel. c) 18x18 pixel. d) 9x9 pixel. ....	47
Figura 8. Distorção radial simétrica. ....	51
Figura 9. Efeitos da distorção radial (o frame ideal é apresentado por uma linha contínua e o frame com deslocamento é apresentado em por linha tracejada). (a) Distorção na forma de almofada (pincushion distortion). (b) Distorção na forma de barril (barrel distortion). ....	52
Figura 10. Modelos de VANT. a) VANTs de asa fixa, b) VANTs de asa rotativa. ....	55
Figura 11. Princípio da Sombra. ....	71
Figura 12. Fotoíndice. ....	75
Figura 13. Confecção dos alvos de cartolina. a) Dimensão do alvo. b) Corte em triângulos. C) Disposição final dos alvos. d) Representação dos alvos. ....	78
Figura 14. Resolução dos alvos a diferentes alturas de voo. a) 21m. b) 31m. c) 40m. ....	79
Figura 15. Materialização dos alvos. a) Alvo implantado. b) Sinalização horizontal das vias. d) Sinalização horizontal do estacionamento. ....	79
Figura 16. Localização dos pontos levantados. ....	80
Figura 17. VANT DJI Phantom 4 Advanced. ....	81
Figura 18. Divisão da área em estudo. ....	83
Figura 19. Interface da aplicação DroneDeploy com a ferramenta de planejamento da missão. ....	84
Figura 20. Interface da aplicação DroneDeploy para a realização do levantamento. ....	85
Figura 21. Alturas de voo. ....	85
Figura 22. Fluxograma das atividades. ....	87
Figura 23. Dados da área 2. ....	91

Figura 24. Configuração dos pontos de controle.....	96
Figura 25. Configuração dos pontos de controle e 22 de checagem. ....	97
Figura 26. Configuração dos pontos de controle e de checagem. ....	104
Figura 27. Influência do recobrimento de imagens na geração de ortoimagens. ....	115

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
ASPRS	<i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
$f$	Distância focal
CP	Centro Perspectivo
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DSG	Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro
EP	Erro Padrão
ET-ADGV	Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais
ET-CQDG	Especificação Técnica para o Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
ICA	Instituto do Comando da Aeronáutica
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
INDE	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
ISPRS	<i>International Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
MVS	<i>Multi-View Stereo</i>
NSSDA	<i>National Standard for Spatial Data Accuracy</i>
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais
POE	Parâmetros de Orientação Exterior
POI	Parâmetros de Orientação Interior
PMD	Peso Médio de Decolagem
REMQ	Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
SARPAS	Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SfM	<i>Structure from Motion</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	Considerações iniciais .....	13
1.2	Estado da arte na avaliação de produtos cartográficos .....	15
1.3	Objetivos.....	30
1.4	Potencial de contribuição do tema proposto .....	31
1.5	Estrutura da dissertação .....	32
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>34</b>
2.1	Fotogrametria Digital .....	34
2.2	Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) .....	53
2.3	Controle de Qualidade .....	58
2.4	Aplicações para os produtos cartográficos digitais gerados a partir de dados obtidos a partir de processos fotogramétricos .....	67
2.5	Legislação brasileira no uso de VANT .....	68
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODO</b> .....	<b>73</b>
3.1	Materiais.....	73
3.2	Método .....	87
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>96</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>120</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>123</b>
	<b>APÊNDICE A – Coordenadas dos marcos geodésicos cedidos pelo LTG – UTM SIRGAS2000 (-23S)</b> .....	<b>137</b>
	<b>APÊNDICE B – Coordenadas dos marcos geodésicos implantados– UTM SIRGAS2000 (-23S)</b> .....	<b>138</b>
	<b>APÊNDICE C – Coordenadas dos pontos levantados – UTM SIRGAS2000 (-23S)</b>	

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

Tradicionalmente, a coleta de dados geoespaciais para levantamentos planialtimétricos é realizada por meio de técnicas convencionais, em que são usados equipamentos como níveis, estações totais e/ou receptores/antenas GNSS (*Global Navigation Satellite System*), para a medição de ângulos e/ou distâncias visando a determinação da posição tridimensional de pontos de interesse. Ciências como a Fotogrametria, em que se utiliza de uma sequência de imagens aéreas para a reconstrução tridimensional da superfície terrestre, apresenta-se como uma alternativa mais rápida para coleta de dados geoespaciais (GREENWOOD *et al.*, 2019).

Com o avanço da tecnologia computacional e o uso de novos tipos de sensores, uma definição mais abrangente foi proposta, em 2016, pela ISPRS (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*): Fotogrametria é a arte, ciência e tecnologia responsável pela extração confiável de pontos tridimensionais e de informações espaciais, geralmente, de objetos e cenas a partir de imagens e de uma série de dados.

Dentre os novos tipos de sensores, cada vez mais leves e mais baratos, a aplicação de câmaras digitais e os sensores de georreferenciamento direto, como os receptores/antenas GNSS e sistemas inerciais, tornou-se possível o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTS) para mapeamento aéreo. Esta plataforma tem como objetivo realizar o registro controlado das imagens sobre uma determinada área, sendo limitada pela capacidade a carga ou Peso Máximo de Decolagem (PMD). Existem diversas nomenclaturas para designar este tipo de aeronave, como *DRONES* (do inglês Zangão, devido ao som que produzem), Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA - *Remotely Piloted Aircraft*), UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*), Veículo Aéreo Remotamente Pilotado (VARP), etc (COLOMINA e MOLINA, 2014). Neste trabalho será adotada a nomenclatura VANT para designar este tipo de aeronave.

Os VANTS podem ser de asa fixa ou multirotores, sendo as vantagens e desvantagens relativas ao tipo de propulsão, capacidade de carga, custo de aquisição e manutenção. Enquanto os de asa-fixa apresentam maior autonomia, devido

principalmente à sua capacidade em acomodar maiores cargas, como uma bateria de maiores dimensões, os multirotores por sua vez ficam limitados a menores áreas, devido à baixa autonomia das baterias. Além disso, Tahar e Ahmad (2013) citam que as plataformas de baixo custo transportam, além de baterias menores que resultam em uma menor área levantada, sensores de baixo custo, que por sua vez podem derivar observações de baixa precisão e/ou erros sistemáticos.

Por ser de fácil aplicação, o número de empresas que usam dados obtidos a partir de sensores acoplados ao VANT teve um aumento significativo (OLIVEIRA *et al.*, 2015). Entre os fatores atribuídos a esse aumento, além da flexibilidade do sistema e do baixo custo de aquisição e manutenção, Debiase *et al.* (2012) cita o bom desempenho dos novos *software* fotogramétricos em automatizar diversas etapas do processamento a um baixo custo de produção, se comparado as técnicas convencionais de levantamento topográfico.

Outro fator que contribuiu para a popularização da Fotogrametria foi o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos com maior capacidade de processamento, novos algoritmos de inteligência artificial e de visão computacional e, como o SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) (LOWE, 2004) e suas variações (ASIFT, CoSIFT, PCA-SIFT, DAYSI, etc), SURF (*Speeded up Robust Features*) (BAY *et al.*, 2006), FAST (*Features from Accelerated Segment Test*) (ROSTEN e DRUMMOND, 2006) e *semi-global matching* (REMONDINO *et al.*, 2014). Tais algoritmos realizam a identificação de *tie points* a partir de técnicas de correspondência de imagens e possibilitam a produção de modelos digitais tridimensionais detalhados (VOSELMAN *et al.*, 2014) por meio do *bundle block adjustment* (MIKHAIL *et al.*, 2001) - fototriangulação; ou também por meio de algoritmos de visão computacional baseados em *Structure from motion* (SfM) (WESTOBY *et al.*, 2012).

Dentre as aplicações dos produtos cartográficos, como as ortoimagens, Modelos Digitais de Superfície (MDS) e os Modelos Digitais de Terreno (MDT), na área da engenharia civil, podemos citar: o cálculo de volume de corte e aterro (SIEBERT e TEIZER, 2014), o monitoramento de infraestruturas (GREENWOOD *et al.*, 2019), o monitoramento de rodovias para fins de manutenção (PATIAS *et al.*, 2017), monitoramento de barragens (RIDOLFI *et al.*, 2017), mapeamento (OLIVEIRA *et al.*, 2015), e o monitoramento de erosão (JAMES *et al.*, 2017) etc. Segundo Santos *et al.* (2000), os produtos podem ser empregados em projetos de planejamento e

transportes, tais como: projetos de estradas, cadastro urbano, atualização cartográfica, avaliação de imóveis, dentre outros.

Considerando as limitações relacionadas a qualidade dos sensores embarcados, a utilização de *software* fotogramétricos e por se tratar de produtos cartográficos digitais com uso final previsto para aplicações em engenharia civil, torna-se necessário efetuar um controle de qualidade a partir da análise da precisão e identificação de tendências, considerando-se os diferentes parâmetros que possuem influência na fototriangulação, e conseqüentemente nos produtos finais.

Diante deste exposto, este trabalho apresenta uma investigação da influência dos métodos de calibração de câmara, do uso diferentes números de pontos de controle, de altura de voo e de taxa de recobrimento das imagens, na qualidade posicional dos produtos cartográficos digitais. A identificação de um método de calibração de câmara bem como uma configuração ótima tem como objetivo proporcionar resultados precisos, confiáveis e que apresentem um equilíbrio entre a qualidade e o custo de produção de MDTs e ortomosaicos a partir de dados obtidos com um VANT multirotor de baixo custo.

## 1.2 Estado da arte na avaliação de produtos cartográficos

A etapa de avaliação é fundamental e envolve diversos indicadores de qualidade. Atualmente, existem inúmeros estudos que abordam a influência de diferentes dados de entrada e de parâmetros de processamento, sendo diretamente relacionados à qualidade posicional dos produtos finais. Para a geração de um produto cartográfico digital confiável por meio da Fotogrametria são necessários 5 conjuntos de dados: coordenadas no espaço objeto (pontos de controle), POI, imagens, POE e geometria de aquisição (escalas e taxas de recobrimento). A seguir, como estado da arte, apresenta-se uma breve descrição dos métodos existentes, definindo a influência dos principais parâmetros estudados, sendo eles: pontos de controle, resolução espacial, taxa de recobrimento e calibração de câmara, bem como a métrica usada para a avaliação da qualidade posicional dos resultados.

**Pontos de controle:** o uso de pontos de controle no terreno é fundamental para o georeferenciamento indireto das imagens, bem como para a correção dos erros sistemáticos produzidos pelo conjunto de lentes das câmaras digitais (caso seja

aplicada a calibração em serviço). Atualmente, existem diversas literaturas que investigaram a influência deste parâmetro para a geração de ortoimagens, MDTs e MDSs (AGÜERA-VEGA *et al.*, 2017a; MARTÍNEZ-CARRICONDO *et al.*, 2018; RANGEL *et al.*, 2018; SANZ-ABLANEDO *et al.*, 2018). O objetivo destes estudos é analisar o comportamento dos resultados em função da quantidade e localização dos pontos de controle, e sugerir uma solução ótima visando a redução do trabalho de campo na etapa de aquisição de pontos georreferenciados.

Rangel *et al.* (2018) realizaram um levantamento em uma área de 270ha com taxas de recobrimento de imagens de 74%/30% (longitudinal e lateral, respectivamente), a uma altura de voo de 228m, que resulta em um elemento de resolução espacial aproximado de 5,60cm. Para a coleta das imagens, utilizou-se o VANT multirrotor de baixo custo S500 equipado com uma câmara digital não-métrica Olympus E-PM1. No total, 530 imagens foram obtidas, mas apenas 265 imagens foram utilizadas nos processamentos. Foram processadas 13 diferentes combinações de pontos de controle, variando-se tanto a localização (periférico e central) como a quantidade desses pontos (6 a 54 pontos). A avaliação da qualidade das ortoimagens e dos MDTs foram realizadas a partir de pontos de checagem obtidos via receptores GNSS de dupla frequência, com a quantidade variando entre 130 e 170 pontos. Como resultado, foi identificado que pontos localizados nas bordas externas da área em estudo apresentam incrementos na precisão planimétrica, e pontos localizados no interior da área apresentam incrementos na precisão altimétrica. O aumento da quantidade de pontos utilizados no processamento resulta em melhores resultados. Contudo, identificou-se que a utilização de mais de 20 pontos de controle não necessariamente resulta em um aumento expressivo na precisão dos resultados. Os resultados obtidos utilizando 22 pontos de controle localizados nas bordas do modelo resultam em 85,6% dos pontos de checagem com erros planimétricos menores que 5 vezes o elemento de resolução espacial, e em 64,5% dos pontos de checagem com erros altimétricos maiores que 5 vezes o elemento de resolução espacial.

Sanz-Ablanedo *et al.* (2018) realizaram um levantamento em uma área de 1225ha com inclinação de 24,5% a uma altura de voo fixa de 120m a partir do ponto mais alto da área em estudo, resultando em um elemento de resolução espacial médio de 6,86cm (variando entre 3cm a 11cm). A aquisição de 2535 imagens foi realizada a taxas de recobrimento de imagens de 86%/76% (longitudinal e lateral, respectivamente) por meio de uma câmara digital Samsung NX500 de 28 megapixels

transportada por um VANT de asa fixa. Utilizando um receptor GNSS de dupla frequência, foram obtidas as coordenadas de 102 pontos, dos quais serão utilizados como controle ou como checagem. Um total de 3465 diferentes combinações de pontos de controle foram testadas. Os autores desenvolvem uma extensa análise visando estabelecer uma correlação entre os resíduos da fototriangulação para os pontos de controle e para os pontos de checagem, e para a quantidade de pontos de controle que devem ser visíveis para um determinado número de imagens (neste caso, 3,5 pontos de controle para cada 100 imagens). Além de identificar que os erros obtidos para a altimetria são relativamente maiores que para a planimetria, o erro altimétrico é de aproximadamente 2,5 vezes os erros obtidos para as componentes X e Y. Além disso, identifica-se que para uma mesma quantidade de pontos de controle, o erro para uma má distribuição é duas vezes maior que para uma distribuição ótima. Neste caso, os autores apontam a distribuição ótima como sendo uma configuração na qual os pontos são localizados de uma maneira distribuída em uma malha triangular, abrangendo as bordas externas e o interior da área em estudo. Os melhores resultados foram obtidos aplicando a calibração em serviço utilizando em média de 90 a 100 pontos de controle, no qual são gerados erros tridimensionais de aproximadamente 2,5 vezes o elemento de resolução aproximado.

Martínez-Carricondo *et al.* (2018) realizaram um levantamento utilizando um VANT multirotor de 6 hélices em uma área com 17,64ha. A área em estudo não possui vegetação ou feições acima do nível do solo. A aquisição das imagens foi realizada com uma câmara digital não-métrica Nikon D-3100, com distância focal fixa de 16mm, resolução de 14,2 megapixels, a uma altura de 120m, resultando em elemento de resolução espacial aproximado de 3,3cm. No total, 160 imagens foram obtidas a taxas de recobrimento de imagens de 90%/80% (longitudinal e lateral, respectivamente). As coordenadas tridimensionais de 72 pontos (pontos de controle e checagem) foram obtidas por meio de receptores GNSS de dupla frequência, com precisão horizontal e vertical variando entre  $\pm 1$ cm e  $\pm 2$ cm, respectivamente. Os processamentos foram realizados por meio do *software* Agisoft PhotoScan. Visando a análise da influência dos pontos de controle, foram analisadas 12 diferentes combinações (4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 16, 20, 24, 30 e 36), 5 diferentes configurações de distribuição (nas bordas, no centro, nos cantos, estratificada e aleatória) e 5 repetições, resultando em um total de 300 processamentos. A análise estatística foi baseada nas coordenadas altimétricas, extraídas dos MDSs, e nas coordenadas

planimétricas, extraídas das ortoimagens. Diversos processamentos foram realizados visando uma configuração ótima para a alta precisão para ambos produtos. Foi identificado que, para este objetivo, a melhor configuração é obtida utilizando aproximadamente 1,7 pontos de controle por hectare distribuídos de maneira estratificada, no qual a Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático (REMQ) em Z é de 0,047m e o REMQxy é de 0,045m.

Agüera-Vega *et al.* (2017a) realizaram um levantamento de uma área com 17,64ha com um VANT multirrotor de 8 hélices. Foram obtidas 160 imagens com câmara-não métrica Nikon D-3100 de 14,2 megapixels, distância focal fixada em 16mm, elemento de resolução espacial de aproximadamente 3,3cm a altas taxas de recobrimento, sendo 90% longitudinal e 80% lateral. As coordenadas dos 72 pontos a serem utilizados como controle e checagem foram obtidas com receptores GNSS de dupla frequência. Foram analisadas, a uma mesma configuração de processamento, variações da quantidade de pontos de controle (4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15 e 20 pontos). No total, 45 processamentos foram realizados utilizando o *software* Agisoft PhotoScan. Como resultado, obteve-se o REMQ planimétrico a partir das observações extraídas da ortoimagem e o REMQ altimétrico a partir dos MDSs, nas quais foram comparadas com as coordenadas dos pontos de checagem (com o número variando entre 52 a 69 pontos). Os melhores resultados para os REMQ planimétricos foram de 4,6cm e 4,5cm com 15 e 20 pontos de controle, respectivamente. Para a componente altimétrica, com 15 e 20 pontos de controle, o REMQ obtido foi de 5,8cm e 4,7cm, respectivamente. A partir das análises, identifica-se a redução dos erros planimétricos e altimétricos em função do aumento da quantidade do número de pontos de controle. Além disso, ao serem utilizados 10 pontos de controle, obteve-se um REMQ planimétrico aproximado ao dos processamentos com 15 e 20 pontos de controle, porém, com um desvio padrão maior que o REMQ dos resultados obtidos com 15 e 20 pontos de controle.

Outros trabalhos com abordagem semelhante foram desenvolvidos por Jaud *et al.* (2016), Tonkin e Midgley (2016). De acordo com os trabalhos citados, a determinação do número ótimo de pontos de controle apresenta uma redução no custo e no tempo para produção de informações confiáveis. Outro ponto importante é a relação entre a quantidade de pontos de controle e a redução na magnitude dos erros obtidos.

**Altura de voo:** Udin e Ahmad (2014), Dandois *et al.* (2015), Agüera-Vega (2017b), Torres-Sánchez *et al.* (2018), analisaram a influência das diferentes alturas de voo na geração de ortoimagens, MDSs e MDTs.

Udin e Ahmad (2014) utilizaram o VANT Y6 com câmara digital de 16,1 megapixels e distância focal fixada em 16,63mm para a realização de 4 voos com alturas de 40m, 60m, 80m e 100m, a taxas de recobrimento de 60% (lateral e longitudinal). Os resultados dos processamentos com 10 pontos de controle à diferentes alturas não apresentaram grandes diferenças quanto aos erros planimétricos. Em contrapartida, foram obtidos maiores erros na componente altimétrica para maiores alturas de voo. Os erros altimétricos para as alturas de 40m, 60m, 80m e 100m foram de 0,178m, 0,212m, 0,287m e 0,324m, respectivamente. Os estudos citados confirmam a afirmação de Gómez-Candón *et al.* (2014) e Dandois *et al.* (2015) em que a variação da altura de voo possui maior impacto na geração de modelos de elevação.

Dandois *et al.* (2015) explicita que a densidade da nuvem de pontos está diretamente relacionada à altura de voo. A altura de voo e a resolução da câmara definem o menor elemento a ser mapeado, sendo possível obter melhores resultados utilizando uma câmara de melhor resolução, reduzindo a altura de voo ou utilizando avançados procedimentos computacionais de correspondência de imagens. Por outro lado, ao reduzir a altura de voo em áreas com objetos altos, surgem áreas do terreno que não são visíveis tanto nas imagens, quanto nas ortoimagens, esse efeito é conhecido como áreas de oclusão (OLIVEIRA *et al.*, 2018). O efeito das áreas de oclusão para geração de ortoimagem verdadeira não será abordado neste trabalho, porém influenciam no produto final em voos baixos.

Agüera-Vega (2017b) utilizaram um VANT multirrotor com câmara digital de 24,3 megapixels e distância focal fixada em 16mm para a realização de 4 voos com alturas de 50m, 80m, 100m e 120m, com resoluções aproximadas de 1,2cm, 1,9cm, 2,4cm e 2,9cm, respectivamente, e recobrimento longitudinal de 90% e lateral de 80%. Os processamentos foram realizados com o *software* PhotoScan e utilizaram com 10 pontos de controle obtidos com receptores/antenas GNSS. A partir dos resultados obtidos a diferentes alturas, identificou-se que essa variação não expressa influência na precisão planimétrica nas ortoimagens. Em contrapartida, identifica-se uma depreciação na precisão altimétrica nos MDS conforme a altura de voo aumenta. Os

erros obtidos para a componente altimétrica são de 0,035m, 0,053m, 0,059m e 0,061m para as alturas de 50m, 80m, 100m e 120m, respectivamente.

Torres-Sánchez *et al.* (2018) realizaram levantamentos a duas diferentes alturas (50m e 100m) com o objetivo de determinar a altura e o volume de culturas de oliveiras. Os resultados demonstram que apesar de reduzir o desvio-padrão das observações, a variação da altura não apresenta incrementos ou depreciação da precisão para a determinação do volume das copas das árvores.

**Taxa de recobrimento:** Dandois *et al.* (2015) e Domingo *et al.* (2019) analisaram a influência das taxas de recobrimento das imagens na geração de ortoimagens, MDS e MDT.

Dandois *et al.* (2015) realizaram experimentos com taxas de recobrimento lateral (20%, 40%, 60%, 80%) e longitudinal (96%, 92%, 88%, 84%, 80%, 76%, 72%, 68%, 64% e 60%) com imagens obtidas com um VANT multirrotor equipado com uma câmara digital Canon ELPH 520HS com 10 megapixels e distância focal fixada em 4mm. A precisão posicional das nuvens de pontos e MDTs foram mensuradas por meio do REMQ, sendo as coordenadas de referência obtidas com um sistema LiDAR (*Light Detection and Ranging*) devido à dificuldade de obtenção dos dados de elevação das copas das árvores. Este sistema é capaz de registrar, por meio dos retornos dos pulsos eletromagnético, as copas das árvores e o terreno natural, sendo o primeiro retorno referente à copa das árvores (LIM *et al.*, 2003). Como resultado, observou-se uma melhora na precisão dos resultados planimétricos e altimétricos a maiores taxas de recobrimento lateral, obtendo-se uma taxa ótima a 60%. Os autores identificaram que o recobrimento longitudinal possui maior influência nos erros altimétricos se comparado ao recobrimento lateral, por isso, sugere-se que sejam aplicadas altas taxas de recobrimento longitudinal.

Em Domingo *et al.* (2019) foi avaliada a redução de 80% para 70% de recobrimento lateral a um mesmo recobrimento longitudinal de 90% para a geração de modelos tridimensionais de uma floresta para medição de emissão de carbono em uma área de 200ha. Os voos foram realizados a 325m de altura com o VANT asa fixa eBee, da SenseFly, e câmara digital Sony IXUS127 HS com resolução de 16,1Mpixels, e com elemento de resolução espacial aproximado de 10cm. Além da redução do tempo de aquisição de 206 minutos para 51 minutos, do número de imagens obtidas de 1691 para 370, e do tempo de processamento com o *software* PhotoScan,

observou-se um menor desvio padrão e melhores acurácias a 70% ao invés de 80% de recobrimento lateral.

Um alto número de imagens deve ser obtido de diferentes posições para a reconstrução de uma área complexa com construções, árvores de grande porte e terrenos com alta declividade. Esse fator pode ser um problema, visto que grandes taxas de recobrimento resultam em um grande volume de dados a serem processados para geração de produtos cartográficos digitais – o que não é desejável para algumas aplicações. O levantamento com baixas taxas de recobrimento reduz drasticamente o tempo de processamento, por outro lado os produtos gerados podem resultar em áreas de oclusão (OLIVEIRA *et al.*, 2018) ou em falhas na ortoimagem (FRASER e CONGALTON, 2018). Compreende-se que uma ótima configuração é relacionada às características da área a ser imageada (feições e declividade do terreno), altura de voo da plataforma e a resolução da câmara digital.

**Calibração de Câmara:** Bolkas (2019) e Hamid e Ahmad (2014) analisaram a influência da calibração de câmara.

Bolkas (2019) analisou a geração de MDE a partir da calibração em serviço sob diferentes configurações de pontos de controle a duas diferentes alturas (50m e 90m), com um elemento de resolução espacial aproximado de 1,1cm e 1,9cm, respectivamente. Foi utilizado um VANT Aibotix X6 e uma câmara digital Nikon D3400 de 24 megapixels e distância focal com 18 mm. O levantamento foi conduzido a taxas de recobrimento 70%/50% (longitudinal e latera, respectivamente) em uma área com 2,5ha na qual representa um espaço urbano, com estacionamentos, ruas, e objetos acima do solo. Os processamentos foram realizados com o *software* Agisoft PhotoScan. A pesquisa foi baseada em dois métodos: (1) sendo inserido tanto os POE quanto os POI como desconhecidos e (2) aplicando os POE obtidos a partir de observações com receptores de dupla frequência e inserindo os POI como desconhecidos na fototriangulação. A avaliação da qualidade do MDE foi realizada a partir de pontos de checagem obtidos com estação total e com um laser scanner terrestre. No que se refere à primeira abordagem, os erros obtidos tornam-se estáveis quando a quantidade de pontos de controle varia entre 8 a 12 pontos de controle (com distância entre os pontos de 85m e 65m, respectivamente). Para essa configuração, os erros obtidos variam entre 1-2cm nos estacionamentos e nos segmentos de rua, e 3-5cm para telhados. O desvio padrão de aproximadamente 2cm e a análise na variação da distância entre os pontos de controle indicam que os erros podem estar

relacionados à orientação das imagens ao invés da calibração da câmara. Em relação à segunda abordagem, para obter o mesmo erro de 1-2cm nos estacionamentos e nos segmentos de rua, a quantidade necessária de pontos de controle reduz para 4 a 5 (separados por uma distância de 120m e 105m, respectivamente). Para objetos complexos acima do solo, um mínimo de 6 pontos de controle (separados por uma distância de 105m) geram erros de 5-7cm. O autor salienta o impacto da incorreta calibração câmara quando aplicada para os levantamentos em ambientes complexos. Além disso, o autor sugere um alto número de *tie points* e de pontos de controle, atentando-se para a distância entre os mesmos, para maiores precisões dos resultados finais.

Em Hamid e Ahmad (2014), estudou-se o efeito da profundidade de um campo tridimensional na determinação dos parâmetros interiores de uma câmara Canon Power Shot SX230 HS. Visando manter a convergência entre as imagens, foi utilizado um VANT multirrotor para aquisição das imagens de um campo de calibração tridimensional com pontos de controle no solo. Comparando-se os resultados com um campo de calibração de menor escala, foi possível estimar todos os parâmetros com menor desvio-padrão usando o campo de calibração com maiores variações de profundidade. Outros trabalhos com abordagem similar são apresentados por Sun *et al.* (2018) e Oniga *et al.* (2018).

Por outro lado, é possível realizar a calibração por meio de algoritmos da computação visual. Esses métodos, como apresentado por Zhang (2000), Douterloigne *et al.* (2009) e De la Escalera e Armingol (2010), em que padrões repetitivos bidimensionais, como os cantos dos quadrados em um tabuleiro de xadrez preto e branco com dimensões conhecidas, são identificados automaticamente. Após identificados os pontos de interesse, utiliza-se o modelo de distorção “*Pinhole*”, descrito por Mikhail *et al.* (2001) e Kraus (2007). Esse método possui uma abordagem mais prática e rápida, porém, é necessário um maior número de imagens. Visando solucionar a necessidade de redundância das observações, Geiger *et al.* (2012) apresentaram uma calibração a partir de uma única imagem, o método é eficaz, visto que os esforços para a calibração são reduzidos a uma única imagem e os resultados de detecção dos cantos do tabuleiro apresentaram erros de 0,18 pixel.

Para o melhor entendimento sobre os métodos de calibração de câmara, recomenda-se a leitura de trabalhos como os de Pérez *et al.* (2012), Campos *et al.* (2015) e Remondino e Fraser (2016), em que são apresentadas comparações entre a

calibração em laboratório e a calibração em serviço, com a materialização de um campo de calibração tridimensional.

**Combinação de Parâmetros:** neste subtópico são apresentados os estudos que abordam a combinação de parâmetros.

Em Maurice *et al.* (2015) foram realizados dois diferentes processamentos aplicando-se a calibração em serviço utilizando 0 pontos e 10 pontos de controle visando a geração de ortoimagens para atualização cadastral. A qualidade da calibração foi mensurada a partir de 4 pontos de checagem cujas coordenadas foram extraídas das ortoimagens e comparadas com as coordenadas de referência obtidas com receptores/antena GNSS de dupla frequência (desvio-padrão das observações de  $\pm 2\text{cm}$ ). A área em estudo é localizada na cidade de Quigali, em Ruanda, e possui aproximadamente 9,5ha. A aquisição das imagens foi planejada com o Pix4D Capture *software*, a uma altura de voo de 50m, a taxas de recobrimento de imagens de 85% longitudinal e 75% lateral. A coleta de 954 imagens foi realizada com o DJI Phantom 2 Vision, com uma câmara digital de 16MP, tamanho do pixel de 1,4 $\mu\text{m}$  e distância focal de 5mm. Na etapa de processamento, considerou-se a calibração em serviço e os POE obtidos com os sensores do VANT – sendo utilizados como aproximação inicial. Como resultado, os REMQ obtidos por meio de uma ortoimagem com GSD aproximado de 3,3cm e gerada a partir de processamentos dois processamentos com zero e com 10 pontos de controle, é respectivamente de 1,2m de 0,079m. Os autores indicam que os erros são derivados da baixa precisão dos receptores GNSS e IMU, e também a baixa precisão da sincronização entre câmara e os receptores GNSS.

Kraft *et al.* (2016) desenvolveram um VANT com um sistema de georeferenciamento direto em conjunto com uma câmara de 12MP. O sistema é composto de receptores de dupla frequência (Novatel OEM615) e uma unidade inercial (STIM 300) – precisão melhor que 1 $\mu\text{s}$ . Os POE das imagens foram obtidos a partir de pós-processamento dos dados dos receptores de dupla frequência. O primeiro passo dos experimentos foi analisar o comportamento temporal dos POI. Para isso, a calibração da câmara foi realizada diversas vezes em um período de 5 meses utilizando dois campos 3D localizados na Universidade de Ciências Aplicadas de Beuth, em Berlim, e na Universidade de Ciências Aplicadas de Bochum, na Alemanha. O levantamento dos alvos codificados nos campos de calibração possui precisão melhor que 1mm em cada componente. Após a análise temporal dos POI, nota-se um comportamento constante, logo, pode-se assumir que a câmara utilizada

apresenta características de uma câmara métrica. O segundo passo foi conduzir a aquisição das imagens em duas direções sob uma área de 0,56ha a taxas de recobrimento de recobrimento de 90% longitudinal e 75% lateral com um GSD calculado de 17mm a 55m de altura. Foram levantados 39 pontos de controle via receptores de dupla frequência (erros de 2mm em planimetria e 3mm em altimetria) e que foram posicionados em alturas diferentes em um complexo de construções. Os processamentos foram realizados com os *software* Trimble Match-At, Agisoft PhotoScan e Pix4DMapper, sob diferentes configurações de calibração de câmara (considerando POI fixos na aerotriangulação e a calibração em serviço), diferentes configurações de ponto de controle (0, 7 e 19 pontos), e diferentes taxas de recobrimento. Como resultado, no que diz respeito aos diferentes *software*, o Trimble Match-AT gerou os melhores resultados em todos os processamentos. Os resultados utilizando pontos de controle não apresentaram diferenças evidentes devido a acurácia destes pontos, da altura de voo e do alto recobrimento de imagens (utilizando dois sentidos de voo – voo cruzado). Nota-se, que a geometria dos pontos de controle não favoreceu os resultados. Comparando-se os resultados obtidos com os processamento utilizando 7 pontos (com os pontos de controle localizados nas bordas e no centro e os pontos de checagem posicionados no interior da área) e com 19 pontos de controle (com os pontos de checagem posicionados nas bordas) obteve-se piores resultados para a segunda configuração (com REMQ 3D de 11mm contra 9mm (georeferenciamento direto utilizando o *software* Match-AT) e de 14mm contra 9mm (calibração em serviço utilizando o *software* Pix4D). No que diz respeito ao georeferenciamento direto, POI fixos na aerotriangulação, sem a aplicação de pontos de controle e um voo regular, obteve-se um REMQ de 22mm (1,3 vezes o GSD).

Gerk e Przybilla (2016) analisaram a inserção de observações derivadas do sistema RTK-GNSS aerotransportado na aerotriangulação, bem como a variação do número de pontos de controle para a calibração em serviço. Para a análise, realizou-se duas aquisições de dados, a primeira foi realizada em uma área de 66ha, a uma altura de 105m de altura (com o terreno variando em 50m de altura entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo), utilizando um VANT Mavinci Sirius Pro, com receptores GNSS de dupla frequência, a taxas de recobrimento de imagens de 85% longitudinal e 65% lateral. Utilizando uma câmara Panasonic LumixGX1-Pancake14mm-PRO, foram obtidas 1900 imagens com um GSD aproximado de 2,7cm. Além disso, realizou-se um voo cruzado a uma altura de 75m em uma porção

de 20% da área. Para os pontos de controle e checagem, utilizou-se receptores de dupla frequência para levantar 35 pontos (com precisão melhor que  $\pm 3\text{cm}$ ). A segunda aquisição foi realizada em Zollern, na Alemanha, em uma área de 17,5ha, com as mesmas configurações do primeiro levantamento (altura de voo, GSD e voo cruzado). Para os pontos de controle e checagem, utilizou-se receptores de dupla frequência para levantar 34 pontos (com precisão melhor que  $\pm 2\text{cm}$ ). Foram realizados dois diferentes experimentos, o primeiro considerou apenas a fototriangulação com parâmetros adicionais em função do número de pontos de controle e de imagens obtidas com os voos cruzados em diferentes alturas – sem considerar as observações RTK/GNSS. O segundo considera as coordenadas obtidas com o sistema RTK/GNSS para auxiliar na aerotriangulação e leva-se em consideração a variação do número de pontos de controle para a calibração em serviço. No primeiro experimento, na área 1, a utilização do voo cruzado não apresentou melhoras na precisão. O REMQ planimétrico para o voo cruzado utilizando 4 pontos e 18 pontos de controle é de aproximadamente 5cm, enquanto para a componente Z este valor é igual a 19,6cm e 7,3cm, respectivamente. Na área 2, a utilização do voo cruzado não apresentou melhoras na precisão quando foram utilizados 17 pontos de controle. Um ponto a ser observado é a utilização de 4 pontos de controle, nota-se que o REMQ em Z é de 3cm com o voo cruzado e 17cm com o voo regular. Em relação a calibração em serviço em terrenos planos, os autores aconselham realizar a aquisição das imagens em um voo cruzado a diferentes alturas de voo. No segundo experimento, a aerotriangulação com 0 pontos de controle resultou em um REMQ planimétrico de 4,2cm (voo cruzado) e de 7,3cm (voo regular), enquanto para a altimetria é de 5,4cm e 6,7cm, respectivamente. Os autores concluíram que a calibração em serviço apresenta melhores resultados utilizando imagens em diferentes alturas e com voos cruzados, especificamente em relação a componente Z.

Agüera-Vega *et al.* (2017b) realizaram um levantamento a taxas de 90%/80% (longitudinal e lateral, respectivamente), em um campo dedicado a horticultura com 5 diferentes tipos de terreno (com áreas de 21,608ha, 47,334ha, 14,848ha, 22,876ha, e 19,872ha). As coletas das imagens foram realizadas com um VANT multirrotor de 8 motores equipado com uma câmara digital não-métrica Sony Nex 7 com uma distância focal fixa de 16mm. A coleta foi realizada a quatro diferentes alturas de voo (50m, 80m, 100m e 120m) com elementos de resolução espacial aproximados de 0,012m 0,019m 0,024m e 0,029m, respectivamente. As coordenadas

tridimensionais dos pontos de interesse foram obtidas por meio de receptores de dupla frequência RTK. A precisão obtida para os pontos levantados é de  $\pm 9\text{mm}$  para planimetria e  $\pm 16\text{mm}$  para altimetria. Foram testadas 3 diferentes combinações de pontos de controle (com 3, 5 e 10 pontos) e a qualidade dos MDSs e das ortoimagens foram analisadas por meio de pontos de checagem, com a quantidade variando entre 25 a 33 pontos para cada um dos casos. Ao total, 60 diferentes conjuntos de MDSs e ortoimagens foram gerados a diferentes configurações utilizando o *software* Agisoft PhotoScan. Os experimentos de variação de altura de voo, para uma mesma quantidade de pontos de controle, apresentaram resultados similares para a planimetria. Em contra partida, a elevação da altura de voo apresenta uma depreciação da qualidade altimétrica dos MDSs. Como resultado, o terreno com a menor inclinação (aproximadamente 19%), a menor altura de voo (50m) e 10 pontos de controle apresentou a melhor precisão, com REMQ de 0,038m, 0,035m e 0,035m, para X, Y e Z, respectivamente. Os incrementos na qualidade e o aumento da quantidade de números de pontos de controle não possuem uma relação linear. Conforme os resultados obtidos, foi identificado que a melhora da precisão planimétrica é maior entre 3 e 5 pontos (com um decréscimo de 0,150m) se comparado ao intervalo de 5 e 10 pontos de controle (com um decréscimo de 0,025m). Em relação a componente altimétrica, os erros obtidos são relativos ao aumento da altura de voo, quanto maior a altura de voo, piores elementos de resolução espacial são obtidos, e conseqüentemente maiores erros são obtidos. De acordo com as conclusões dos autores, a quantidade de pontos de controle possui maior influência para a determinação das coordenadas altimétricas dos MDSs. Além disso, identificou-se uma redução na amplitude dos erros (máximos e mínimos) a maior quantidade de pontos de controle.

Torres-Sánchez *et al.* (2018) buscou uma configuração ótima em relação ao volume de dados (tempo de processamento) e a precisão dos MDSs. Para isso, foram estudadas variações das taxas de recobrimento lateral e longitudinal em voos com alturas de 50m e 100m. Além de confirmar a afirmação de Dandois *et al.* (2015) e Gonzáles-Quiñones *et al.* (2018), em que a densidade de pontos está relacionada à altura de voo, foi identificado que o recobrimento longitudinal possui maior influência na qualidade altimétrica dos MDS. Os estudos demonstram que para modelar áreas complexas, como florestas e terrenos com alta declividade, deve-se utilizar maiores

taxas de recobrimento. Por outro lado, melhores acurácias podem ser obtidas com taxas de 60% e 90% de recobrimento lateral e longitudinal, respectivamente.

Przybilla *et al.* (2019) desenvolveram um campo de calibração com alta precisão em uma área com 7ha localizado em Zollern Colliery em Durtmond, na Alemanha. Os autores analisaram 3 diferentes câmaras digitais não-métricas (Phase One IXU1000, Zenmuse X5S e Zenmuse X4S (Phantom 4 Pro)) e 3 diferentes *software* fotogramétricos (Pix4D Pro Mapper, Agisoft PhotoScan (versão antiga do Metashape) e Trimble UASMaster). Foram realizadas duas tomadas de imagens, a primeira com linhas regulares e a segunda em um voo cruzado (aumentando a altura de voo em 20%), com um elemento de resolução espacial de 14mm para todos os casos. Os processamentos foram conduzidos com 5, 12, 22 e 45 pontos de controle, e a qualidade foi avaliada por meio dos residuais dos pontos de checagem na fototriangulação. Como resultado, diferentes câmaras diferentes *software* apresentaram diferentes resultados utilizando 5 pontos de controle, o que indica que os *software* conduzem a calibração em serviço de maneira diferente – no que diz respeito a compensação entre os POE e POI, e a definição da projeção. Os experimentos utilizando 12 pontos de controle atingiram uma precisão menor que o valor do GSD para todos os *software*. Os autores identificaram que não há um aumento expressivo na precisão quando a quantidade de pontos de controle varia entre 12 e 22 pontos, exceto para a câmara Zenmuse X5S e o *software* UASMaster. Os autores salientam que os resultados para a calibração em serviço, especialmente para a componente Z, são melhores quando são utilizadas diferentes alturas de voo.

Oniga *et al.* (2020) conduziram um levantamento em dois sentidos (linhas de voo ortogonais) a taxas de recobrimento de 80%/60% (longitudinal e lateral, respectivamente) em uma área de 0,80ha, com elemento de resolução espacial aproximado de 1,1cm a 28m de altura. Ao total, 122 imagens foram obtidas com um VANT de baixo custo DJI Phantom 3 equipado com uma câmara de 12 megapixel e distância focal de 3,61mm. Os processamentos e a avaliação da qualidade da nuvem de pontos e do MDE foram realizados com o *software* 3DF Zephyr Pro. Foram obtidos 300 pontos, a serem utilizados como pontos de controle e de checagem, por meio de receptores GNSS. A área levantada representa um espaço urbano com feições como construções, estacionamento e vegetação. Os autores analisaram nove diferentes cenários em função do número de pontos de controle (com 4, 8, 20, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 pontos) arranjados de duas diferentes maneiras (grid regular e estratificado

aleatório), com 150 pontos de checagem. Os autores sumarizam que o aumento da quantidade de pontos de controle resulta em menores desvio-padrão, conseqüentemente, melhores precisões são obtidas. Comparando os processamentos com 20 pontos de controle e com 4 pontos de controle, os erros gerados na nuvem de pontos de no MDE são cinco vezes menores. Os erros obtidos com o processamento utilizando 20 pontos de controle é de aproximadamente 3 vezes o elemento de resolução espacial para planimetria nos dois arranjos, e de 7,4 vezes o elemento de resolução espacial para elevação utilizando o arranjo estratificado e 7,9 vezes o elemento de resolução espacial para elevação utilizando o arranjo em grid regular. Nota-se, a partir dos demais experimentos, que o aumento da quantidade de pontos de 20 para 150 pontos reduz 1cm para planimetria nos dois arranjos, 4,6cm para altimetria com arranjo estratificado e 5,1cm para o grid regular.

Por fim, identifica-se que cada um dos parâmetros possui uma determinada influência nos resultados, podendo ser relativo a qualidade posicional, ao tempo de processamento, a qualidade da ortoimagem, a densidade de elementos por metro quadrado na nuvem de pontos, a determinação dos POI visando a modelagem dos erros sistemáticos do conjunto de lentes, etc.

A seguir, apresenta-se um resumo das características dos estudos abordados no estado da arte (Quadro 1).

Quadro 1. Resumo das características dos estudos abordados no estado da arte.

<b>Tipo</b>	<b>Referência</b>	<b>Parâmetros</b>
Pontos de Controle	Rangel <i>et al.</i> (2018)	13 diferentes combinações (6 a 54 pontos)
Pontos de Controle	Sanz-Ablanedo <i>et al.</i> (2018)	3465 diferentes combinações (quantidade e distribuição)
Pontos de Controle	Martínez-Carricondo <i>et al.</i> (2018)	300 processamentos: 12 diferentes combinações (4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 16, 20, 24, 30 e 36), 5 diferentes configurações de distribuição (nas bordas, no centro, nos cantos, estratificada e aleatória) e 5 repetições
Pontos de Controle	Agüera-Vega <i>et al.</i> (2017a)	45 processamentos (4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15 e 20 pontos)
Altura de voo	Udin e Ahmad (2014)	40m, 60m, 80m e 100m

Altura de voo	Dandois <i>et al.</i> (2015)	20m, 40m, 60m e 80m
Altura de voo	Agüera-Vega <i>et al.</i> (2017b)	50m, 80m, 100m e 120m
Altura de voo	Torres-Sánchez <i>et al.</i> (2018)	50m e 100m
Taxas de recobrimento	Dandois <i>et al.</i> (2015)	Recobrimento lateral (20%, 40%, 60%, 80%) e longitudinal (96%, 92%, 88%, 84%, 80%, 76%, 72%, 68%, 64% e 60%)
Taxas de recobrimento	Domingo <i>et al.</i> (2019)	Recobrimento lateral (80% e 70) e longitudinal de 90%
Calibração de câmara	Bolkas (2019)	Calibração em serviço - pontos de controle
Calibração de câmara	Hamid e Ahmad (2014)	Calibração em serviço – profundidade e dimensão dos campos de calibração
Combinação de parâmetros	Maurice <i>et al.</i> (2015)	Pontos de controle e calibração em serviço
Combinação de parâmetros	Kraft <i>et al.</i> (2016)	Diferentes <i>software</i> (Trimble Match-At, Agisoft PhotoScan e Pix4DMapper), sob diferentes configurações de calibração de câmara (considerando POI fixos na aerotriangulação e a calibração em serviço), diferentes configurações de pontos de controle (0, 7 e 19 pontos), e diferentes taxas de recobrimento
Combinação de parâmetros	Gerk e Przybilla (2016)	Georeferenciamento direto, variação de pontos de controle e calibração de câmara
Combinação de parâmetros	Agüera-Vega <i>et al.</i> (2017)	60 processamentos: 3 diferentes combinações de pontos de controle (3, 5 e 10 pontos), 5 diferentes tipos de terreno e alturas de voo (50m, 80m, 100m e 120m)
Combinação de parâmetros	Torres-Sánchez <i>et al.</i> (2018)	Altura de voo (50m e 100m) e taxas de recobrimento das imagens
Combinação de parâmetros	Przybilla <i>et al.</i> (2019)	3 diferentes câmaras digitais não-métricas (Phase One IXU1000, Zenmuse X5S e Zenmuse X4S) e 3 diferentes <i>software</i> fotogramétricos (Pix4D Pro Mapper, Agisoft PhotoScan e Trimble UASMaster), diferentes pontos de controle (5, 12, 22 e 45) e calibração da câmara

Combinação de parâmetros	Oniga <i>et al.</i> (2020)	9 diferentes cenários para pontos de controle (4, 8, 20, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 pontos) arranjados de duas diferentes maneiras (grid regular e estratificado aleatório) e dois sentidos de voo.
--------------------------	----------------------------	---

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar os produtos cartográficos digitais gerados por processamento fotogramétrico, utilizando dados obtidos com um VANT de baixo custo, a partir da aplicação de diferentes métodos de calibração de câmara e de diferentes alturas de voo, número de pontos de controle e taxas de recobrimento, bem como investigar a influência desses parâmetros nos resultados finais.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, têm-se:

- Gerar ortoimagens e MDTs a partir dos dados obtidos com um VANT de asa rotativa e processados por *software* fotogramétrico comercial a diferentes configurações de calibração de câmara, pontos de controle, altura de voo e taxa de recobrimento;
- Investigar a influência dos diferentes métodos para a calibração de câmara digital não-métrica para fins de mapeamento;
- Avaliar a precisão posicional absoluta dos produtos gerados (as ortoimagens e os MDTs), conforme as especificações técnicas da PEC-PCD, por meio do Decreto nº 89.817 e a ET-CQDG (BRASIL, 2016);
- Indicar uma configuração ótima para obtenção de PEC-PCD classe A para a escala de 1:1.000 para planimetria e altimetria a partir de dados obtidos com um VANT.

## 1.4 Potencial de contribuição do tema proposto

Atualmente, os VANTs estão cada vez mais sendo aplicados para mapeamentos aéreos, os motivos são o baixo custo da plataforma e da aquisição das imagens, alta resolução temporal e flexibilidade. Os usuários de deste tipo de tecnologia podem simplesmente importar imagens de alta resolução derivadas de uma câmara digital não-métrica transportada por um VANT de baixo custo, e por meio de uma cadeia de processamento fotogramétrico convencional – que por muitas vezes possuem um alto nível de automação, resultam em produtos que são visualmente aceitáveis, mas que possuem baixa precisão, tendências e/ou erros sistemáticos.

Essas vantagens foram fundamentais para a popularização da fotogrametria com VANTs, uma vez que é possível gerar MDTs e ortoimagens à um custo mais baixo, à uma melhor resolução temporal e espacial, se comparada as demais plataformas aéreas. Além disso, tais produtos são dotados de uma alta densidade de pontos e uma melhor resolução visual, das quais geram produtos cada vez mais fiéis a realidade.

Tais produtos são de extrema importância para a tomada de decisão em projetos de engenharia civil e transportes e refletem na qualidade final de um projeto ou obra. Considerando os ortoimagens e MDTs, estes podem ser aplicados, em: cadastral municipal, planta genérica de valores (PGV), planta indicativa de sistemas de infraestrutura urbana, e também para projetos básicos e executivos de infraestrutura como: terraplenagem, geométrico, sinalização, drenagem, etc. A aplicação do produto é recomendada de acordo com a especificação de qualidade do projeto em questão.

É válido salientar que por ser um VANT de baixo custo, esse possui sensores com baixa confiabilidade e alguns erros são inerentes ao seu material e processo de montagem. Dado que para a geração de produtos confiáveis são necessários POE e POI confiáveis, para este tipo de sistema, não é possível a aplicação direta dessas observações (georreferenciamento direto). Neste caso, essas observações (POE) são apenas aproximações para facilitar o processo de correspondência de imagens e fototriangulação, reduzindo assim o tempo de processamento.

Porém, estes produtos necessitam de uma padronização para que sejam disseminados e utilizados pelos mais diferentes tipos de usuários e projetos. Esta padronização é realizada por meio da etapa de avaliação da qualidade. Por ser uma etapa que eleva o tempo e custo do projeto, o controle de qualidade por muitas vezes é negligenciado, e conseqüentemente, são gerados produtos que não se encaixam no PEC ou que não passaram por processos de avaliação (GALO e CAMARGO, 1994).

Desta forma, o trabalho tem como contribuição apresentar aos usuários técnicos e não-técnicos uma investigação e análises, conforme o PEC-PCD e por meio da análise de dispersão, o comportamento dos produtos finais à diferentes configurações de dados de entrada, sendo eles: número de pontos de controle, calibração de câmara, altura de voo e taxas de recobrimento. Além disso, um estudo considerando diferentes parâmetros simultaneamente ainda é raro em literatura específica.

## **1.5 Estrutura da dissertação**

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos, descritos brevemente a seguir: o primeiro capítulo fornece uma introdução ao conteúdo a ser abordado no trabalho, incluindo o estado da arte na geração de produtos cartográficos utilizando dados obtidos com VANTs, os objetivos gerais e específicos, e o potencial de contribuição do tema.

O Capítulo 2 trata de forma geral, a fundamentação teórica, discorrendo sobre assuntos como: Fotogrametria digital, calibração de câmaras digitais, sistema de levantamento fotogramétrico aerotransportado, controle de qualidade, legislação brasileira no uso de VANT, e aplicações conforme a NBR 14.166 (BRASIL, 1998).

O Capítulo 3 está dividido em materiais e em método. A primeira seção apresenta os materiais utilizados para coletar os dados, bem como os meios para a armazenagem desses dados e os *software* envolvidos nos processamentos e tratamentos dos dados. A segunda seção apresenta o método a ser utilizado, englobando as diferentes etapas para a geração dos produtos cartográficos digitais, como as nuvens de pontos, as ortoimagens, os MDEs e os MDTs.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões. Nesta seção são apresentados os resultados obtidos à diferentes configurações de processamento, sendo eles: a variação da quantidade de pontos de controle, a variação da altura de voo, a variação das taxas de recobrimento e a calibração de câmara digital não-métrica, acompanhado de discussões.

O Capítulo 5 apresenta a conclusão, seguido da seção “Referências” na qual destaca a bibliografia utilizada para a concepção deste trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica na qual o projeto foi fundamentado. O objetivo é esclarecer os conceitos necessários para o entendimento dos processos e das técnicas utilizadas, para tornar possível a análise dos resultados obtidos com os experimentos.

### 2.1 Fotogrametria Digital

#### 2.1.1 Considerações iniciais

O termo Fotogrametria é derivado de três palavras de origem grega: *photon*, que significa luz, *grafos*, que significa desenhado ou escrito, e *metron*, que significa medida (ALSPAUGH, 2004). Fotogrametria, portanto, pode ser definida como o processo de derivação de informações (usualmente) métricas de um objeto a partir de medidas realizadas em imagens (MIKHAIL *et al.*, 2001).

Segundo Doyle (1964), as primeiras noções de Fotogrametria tiveram início com Leonardo da Vinci em 1480, onde foram discutidas certas formas geométricas em pinturas, como pontos, linhas e feições. As técnicas aplicadas em pinturas foram então aplicadas em imagens por volta do ano de 1840, e evoluíram para métodos analógicos em 1901, e posteriormente, com o avanço tecnológico dos sensores e com o uso de modelos matemáticos para o processamento digital, para métodos analíticos, em meados do século 20 (BRITO e COELHO, 2007).

A Fotogrametria, segundo WOLF e DEWITT (2004) é dividida em duas áreas distintas: a Fotogrametria métrica, usada para a representação de mapas topográficos, em que consiste na extração de informações métricas, como distâncias, ângulos, volumes, elevações, dimensões e formas dos objetos; e a Fotogrametria interpretativa, em que são realizadas análises qualitativas das imagens, também conhecida como Fotointerpretação.

Embora a Fotogrametria tenha se expandido para incluir a análise de outros tipos de registros, como os sensores passivos, em que a REM é registrada pelo sensor digital e representada na forma de imagens digitais; e a partir de sensores ativos (que produzem a sua própria energia) como a varredura a LASER (*Light Amplification by*

*Stimulated Emission of Radiation*) e fenômenos magnéticos (MIKHAIL *et al.*, 2001), as fotografias ainda são a principal fonte de informação (WOLF e DEWITT, 2004).

As fotografias usadas nas técnicas fotogramétricas geralmente são tomadas a partir de plataformas aéreas, mas também podem ser oriundas de sistemas terrestres ou orbitais, como as imagens de satélite (WOLF e DEWITT, 2004).

A ideia básica das técnicas fotogramétricas é determinar a paralaxe a partir dos pontos homólogos medidos em pares de imagens tomadas consecutivamente, como em uma linha de voo. Paralaxe pode ser definida como o deslocamento aparente na posição de um corpo ou objeto em relação a um ponto ou sistema de referência, causado pela mudança na posição de observação (BRITO e COELHO, 2007). Como resultado da paralaxe, a partir da Estereoscopia, tem-se a estimativa da variação de profundidade entre objetos, no caso de uma imagem área, tem-se a variação de altura de objetos ou a diferença de nível nos terrenos (KRAUS 2007). Segundo Mikhail *et al.* (2001), a paralaxe é inversamente proporcional à profundidade, maiores paralaxes significam que o ponto está mais próximo às plataformas.

Segundo Mikhail *et al.* (2001), os produtos gerados a partir dessas relações são divididos, basicamente, em duas categorias: imagens (imagem aérea, mosaicos, ortoimagens, etc) e vetores. Os vetores são utilizados para a geração de nuvens de pontos, dos quais as demais informações métricas podem ser extraídas, assim como são produtos do processo de restituição fotogramétrica.

Devido ao avanço da tecnologia no desenvolvimento de dispositivos eletrônicos compactos e robustos, como processadores de alto desempenho, sensores digitais, sistemas de comunicação, e sistemas de orientação e posicionamento, tornou-se possível o uso de plataformas e sensores não convencionais.

Para que um produto gerado a partir de técnicas fotogramétricas seja recomendado para alguma aplicação, deve-se, primeiramente, obter informações sobre a qualidade do métrica do mesmo. Neste trabalho, a qualidade geométrica dos resultados será estudada por meio da análise de tendências, PEC-PCD e medidas de dispersão pontual (REMQ).

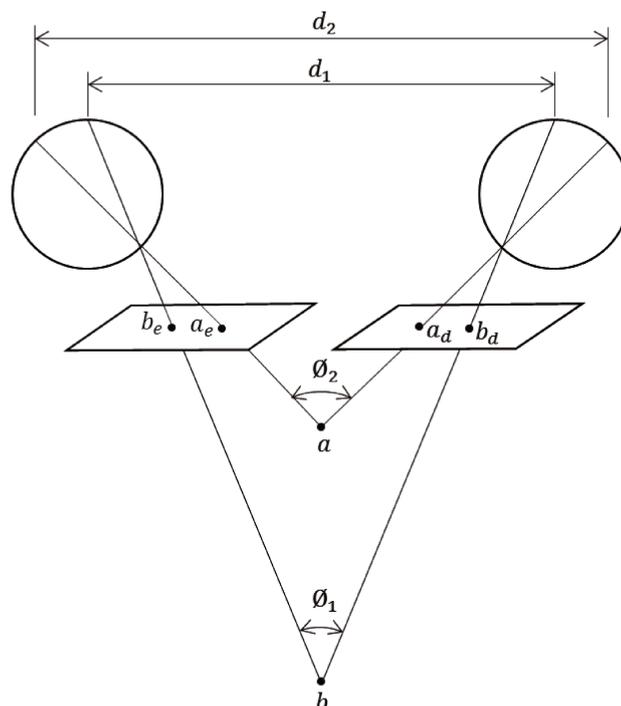
## 2.1.2 Elementos de Fotogrametria

Nesta seção são apresentados os principais elementos de Fotogrametria, sendo eles: estereoscopia, espaço imagem e espaço objeto, POE, POI, Fototriangulação, pontos homólogos, resolução espacial (GSD), ortorretificação, produtos cartográficos digitais e calibração de câmara.

- Estereoscopia

A estereoscopia, segundo Mikhail *et al.* (2001), é a capacidade de percepção de profundidade quando um objeto é visto a partir de duas imagens tomadas de diferentes posições. A Figura 1 ilustra a relação entre a paralaxe e a noção de profundidade, onde  $d_1$  e  $d_2$  são as linhas de base,  $\varnothing_1$  e  $\varnothing_2$  são os ângulos de paralaxe do ponto  $b$  e do ponto  $a$ , respectivamente,  $a_e$  e  $a_d$  são as coordenadas (coluna, linha) do ponto  $a$  no espaço imagem na imagem esquerda e na imagem direita, respectivamente,  $b_e$  e  $b_d$  são as coordenadas (coluna, linha) do ponto  $b$  no espaço imagem na imagem esquerda e na imagem direita, respectivamente.

Figura 1. Paralaxe e profundidade.



Adaptado de Mikhail *et al.* (2001)

Segundo Mikhail *et al.* (2001) a relação entre a noção de profundidade e o ângulo de paralaxe, devido ao deslocamento ( $d$ ), são diretamente proporcionais, maiores ângulos de paralaxe ( $\emptyset$ ) significa que o objeto está mais próximo às plataformas. Portanto, se a componente altimétrica das coordenadas de um determinado ponto for conhecida, é possível calcular a variação relativa de altura com outros pontos, por meio dos valores de paralaxe.

- Espaço objeto e espaço imagem

Em Fotogrametria, um ponto tridimensional pode ser representado em diferentes sistemas de referência, sendo eles: o espaço objeto e o espaço imagem.

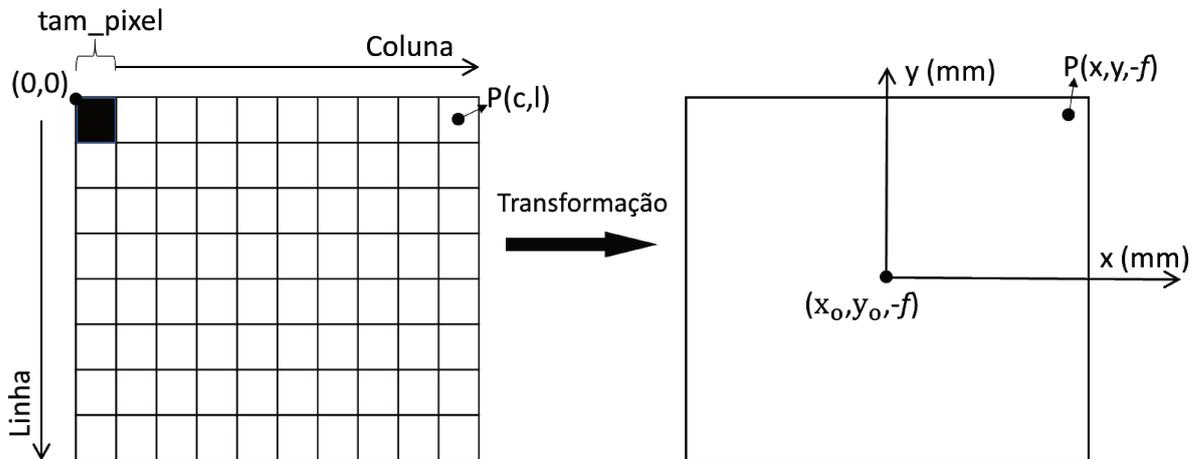
O espaço objeto é o sistema de referência tridimensional que representa o espaço físico no qual os sensores registram os dados espaciais. Diversos são os sistemas de referência usados para georreferenciar os modelos e as ortoimagens, como: geodésico, geocêntrico, local vertical, e arbitrário (WOLF e DEWITT, 2004).

O espaço imagem faz referência ao sistema de referência do plano da imagem, sendo este representado por sistema de máquina/tela e sistema fotogramétrico. Tem-se duas etapas para correlacionar um ponto no sistema de tela e o mesmo ponto no espaço objeto: (1) partindo do sistema de tela (2D – coluna linha) para o sistema fotogramétrico (3D) – ambos no sistema imagem, por meio da aplicação de rotações, translações e fator de escala (Equação 1 e 2) sendo ilustrado na Figura 2, onde:  $P_x$  e  $P_y$  são as coordenadas de um ponto no E.I métrico,  $P_c$  e  $P_l$  são as coordenadas do ponto no E.I pixel,  $tam\_pixel$  é o tamanho do pixel em  $\mu m$ ,  $coluna$  e  $linha$  é o tamanho de cada uma dessas componentes em pixel,  $f$  é a distância focal em milímetros, e as coordenadas do ponto principal no E.I métrico ( $x_o$ ,  $y_o$ , e  $-f$ ); e (2) do espaço imagem (3D) para o espaço objeto - no sistema de referência tridimensional (global, local ou arbitrário) por meio da equação de colinearidade.

$$P_x = tam\_pixel \times \left( P_c - \frac{Coluna - 1}{2} \right) \quad (1)$$

$$P_y = -tam\_pixel \times \left( P_l - \frac{Linha - 1}{2} \right) \quad (2)$$

Figura 2. Transformação de coordenada tela para sistema fotogramétrico.



Adaptado de Coelho e Brito (2007)

- Parâmetros de Orientação Exterior (POE)

Um dos conjuntos de elementos fundamentais para a realização de processos fotogramétricos é o POE. Esse conjunto de parâmetros define a posição da tomada da imagem, em um sistema de referência no espaço objeto, e a atitude da plataforma, no que diz respeito às rotações em relação aos 3 eixos de referência (X, Y e Z). Segundo Mikhail *et al.* (2001), os seis parâmetros que compreendem a orientação exterior são descritos como: as coordenadas do centro perspectivo ( $X_{cp}$ ,  $Y_{cp}$  e  $Z_{cp}$ ) no sistema de referência do espaço objeto, e ângulos de Euler ( $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$ ) que representam a atitude da plataforma nos eixos X, Y e Z, respectivamente.

A obtenção desses parâmetros pode ser realizada de duas maneiras: o primeiro é conhecido por georeferenciamento direto da plataforma e o segundo é o georeferenciamento indireto:

- Georeferenciamento direto é a determinação dos POE a partir dos sensores de posicionamento (receptores/antenas GNSS) e orientação (INS) (COLOMINA e MOLINA, 2014).
- Georeferenciamento indireto: este método tem como objetivo a determinação dos POE a partir de foto coordenadas medidas nas imagens e dos pontos de controle no solo por meio da Fototriangulação (KRAUS, 2007). Esse método possui alta precisão e pode ser realizado tanto para plataformas nas quais possuem georeferenciamento direto

(neste caso é necessária uma quantidade muito menor de pontos de controle (TURNER *et al.*, 2016) bem como para plataformas de baixo custo, nas quais os POE são derivados de sensores que possuem erros inerentes à qualidade dos mesmos. Em ambos os casos os POE são utilizados como aproximações iniciais visando a redução do tempo de processamento (KRAUS, 2007; CHIANG *et al.*, 2012).

- Parâmetros de orientação interior (POI)

Os elementos de orientação interior ou POI são os parâmetros que representam as características da geometria interior do sensor no instante de aquisição da imagem, sendo estes: distância focal calibrada, coeficientes de distorção radial simétrica e descentrada e o deslocamento do ponto principal. Esses parâmetros são fundamentais para a correta calibração das distorções geradas pelo conjunto de lentes das câmaras digitais e variam de acordo com o modelo de câmara utilizado. Os parâmetros, segundo Wolf e Dewitt (2004) podem ser descritos como:

- Distância focal calibrada ( $f$ ): é a distância em mm entre o centro de projeção do sensor e o ponto principal do plano, no espaço imagem.
- Coeficientes de distorção radial simétrica: são os coeficientes derivados dos componentes óticos (lentes). Esses coeficientes são usados para a correção das distorções relativas ao acabamento e material das lentes. Os coeficientes são conhecidos por  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ , e são relacionados a distância (raio) entre o ponto medido na imagem e o ponto principal.
- Coeficientes de distorção descentrada: são os coeficientes usados para a correção da distorção causada pelo não alinhamento do conjunto de lentes. Esses coeficientes são conhecidos por  $p_1$  e  $p_2$ .
- Deslocamento do ponto principal: são as coordenadas do ponto principal em um plano  $x$  e  $y$ , geralmente com a origem no centro do sensor digital. Devido às imperfeições das lentes o ponto principal, geralmente, sofre um deslocamento em  $x$  e em  $y$ .

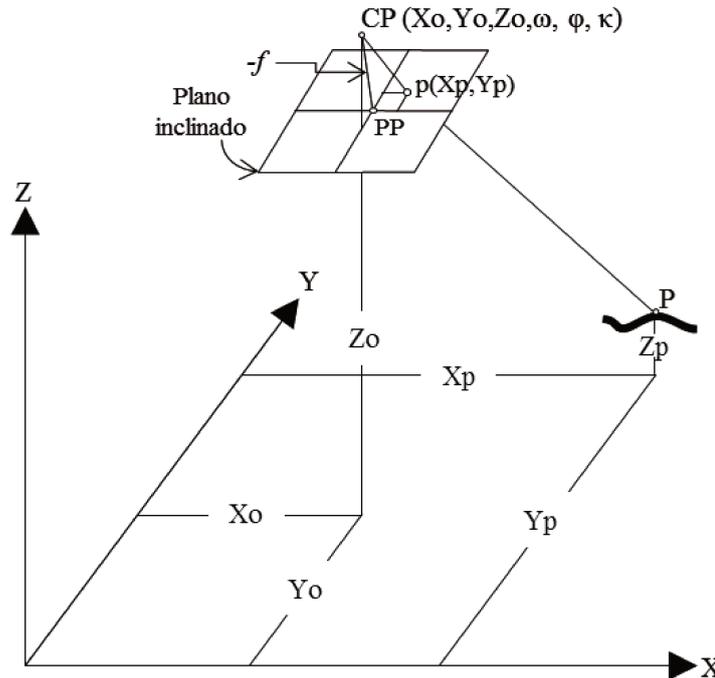
- Fototriangulação

Para que uma imagem seja usada para gerar informações métricas confiáveis, alguns processos fotogramétricos são necessários, principalmente se essa imagem foi obtida por sensores de baixo custo. Neste contexto, a fototriangulação é realizada a partir de POE aproximados, com baixa confiabilidade e precisão, e pontos de controle derivados de levantamentos de alta precisão. Segundo Mikhail *et al.* (2001), a Fototriangulação engloba em um único processo as etapas de resseção espacial (determinação da posição e orientação do centro de projeção de uma única imagem no espaço objeto) e a interseção fotogramétrica (cálculo das coordenadas de um ponto no espaço objeto (3D) a partir da sua coordenada em duas ou mais imagens no espaço imagem (2D)).

A Fototriangulação nada mais é que a combinação desses procedimentos, no qual são determinados, simultaneamente, por meio da equação de colinearidade, os POE, os POI e as coordenadas dos *tie points* pontos no espaço-objeto (KRAUS, 2007).

Essa relação é expressa pela equação de colinearidade (Equação 3 e 4), sendo baseada no modelo “*Pinhole*”, onde a correta projeção das coordenadas fotogramétricas pode ser projetada como um ponto no espaço objeto (e vice-versa) (Figura 3) (MIKHAIL *et al.*, 2001; KRAUS, 2007).

Figura 3. Condição de colinearidade.



Adaptado de Wolf e Dewitt (2004)

$$x - x_p = \Delta x - f \frac{r_{11}(X_p - X_o) + r_{21}(Y_p - Y_o) + r_{31}(Z_p - Z_o)}{r_{13}(X_p - X_o) + r_{23}(Y_p - Y_o) + r_{33}(Z_p - Z_o)} \quad (3)$$

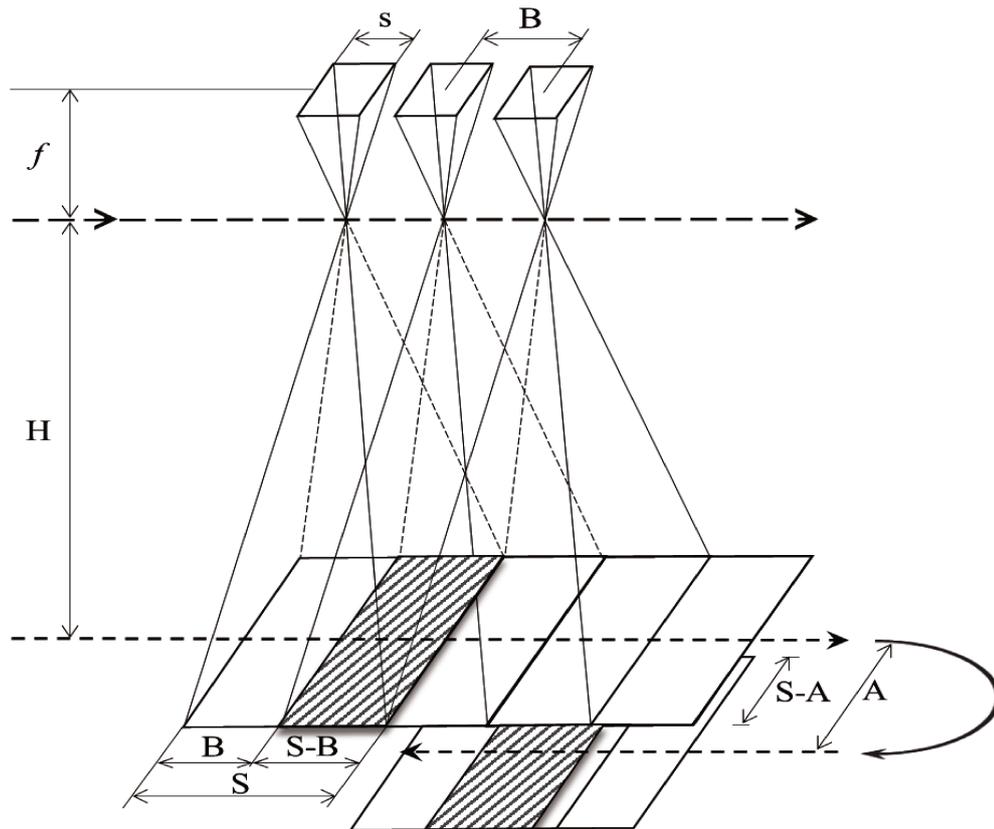
$$y - y_p = \Delta y - f \frac{r_{12}(X_p - X_o) + r_{22}(Y_p - Y_o) + r_{32}(Z_p - Z_o)}{r_{13}(X_p - X_o) + r_{23}(Y_p - Y_o) + r_{33}(Z_p - Z_o)} \quad (4)$$

O modelo da equação de colinearidade com a correção das distorções, apresenta os erros sistemáticos nos eixos X e Y como  $\Delta x$  e  $\Delta y$ , respectivamente, as coordenadas do ponto no terreno  $P(X_p, Y_p, Z_p)$ , as respectivas coordenadas do ponto P no espaço imagem  $(x, y)$ , as coordenadas do ponto principal pp  $(x_p, y_p)$ ,  $f$  é a distância focal em milímetros, os parâmetros de orientação exterior do centro de projeção CP  $(X_o, Y_o, Z_o, \omega, \varphi, \kappa)$  e  $r_{ij}$  são os elementos da matriz de rotação (em função de  $\omega, \varphi, \kappa$ ).

Para que os processos fotogramétricos possam ser realizados por meio do princípio da estereoscopia, Kraus (2007) recomenda um recobrimento mínimo de 50% entre duas imagens. O recobrimento das imagens (Figura 4) é a relação entre a área sobreposta de duas imagens tomadas consecutivamente pela área total da imagem (podendo ser no sentido lateral ou longitudinal), como demonstrado na Equação 5 e

6, onde,  $s$  representa a dimensão da imagem,  $B$  representa a linha de base entre imagens consecutivas,  $f$  é a distância focal,  $H$  é a altura de voo em metros,  $S$  é a dimensão imageada no solo por uma imagem,  $A$  é a linha de base entre imagens paralelas.

Figura 4. Recobrimento das imagens.



Adaptado de Kraus (2007)

$$\text{Recobrimento}_{\text{longitudinal}}(\%) = \left(1 - \frac{B}{S}\right) \times 100 \quad (5)$$

$$\text{Recobrimento}_{\text{lateral}}(\%) = \left(1 - \frac{A}{S}\right) \times 100 \quad (6)$$

Neste trabalho, as Equações 5 e 6 são utilizadas para determinar as novas taxas de recobrimento lateral e longitudinal após a extração de imagens consecutivas no sentido longitudinal e lateral. Essa é uma abordagem utilizada para a redução “virtual” do recobrimento das imagens.

- Pontos de Enlace / Pontos de Passagem / *Tie Points*

Os *tie points*, também conhecidos por pontos de passagem ou pontos de enlace, representam o mesmo elemento visto em diferentes imagens sobrepostas. Em Fotogrametria Analógica esses elementos eram identificados por um processo manual executado por um operador, e na Fotogrametria digital esse processo é realizado por meio de algoritmos de correspondência em imagens sobrepostas (TOMMASELLI *et al.*, 2007).

Segundo Remondino *et al.* (2017), os *tie points*, extraídos a partir da correspondência de imagens, são usados para estimar todos os parâmetros (posição e orientação das câmaras, POI, e as coordenadas tridimensionais dos pontos a partir do espaço imagem) a partir da Fototriangulação.

Para Schenk (1997), as técnicas de correspondência de imagem são classificadas em três categorias:

- Métodos baseados em feições: os métodos baseados em feições podem ser definidos em 3 principais passos: o primeiro é a identificação de pontos de interesse, como bordas, vértices, interseções ou curvas, em seguida atribui-se descritores à estes pontos – (localização na imagem, escala, e orientação), e finalmente estabelecem-se as correspondências a partir desses descritores (LOWE, 2004);
- Métodos baseados em áreas: os métodos baseados em áreas possuem as mesmas características do método baseado em feições, porém, a correspondência é associada aos níveis de intensidade dos pixels em uma janela de busca de duas imagens.
- Métodos relacionais: em tais métodos cria-se uma descrição simbólica dos elementos a serem comparados nas imagens, baseando-se em funções de custo. Essas descrições podem ser implementadas em formas de grafos, árvores ou redes semânticas. Em comparação aos demais métodos, dos quais se baseiam em propriedades geométricas, como a forma e a localização como padrões de similaridade, este método compara as relações topológicas.

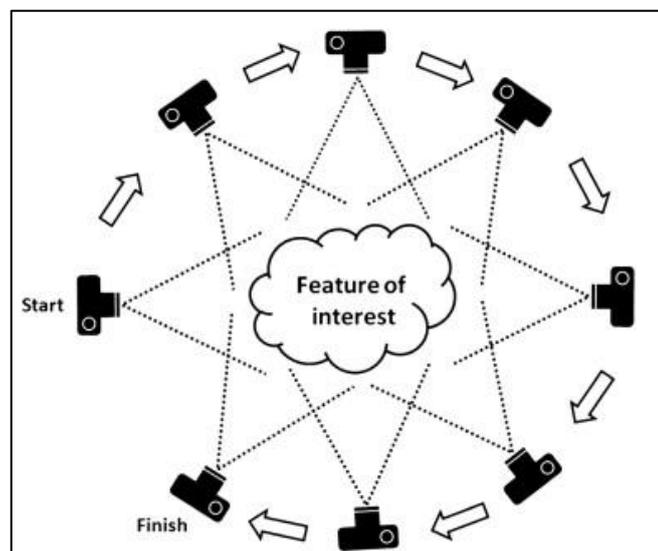
Vosseman *et al.* (2001) cita os problemas mais comuns quanto a aquisição de imagens para a aplicação da correspondência de imagens nas tarefas de identificação dos pontos homólogos em um par de imagens sobrepostas, sendo eles:

diferentes projeções perspectivas, presenças de áreas de oclusão, diferentes refletâncias, diferentes iluminações, modelos de câmaras incorretos, a presença de padrões repetitivos, a diferença de contraste, a inserção de parâmetros iniciais incorretos e diferentes geometrias de aquisição (estereoscopia, escala e GSD). Atualmente, os algoritmos de visão computacional por meio das técnicas de correspondência disponíveis proporcionaram a automação e a geração de muitos *tie points* em um conjunto de pontos. Tais pontos, por meio da Fototriangulação ou da técnica *Structure from Motion* (SfM), dão origem às densas nuvens de pontos que são vistas como produtos fotogramétricos.

- *Structure from Motion* (SfM)

Segundo Westoby *et al.* (2012), a técnica *Structure from Motion* (SfM), traduzida como “Estrutura a partir do Movimento”, é uma técnica de baixo custo e de fácil utilização que se baseia em uma série de imagens não ordenadas, tomadas de diferentes posições, e sobrepostas à uma determinada taxa de recobrimento visando a reconstrução 3D de um objeto ou uma cena de interesse. Conforme o autor, o processo é similar ao da visão estéreo (Fotogrametria) de modo que os dois casos necessitam de correspondência entre elementos em diferentes imagens (pontos de enlace, pontos de passagem ou *tie points*) para que a cena 3D possa ser criada a partir de uma série de imagens bidimensionais (Figura 5).

Figura 5. Geometria de aquisição de imagens para o SfM.



Westoby et al. (2012)

No SfM, diferente da Fotogrametria, a geometria da cena pode ser resolvida por meio de um ajuste em bloco iterativo e altamente redundante (*Bundle Adjustment*) a partir da correspondência de imagens sem a necessidade de informações a priori da aquisição, como: pontos de apoio, POE e POI.

Segundo Fonstad *et al.* (2013), o resultado do SfM é um alto número de pontos conjugados, gerados a partir dos processos de correspondência de imagens, e que estão em um sistema de coordenadas arbitrário. Para que o resultado seja georreferenciado, por exemplo, é necessária a utilização de pontos de controle ou dos POE das câmaras para que a nuvem de pontos em um sistema de coordenadas global.

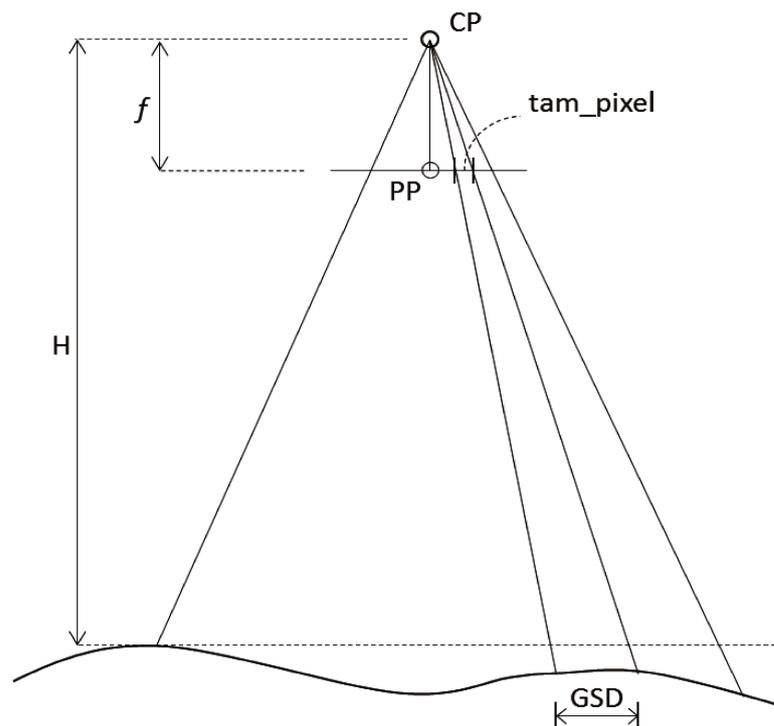
Segundo Westoby *et al.* (2012), o SfM é implementado em 4 grandes etapas: (I) aquisição das imagens e extração de *tie points*: a aquisição das imagens deve ser realizada sob uma alta taxa de recobrimento e alta resolução para que os algoritmos de correspondência de imagens possam identificar e extrair uma grande densidade de *tie points*; (II) reconstrução 3D: a partir dos *tie points* é executado um ajustamento em bloco de forma iterativa para estimar a posição das câmaras, a geometria interior da câmara – se considerada como desconhecida, e a nuvem de pontos esparsa em um sistema de coordenadas relativo. Após esta etapa, aplica-se algoritmos de densificação de pontos, como por exemplo o *Clustering View for Multi-view Stereo* (CMVS) e o *Patch-based Multi-view Stereo* (PMVS2) (FURUKAWA e PONCE, 2009); (III) pós-processamento e geração do MDS: esta etapa tem como objetivo aplicar a transformação de 7 parâmetros do sistema relativo para algum sistema absoluto por meio de pontos de controle (com no mínimo 3 pontos conhecidos e de alta precisão). Após a transformação, tem-se como resultado a nuvem de pontos no espaço objeto.

O conceito do algoritmo SfM em conjunto com os algoritmos de correspondência de imagens é amplamente aplicado em *software* fotogramétricos comerciais. Este processo possui um alto nível de automação, em contrapartida são necessários pontos de controle ou POE de alta precisão. Outro ponto que deve ser levantado é o alto custo computacional para a execução desta técnica, sendo diretamente relacionado a qualidade das imagens e ao alto número de imagens necessárias para uma reconstrução de qualidade (completa).

- Elemento de resolução espacial (GSD)

As imagens digitais são produzidas por meio de um processo denominado de amostragem discreta. Nesse processo, uma pequena área da imagem (pixel) é analisada para determinar a quantidade de REM correspondente a superfície do objeto (KRAUS, 2007). A geometria de aquisição das imagens (Figura 6) influencia diretamente na área levantada por uma imagem e também no tamanho do menor objeto a ser representado no terreno, denominado elemento de resolução espacial ou GSD (*Ground Sample Distance*). Essa relação é baseada na altura de voo, na distância focal e no tamanho do pixel do sensor, conforme a Equação 7 e 8, onde, CP é o centro perspectivo; pp é o ponto principal x e y no plano imagem;  $f$  é a distância focal em mm; tam\_pixel é dimensão do pixel em  $\mu\text{m}$ ; GSD é o elemento de resolução espacial aproximado em cm.

Figura 6. Escala de uma fotografia vertical.



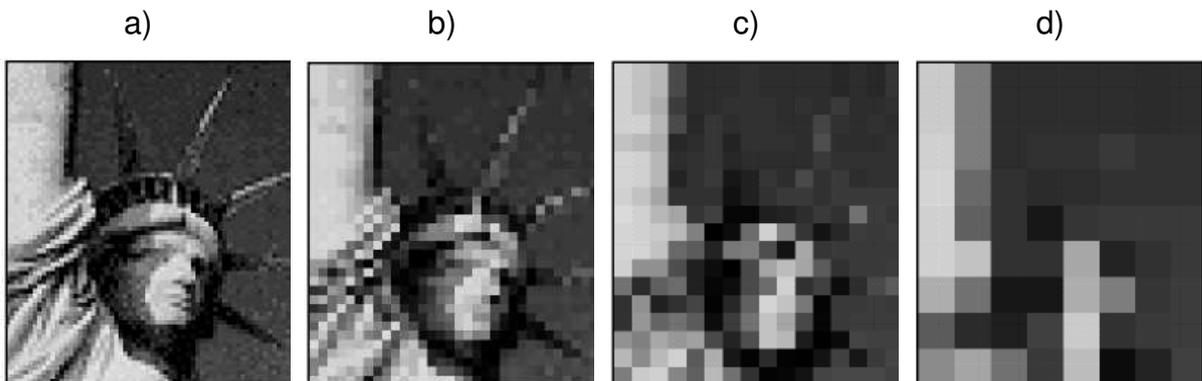
Adaptado de Kraus (2007)

$$\frac{f}{H} = \frac{\text{tam\_pixel}}{\text{GSD}} \quad (7)$$

$$\text{GSD} = \frac{\text{tam\_pixel}}{f} \times H \quad (8)$$

A partir da interpretação da Equação 8, têm-se que para uma mesma distância focal, quanto maior for a altura de voo menor será a escala, e conseqüentemente, maior será a área representada por um pixel. Nota-se que com maiores tamanhos de GSD, menores serão os detalhes visíveis, como apresentado na Figura 7a com 72x72 pixel, Figura 7b com 36x36 pixel, Figura 7c com 18x18 pixel e Figura 7d com 9x9 pixel.

Figura 7. Imagens com diferentes resoluções. a) 72x72 pixel. b) 36x36 pixel. c) 18x18 pixel. d) 9x9 pixel.



Fonte: Wolf e Dewitt (2004).

- **Produtos Cartográficos Digitais**

Os produtos cartográficos digitais derivados de processos fotogramétricos estão sendo cada vez mais aplicados em projetos de engenharia civil e transportes. Esse aumento está atribuído, não só a popularização do uso dos VANTs, como também a facilidade para a disseminação dos dados digitais por meio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). A seguir são apresentados os principais produtos cartográficos gerados por meio de processos fotogramétricos aplicados a imagens obtidas com VANTs:

- Ortoimagem convencional: imagem digital com escala uniforme a nível do terreno, em que os pixels foram corrigidos para uma projeção

ortogonal, na qual foram removidos os erros do deslocamento resultante da variação do relevo e da inclinação da plataforma (MILLER, 2004);

- Ortoimagem verdadeira (*true ortho*): ortorectificação com escala uniforme não só ao nível do terreno, mas sim em toda a imagem, além de ser livre de oclusões e efeitos de duplo mapeamento (OLIVEIRA *et al.*, 2018);
- Modelo Digital de Elevação (MDE), Modelo Digital de Terreno (MDT) e Modelo Digital de Superfície (MDS): o MDE é uma representação digital da superfície contendo dados relativos às elevações dos pontos sobre uma determinada área. Esse tipo de dado pode ser espaçado regularmente em *grid* ou irregularmente, como uma malha triangular (Mikhail *et al.*, 2001). Oliveira e Tommaselli (2012) definem o MDT como sendo um tipo específico de MDE, no qual representa a superfície física do terreno, não incluindo objetos acima do mesmo, tais como vegetações e feições antrópicas. Em relação ao MDS, ao contrário do MDT, Oliveira e Tommaselli (2012) discorrem que este tipo de modelo tridimensional apresenta as informações referentes a maior elevação de cada ponto, proveniente do solo ou acima do mesmo.
- Vetores e dados de atributo: arquivo ou base de dados contendo vetores que representam os objetos e seus atributos. Esse tipo de dado pode ser representado de diversas maneiras, como por exemplo: curvas de nível, polígonos, linha, pontos, mapas planimétricos, modelos tridimensionais, cortes, perfis e objetos sólidos.

Mikhail *et al.* (2001) descreve os vetores e dados de atributo da seguinte forma:

- Mapas planimétricos: em que somente a posição horizontal dos elementos da superfície. A sua acurácia varia de acordo com a técnica fotogramétrica empregada.
- Curvas de nível: em que cada linha representa uma elevação do terreno e pode ser derivado do MDE.
- Mapas topográficos: onde representa a planimetria do terreno e a sua geometria bem como a elevação a partir das curvas de nível.

- Mapas temáticos: em que são representados um tema em particular, sendo geralmente utilizados em SIGs por meio de camadas (*layers*).
- Perfil: em que representa a linha de interseção entre um plano vertical e a superfície do terreno. O perfil pode ser apresentado em qualquer orientação com referência ao plano horizontal (XY).
- Modelos tridimensionais: em que a geometria do objeto imageado é representada por pontos e linhas que se interligam, formando um sólido tridimensional.

Em relação à disseminação dos dados por meio dos SIGs, Anson & Omeling (1996) e Sonti (2015), definem que um SIG inclui a aquisição de dados e armazenagem, criação e estruturação do banco de dados, manipulação e análise dos dados, e apresentação da informação espacial por meio de uma interface. O SIG pode ser aplicado não só no campo da Engenharia, de acordo com Geertman (1999) este sistema pode ser aplicado em segurança, gerenciamento e análise de floresta e mineração, e estende-se até *geomarketing*, seguros, navegação e telecomunicações.

- Ortorretificação

A produção de uma imagem digital com escala única tem como objetivo o auxílio à realização de medições de ângulos, distâncias, perímetros, áreas, etc. O processo de geração de uma ortomagem é conhecido por ortorretificação. O processo de ortorretificação pode ser realizado de forma direta ou indireta.

Segundo Mikhail *et al.* (2001), o processo direto é realizado, basicamente, da seguinte maneira: cada pixel presente na imagem é projetado no espaço objeto via equação de colinearidade na forma indireta, utilizando-se as informações do centro perspectivo (POE), da câmara (POI) e da superfície (MDE), e então é projetada em uma imagem de saída (ortomagem). Como resultado, alguns pixels na ortomagem deverão passar por um processo de interpolação de intensidade (cor).

Segundo Kraus (2007), o processo indireto é realizado da seguinte maneira:

1. Define-se uma imagem de saída (ortomagem) com pixels vazios em termos de intensidade (cor);

2. São relacionadas as coordenadas em Z do MDE para cada elemento (pixel) da ortoimagem.
3. Utiliza-se da imagem, dos POE e dos POI (estimados por meio de calibração de câmara ou fototriangulação) para determinar, via equação de colinearidade direta, a coordenada dos pontos do terreno (X, Y, Z) na imagem de entrada;
4. A última etapa é atribuir a intensidade (cor) para todos os pontos no *grid* (XY) a partir da imagem de entrada. Geralmente, a determinação dos valores de intensidade (da imagem de entrada) deverão ser interpolados para que seja atribuída uma tonalidade apropriada a ortoimagem que está sendo gerada.

- Calibração da Câmara

A calibração de câmara é um procedimento fundamental para a determinação dos POI das câmaras digitais. O objetivo é a modelagem dos erros sistemáticos oriundos dos conjuntos das lentes para que sejam gerados produtos cartográficos confiáveis. As câmaras digitais não-métricas, além de serem sensores extremamente leves, também possuem alta resolução e são adquiridas a menor custo, se comparadas as câmaras métricas. Porém, algumas limitações se fazem presentes, como a instabilidade da geometria interior da câmara e as distorções oriundas dos materiais e dos processos de montagem das lentes (GALO e TOMMASELLI, 2011).

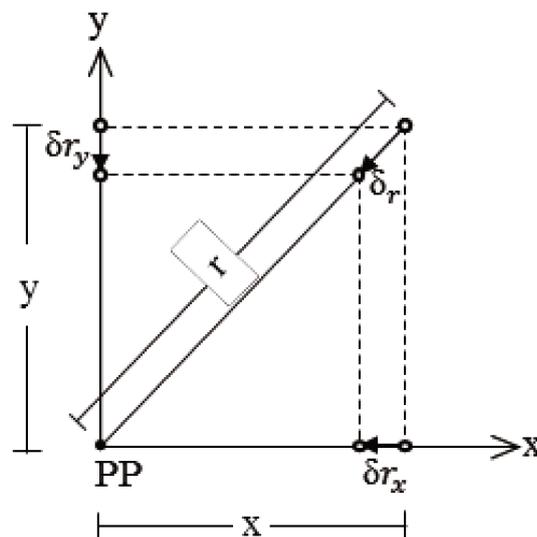
Para utilizar uma câmara que não tenha sido produzida originalmente com o propósito métrico, Galo e Tommaselli (2011) recomendam a realização do procedimento de calibração de câmara para determinar os POI. Segundo Remondino e Fraser (2006), a correta calibração de câmara e a determinação dos POI são pré-requisito necessário para a correção das distorções oriundas das lentes, e com isso torna-se possível a extração de informações métricas e tridimensionais, precisas e confiáveis, a partir de imagens obtidas com esse tipo de sensor.

As distorções geradas pelas lentes são diferentes para cada tipo de câmara e apresentam um deslocamento das coordenadas no espaço imagem. Geralmente, as câmaras digitais apresentam dois principais tipos de distorção, a distorção radial

simétrica e a descentrada (BROWN, 1971). É importante destacar que as câmaras digitais exibem significativa distorção radial simétrica (ZHANG, 2000).

A distorção radial simétrica, apresenta comportamento simétrico quanto ao deslocamento das coordenadas no espaço imagem em relação ao ponto principal. Segundo Mugnier *et al.* (2004), a distorção radial apresenta o deslocamento de um ponto em relação ao ponto principal em qualquer ângulo a partir do ponto principal (Figura 8).

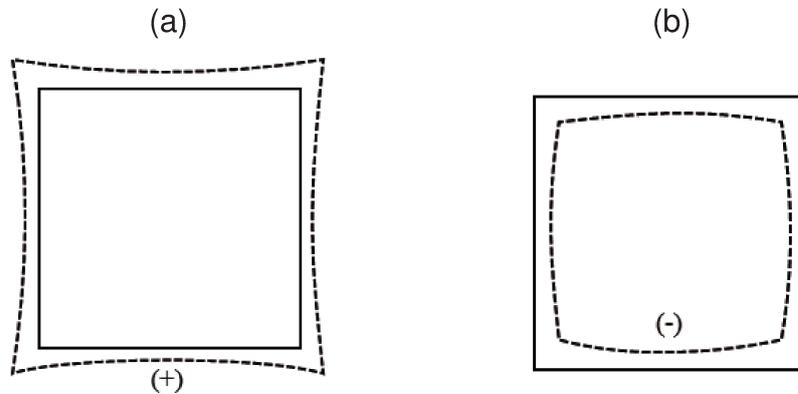
Figura 8. Distorção radial simétrica.



Adaptado de Galo e Tommaseli (2011)

Os efeitos da distorção radial simétrica no plano da imagem para duas câmaras diferentes, podem ser identificados na Figura 9a, onde a distorção é positiva (almofada ou *pincushion*), e na Figura 9b, onde a distorção é negativa (barril ou *barrel distortion*) (GALO e TOMMASELLI, 2011).

Figura 9. Efeitos da distorção radial (o frame ideal é apresentado por uma linha contínua e o frame com deslocamento é apresentado em por linha tracejada). (a) Distorção na forma de almofada (*pincushion distortion*). (b) Distorção na forma de barril (*barrel distortion*).



Adaptado de Galo e Tommaselli (2011).

A distorção radial descentrada, segundo Galo e Tommaselli (2011), ocorre devido ao não alinhamento dos eixos óticos das lentes individuais que compõem o sistema, ou seja, dos centros de curvatura de todas as lentes do sistema, de modo que elas não são colineares.

As relações matemáticas na Fotogrametria analítica são baseadas em afirmações como “um raio de luz viaja em linhas retas” e “o plano da imagem de uma câmara é plano”, para que essas afirmações possam ser materializadas, vários refinamentos de coordenadas são necessários para corrigir os efeitos das distorções das lentes nas coordenadas no plano da imagem (WOLF e DEWITT, 2004).

Um dos processos para a calibração da câmara e determinação das distorções, é baseado na Fotogrametria analítica e é conhecido por *Self-calibration*. O processo tem dois objetivos principais: o primeiro é fornecer informações sobre a câmara que está sendo usada para obter as informações tridimensionais, e o segundo é fornecer mecanismos para a compensação dos erros sistemáticos residuais nas coordenadas do espaço imagem.

O processo de calibração *Self-calibration* é baseado na equação de colinearidade, em que os POI da câmara são incluídos como termos desconhecidos para o ajustamento da distância focal calibrada, o deslocamento das coordenadas do ponto principal, as distorções radiais simétricas e descentradas. (WOLF e DEWITT, 2004).

De acordo com Kraus (2007), as correções das coordenadas do ponto no espaço imagem são calculadas utilizando o modelo matemático apresentado na Equação 9 e 10:

$$x' = x + \bar{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) + [p_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x} \bar{y}] \quad (9)$$

$$y' = y + \bar{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) + [p_2(r^2 + 2\bar{y}^2) + 2p_1 \bar{x} \bar{y}] \quad (10)$$

Em que as coordenadas corrigidas dos pontos no espaço imagem são  $x'$  e  $y'$ , os coeficientes de distorção radial simétrica ( $k_1$ ,  $k_2$ , e  $k_3$ ), os coeficiente distorção descentrada ( $p_1$  e  $p_2$ ), e  $r$  é a distância entre o ponto medido (no espaço imagem) e o ponto principal, dado pelas Equação 11, 12 e 13.

$$\bar{x} = x - x_p \quad (11)$$

$$\bar{y} = y - y_p \quad (12)$$

$$r = [(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2]^{1/2} \quad (13)$$

## 2.2 Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT)

Conforme a definição da ANAC (BRASIL, 2020), os VANTs são aeronaves não tripuladas capazes de sustentar-se e circular no espaço aéreo mediante reações aerodinâmicas, sendo pilotados remotamente – nos três eixos, e que não sejam utilizadas para fins meramente recreativos.

Gerk (2018) aponta as principais plataformas para a geração de produtos cartográficos por meio da Fotogrametria, sendo classificadas por diferentes aspectos de geometria de aquisição, tamanho da área de cobertura, típico tamanho de elemento de resolução espacial aproximado, resolução temporal, e sensores óticos embarcados (Quadro 2).

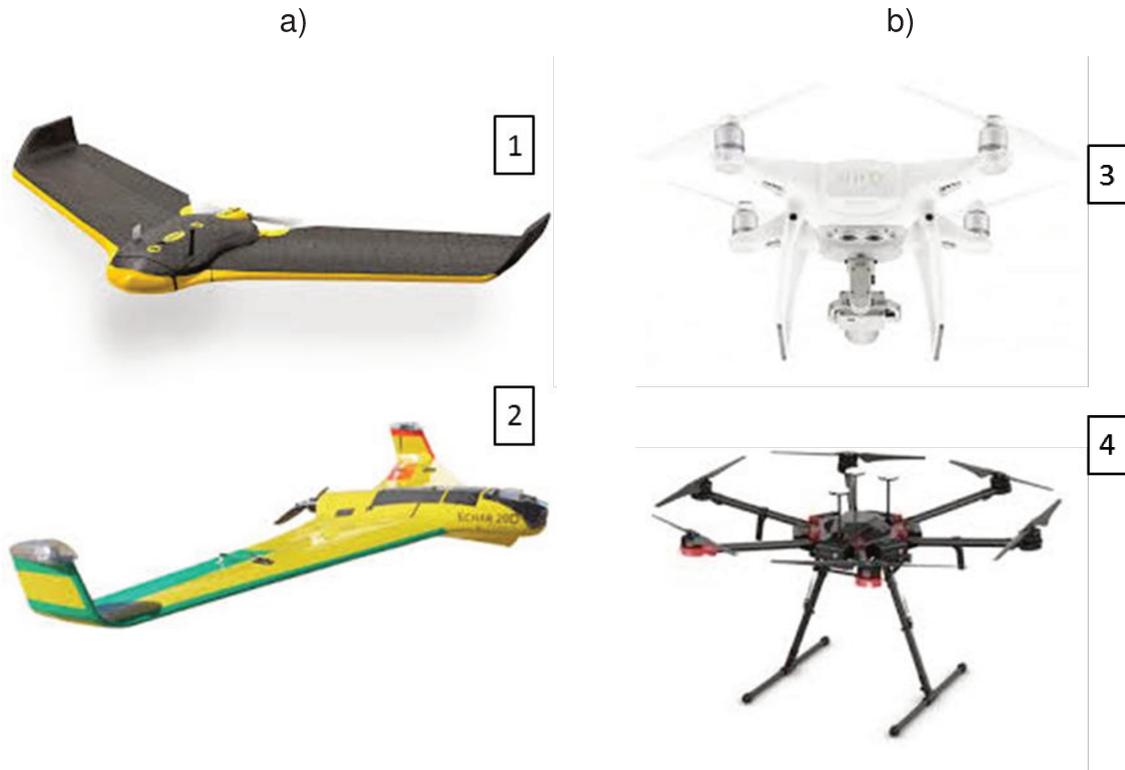
Quadro 2. Principais plataformas utilizadas na Fotogrametria.

<b>Aspecto</b>	<b>Plataforma área convencional</b>	<b>Close-range</b>	<b>VANT</b>
Geometria de aquisição - visibilidade do objeto	Nadir (vertical), oblíqua – cobertura do terreno e de telhados	Terrestre horizontal e oblíqua – fachadas e fachadas verticais	Flexibilidade para aquisição: nadir, oblíqua, horizontal – reconstrução mais completa de objetos
Área de cobertura	km <sup>2</sup>	Limitado a objetos	De objetos à aproximadamente 15 ha (asa rotativa), 45 ha (asa fixa)
Típico tamanho de elemento de resolução espacial aproximado	≥ 5 cm	Em mm	Em cm ou menores (mm)
Sensores óticos embarcados	RGB, multiespectral, termal, e hiperespectrais	RGB, infravermelho próximo (NIR), e termal.	RGB, multiespectral, termal, e hiperespectrais

Adaptado de Gerk (2018)

Aprofundando a análise em relação às plataformas remotamente pilotadas, atualmente existem vários modelos de VANT, e basicamente, podemos citar dois tipos: os de asa fixa (Figura 10a) e os de asa rotativa (Figura 10b), nos quais possuem 4, 6 ou mais hélices. A escolha do tipo de plataforma é relativa a atividade a ser realizada, levando-se em consideração as características da área, como: tamanho da área a ser levantada, tamanho do GSD requerido, e possíveis objetos acima do solo que podem interferir na execução do voo ou na geração de ortoimagens (áreas de oclusão).

Figura 10. Modelos de VANT. a) VANTs de asa fixa, b) VANTs de asa rotativa.



Fonte: (1) Ebee Rtk

<https://www.sensefly.com>.

(2) Echar 20D

<https://xmrobots.com.br>

Fonte: (3) DJI Phantom 4. (4) DJI

Matrice 600. <https://www.dji.com/br>

c)



Fonte: (5) Elipse VTOL fixed wing PPK

<https://baam.tech/aircraft/elipse-vtol-ppk>

Os VANTs de asa fixa (Figura 10a) são mais robustos e possuem maior capacidade de carga e conseqüentemente podem acomodar uma bateria com maior autonomia, possibilitando maior tempo de voo. O valor de mercado desse tipo de

plataforma é mais alto e outra desvantagem é em relação a flexibilidade, onde o lançamento é realizado via catapulta ou manualmente, e sendo necessário uma “pista” para pouso horizontal. Essas plataformas possuem maior velocidade, mas não são capazes de pairar sobre um determinado ponto para obter imagens e além disso, as manobras são restritas devido à velocidade de entrada entre as linhas de sobreposição, na qual existe uma circunferência com raio mínimo.

Por outro lado, os de asa rotativa (Figura 10b) possuem um custo de aquisição e de manutenção mais baixos, entretanto, existe a limitação da carga que a plataforma consegue transportar. Devido ao seu baixo custo, restrição a peso, e as dimensões limitadas da bateria, são necessários mais voos para mapear uma área extensa devido a sua autonomia limitada. O grande atrativo desse tipo de plataforma é a sua flexibilidade. Esse tipo de plataforma pode decolar em linha vertical e aterrissar com facilidade em terrenos acidentados e com muitos obstáculos, são capazes de pairar no ar, girar em torno de seu eixo e realizar manobras (tanto para evitar contato com obstáculos quanto para executar a transição para as demais linhas de voo) com maior suavidade e precisão.

Nos últimos anos, as empresas estão buscando desenvolver plataformas melhores, tanto em decolagem quanto em capacidade de carga, como as conhecidas por “VTOL de asa fixa” (Figura 10c). Estas novas plataformas possuem as vantagens das plataformas de asa fixa (estabilidade, velocidade e capacidade a carga) com os de asa rotativa (decolagem e pouso na vertical e maior flexibilidade de manobras).

A operação deste tipo de veículo é realizada por um operador a partir de uma estação de controle no solo. Devido à dificuldade de aquisição de dados geospaciais em determinados tipos de terrenos, algumas atividades utilizam VANTs para facilitar e reduzir o esforço humano. Em terrenos acidentados e de difícil acesso, essa plataforma apresenta uma redução do risco de acidentes na etapa de aquisição de dados. Porém, é necessária uma maior atenção em relação à objetos acima do solo, como os prédios, visto que a altura de voo de um VANT pode ser baixa, acarretando em colisões frontais. Além disso, em casos de terrenos com objetos altos acima do solo, Oliveira *et al.* (2018) aconselha uma altura de voo mais alta para evitar áreas de oclusão na geração de ortoimagens verdadeiras.

A flexibilidade dos VANTs proporcionou o seu emprego em diversas atividade, dentre elas podemos citar: o mapeamento de áreas costeiras (GONÇALVES *et al.*, 2018); na arquitetura, as imagens obtidas com a plataforma

possibilitam a geração de modelos tridimensionais para investigações culturais e arqueologia (EISENBEISS e SAUERBIER, 2011); na área ambiental, o equipamento pode ser utilizado para o monitoramento do degelo glacial (RYAN *et al.*, 2015), para o monitoramento de deslizamentos de maciços de terra (AL-RAWABDEH *et al.*, 2017); na agricultura (REMONDINO *et al.*, 2011), na agricultura de precisão (OLIVEIRA *et al.*, 2018) e florestas (DOMINGO *et al.*, 2019), e em monitoramento de linhas férreas (FLAMMINI *et al.*, 2016).

São necessários diversos componentes eletrônicos para que seja possível o controle da plataforma a partir de uma estação de solo, dos quais são vitais para tomada de decisão em tempo real por parte do operador. Por mais que algumas limitações se façam presentes, os avanços tecnológicos em sensores de posicionamento e atitude, câmaras digitais e demais sensores para aquisição de dados, prevenção de colisão, e a autonomia da bateria, permitiram aos VANTs uma participação expressiva no mercado comercial mundial. A seguir são apresentados os principais componentes de um VANT (COLOMINA e MOLINA, 2014):

- Estação de controle no solo: dispositivo e *software* que possibilitam o monitoramento e controle da plataforma aérea por meio de uma interface digital;
- Sistema de comunicação: composto por controlador e dispositivo, conectados sem fio a uma frequência de 2,4Ghz. Essa conexão possibilita a rápida troca de informações entre a plataforma e a estação, possibilitando a tomada de decisão por parte dos operadores;
- Sistema de orientação e posicionamento: sistema composto por receptor/receptores GNSS, antena e por uma unidade de medição inercial - IMU (*Inertial Measurement Unit*). Esse sistema é responsável por auxiliar na realização do plano de voo pré-programado, identificar a atitude e posição da plataforma no momento da tomada da imagem, e além disso, fornecer informações ao piloto automático. Atualmente diversos são os sensores de posicionamento e orientação, no que se refere a confiabilidade dos dados obtidos e também na integração desses sensores, dos quais são capazes de derivar informações à níveis centimétricos. No geral, a IMU é responsável por mensurar a velocidade e aceleração angular nos três eixos da plataforma no momento da tomada da imagem, que por sua vez podem ser transformadas em

ângulos de Euler ( $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ), e os receptores GNSS e antena são responsáveis por fornecer a posição da plataforma nos três eixos em função de um sistema de coordenadas ( $X_0$ ,  $Y_0$  e  $Z_0$ );

- Piloto automático: o sistema é responsável por realizar leituras da posição, atitude e velocidade da aeronave, e usar esses dados como parâmetros de ajustamento para a posição da plataforma em função do trajeto de voo previamente planejado;
- Sensores embarcados: o sensor imageador é constituído de um conjunto de lentes em uma câmara digital. Por ser um sistema passivo, o sensor imageador registra os comprimentos de REM oriunda do sol que são absorvidas e refletidas pelas superfícies dos objetos. Os principais tipos de sensores óticos são: RGB, multiespectral, termal e hiperespectrais.

## 2.3 Controle de Qualidade

Primeiramente, antes de apresentar as normativas para o controle de qualidade, algumas definições e interpretações dos principais termos como qualidade, acurácia (exatidão) e precisão, se faz necessária.

Montgomery e Runger (2013) entende a qualidade como adequação ao uso, podendo ser determinada através da interação de qualidade de projeto e qualidade de conformidade. A qualidade de projeto, significa diferentes níveis de desempenho, de confiabilidade, de serviço e de função. A qualidade de conformidade é relativa à redução sistemática de variabilidade e a eliminação de defeitos. No que diz respeito a melhoria de qualidade, entende-se por eliminação sistemática de resíduos, como por exemplo, nos produtos cartográficos.

Para Aronoff (1995), a qualidade é um índice de aceitação de um produto ou mapa, sendo baseada no valor mínimo de acurácia aceito para uma determinada aplicação e que esteja dentro de um intervalo de confiança. A qualidade é mensurada por meio da acurácia, confiabilidade, custo e reprodução. Além disso, o autor considera importante gerenciar o erro inerente ao processo de produção (risco de produção) e de utilização por parte do usuário (risco do consumidor). Segundo o autor, a qualidade de um produto está diretamente relacionada ao seu custo de produção e avaliação. Por um lado, o teste de acurácia realizado com uma amostra grande reduz

o risco de produção, e conseqüentemente, a chance um produto acurado ser rejeitado. Por outro lado, aumenta-se o custo para a avaliação do mesmo.

Para Galo e Camargo (1994), a precisão está relacionada com dispersão dos valores observados em torno do valor médio, enquanto a acurácia está relacionada com a proximidade ao valor real, sem a influência dos erros sistemáticos.

Para Monico *et al.* (2009), o termo acurácia envolve tanto erros sistemáticos como aleatórios, enquanto a precisão está relacionada apenas com erros aleatórios. Além disso, para os casos em que não há tendência, a acurácia se resume à medida precisão.

O Comitê Federal de Dados Geográficos dos Estados Unidos da América (*Federal Geographic Data Committe*), por meio do Padrão de Acurácia Posicional para Dados Geospaciais (*Geospatial Positioning Accuracy Standards*), define a acurácia como sendo o erro linear entre um valor estimado (medido ou observado) e o seu verdadeiro valor (referencia), ou aceito como verdadeiro, com um nível de confiança de 95%.

Neste contexto, diversas normas regem as diretrizes para a geração de produtos cartográficos. Essas normas têm como objetivo estabelecer um padrão de qualidade a partir da comparação entre pontos extraídos dos produtos finais e os mesmos levantados a partir de técnicas de alta precisão, dos quais são utilizados como referência.

A seguir serão apresentados os critérios de aceitação de produtos cartográficos no Brasil (BRASIL, 1984; BRASIL, 2016), assim como uma breve descrição de como é a regra estabelecida nos Estados Unidos da América (NSSDA, 1998) e pela ASPRS (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*).

No Brasil, visando estabelecer procedimentos e padrões a serem obedecidos por todas as entidades públicas e privadas, a Presidência da República, por meio do Decreto-lei nº 89.817, de 20 de Junho de 1984, estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional.

As instruções, de acordo com o Art 2º (BRASIL, 1984), visam estabelecer procedimentos e padrões a serem obedecidos na elaboração e apresentação de normas da Cartografia Nacional, bem como padrões mínimos a serem adotados no desenvolvimento das atividades cartográficas.

A classificação de uma carta, de acordo com as especificações gerais do Capítulo II, seção I e II, fica inerente a sua exatidão, sendo necessário obedecer ao PEC, conforme os critérios abaixo:

1. Noventa por cento dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica Planimétrico, estabelecido.
2. Noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas-de-nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC Altimétrico, estabelecido.

De acordo com o Art. 8º, este índice é relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos. A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro-Padrão -  $PEC = 1,6449 EP$ . O Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do PEC. As cartas, segundo sua exatidão, são classificadas em Classe A, B ou C, conforme os critérios apresentados no Quadro 3, com as seguintes informações: classificação da carta em classes A, B ou C,  $E_c$  é a escala da carta,  $E_q$  é a equidistância das curvas de nível (em metros) e EP é o valor para o erro padrão (em metros).

Quadro 3. Critérios do PEC

Classe	Planimetria		Altimetria	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	$0,5 \times E_c$	$0,3 \times EP$	$1/2 \times E_q$	$1/3 \times E_q$
B	$0,8 \times E_c$	$0,5 \times EP$	$3/5 \times E_q$	$2/5 \times E_q$
C	$1,0 \times E_c$	$0,6 \times EP$	$3/4 \times E_q$	$1/2 \times E_q$

Brasil (1984)

O Decreto-lei nº 89.817 (BRASIL, 1984) foi instaurado no âmbito analógico, no ano de 1984. Nessa época ainda não era considerado o uso de produtos gerados a partir de sensores digitais, mas de processos optico-mecânico-manuais aplicados sobre bases celulósicas. Tais processos eram passíveis de diferentes fontes de erro posicional na produção de um documento cartográfico.

A metodologia é baseada na análise das discrepâncias entre as coordenadas de pontos retirados da carta e as coordenadas dos pontos

correspondentes obtidos a partir de observações realizadas em campo, consideradas como coordenadas de referência (GALO e CAMARGO, 1994), e sua classificação ficava inerente a escala da carta, isso quer dizer, ao trabalhar com uma carta à uma determinada escala, automaticamente é atribuído um índice de exatidão planimétrico e altimétrico.

A evolução da tecnologia na Cartografia Digital, a velocidade de compartilhamento de informações, a interdisciplinaridade dos SIG e o uso de dados oriundos de diferentes sensores, criaram a necessidade do desenvolvimento de novas metodologias para a avaliação dos produtos digitais.

No Brasil, o Decreto nº 6.666, de 27 de Novembro de 2008, institui a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), sendo definida conforme o Art.2º, do Cap. III, como o conjunto integrado de tecnologias, políticas, mecanismos e procedimentos de coordenação e monitoramento, de acordo com os padrões e normas da Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR).

Em 2011, devido a necessidade de uma especificação técnica para normatizar a forma de adquirir a geometria dos dados geoespaciais vetoriais e os seus atributos correlacionados, a Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (DSG) publicou as Especificações Técnicas de Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) (BRASIL, 2011). Em 2016 a DSG publicou a Norma de Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG) (BRASIL, 2016), em que o objetivo principal foi padronizar a forma para avaliar a qualidade dos produtos digitais. A publicação dessas especificações técnicas busca complementar o Decreto nº 89.817 (BRASIL, 1984) para atender aos requisitos dos novos tipos de dados, incluindo os indicadores de qualidade: completeza, consistência lógica, acurácia posicional, acurácia temporal, acurácia temática e usabilidade.

Os critérios de classificação de um produto cartográfico digital quanto a sua acurácia posicional, conforme o Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) (BRASIL, 2016), publicado na versão 2.1.3 da ET-ADGV (BRASIL, 2011), são apresentados no Quadro 4, 5, e 6, com as seguintes informações: PEC representa o Padrão de Exatidão Cartográfica, PEC-PCD representa o Padrão de Exatidão Cartográfica de Produtos Cartográficos Digitais, EM é o erro médio (em metros), EP é o erro padrão (em metros) e Eq é a equidistância entre as curvas de nível (em metros).

Quadro 4. PEC-PCD Planimétrico.

PEC	PEC-PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000	
		EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)
	A	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70
A	B	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00
B	C	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00
C	D	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00

Brasil (2011)

Quadro 5. PEC-PCD Altimétrico dos pontos cotados e do MDT, MDE e MDS.

PEC	PEC-PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000	
		EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)
	A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84
A	B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,67	2,50	1,67
B	C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00
C	D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50

Brasil (2011)

Quadro 6. Padrão de Exatidão Cartográfica da Altimetria (curvas de nível) dos Produtos Cartográficos Digitais.

PEC	PEC-PCD	1:1.000 (Eq=1,00m)		1:2.000 (Eq=1,00m)		1:5.000 (Eq=2,00m)		1:10.000 (Eq=5,00m)	
		EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)
A	A	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,67	2,50	1,67
B	B	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00
C	C	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50
	D	1,00	0,60	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00

Brasil (2011)

Em relação apenas a qualidade posicional, a principal diferença entre o PEC e o PEC-PCD é a criação de mais uma classe mais rigorosa no que diz respeito a precisão dos resultados, tanto para a planimetria quanto para a altimetria. A PEC possui classes A, B e C, já a PEC-PCD possui as classes A, B, C e D. A primeira classe do PEC-PCD, a Classe A, apresenta erros aceitáveis de 0,27m, ante 0,50m para a mesma classe para o PEC.

Neste trabalho serão analisadas a existência de tendências e a precisão dos resultados por meio da metodologia apresentada em Galo e Camargo (1994) e

Dalmolin e Leal (2001), baseados em Merchant (1982). A metodologia proposta busca, por meio de uma análise estatística, complementar o procedimento de avaliação da PEC-PCD e atribuir maior confiabilidade aos resultados.

Esta análise, bem como Brasil (2011), recomenda que para um produto digital ser aceito como um produto de referência, e conseqüentemente para a INDE, as coordenadas extraídas dos produtos quando comparados com as coordenadas levantadas em campo por métodos de alta precisão, devem apresentar os valores iguais ou inferiores aos previstos no PEC-PCD. Além disso, para se avaliar a exatidão é necessário tratar os erros sistemáticos (via tendência) e aleatórios (via precisão) (MERCHANT, 1982).

Na Equação 14, o valor para  $X$  representa as coordenadas altimétricas ou planimétricas para cada ponto  $i$  e  $\Delta X$  é a discrepância entre as coordenadas observadas ( $X_i$ ) e as coordenadas de referências ( $X_i^r$ ).

$$\Delta X = X_i - X_i^r \quad (14)$$

A média ( $\Delta\bar{X}$ ), bem como o desvio padrão ( $S_{\Delta X}$ ) das discrepâncias amostrais são calculadas por meio da Equação 15 e 16, onde  $n$  é o tamanho da amostra dos pontos de checagem:

$$\Delta\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta X_i \quad (15)$$

$$S_{\Delta X} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta X_i - \Delta\bar{X})^2} \quad (16)$$

O procedimento adotado para o teste de tendência é baseado na estatística amostral “*t-student*”, e deve-se verificar se o valor de *t*-amostral está no intervalo de aceitação ou rejeição, conforme as seguintes hipóteses:

$$\begin{array}{ll} H_0: \Delta\bar{X} = 0, & \text{Hipótese nula} \\ H_1: \Delta\bar{X} \neq 0, & \text{Hipótese alternativa} \end{array}$$

O valor de t-amostral é particularmente válido para amostras consideradas pequenas e deve ser calculado por meio da Equação 17. O intervalo de confiança é calculado por meio da Equação 18. Na Equação 17 e 18, tem-se que:  $t_X$  é o valor de t-amostral,  $t_{(n-1,\alpha/2)}$  é o intervalo de confiança,  $n$  é o tamanho da amostra e  $\alpha$  é o nível de confiança.

$$t_X = \frac{\Delta\bar{X}}{S_{\Delta X}} \sqrt{n} \quad (17)$$

$$|t_X| < t_{(n-1,\alpha/2)} \quad (18)$$

A segunda análise proposta pelos autores é relacionada à precisão dos resultados. Esta análise tem como objetivo comparar o desvio padrão das observações com o EP previsto no PEC, de acordo com a classe, usando a distribuição de qui-quadrado ( $\chi^2_X$ ). Segundo Galo e Camargo (1994), o teste de hipótese pode ser formulado da seguinte maneira:

$$H_0: S_{\Delta\bar{X}}^2 = \sigma_X^2, \quad \text{Hipótese nula}$$

$$H_1: S_{\Delta\bar{X}}^2 > \sigma_X^2, \quad \text{Hipótese alternativa}$$

O valor para  $S_{\Delta\bar{X}}^2$  é tomado como sendo igual ao EP previsto no Decreto, de acordo com a escala. O teste entre as variâncias ( $\sigma_X^2$ ) (incerteza) é baseado no cálculo da variável aleatória de teste (Equação 19), onde esta terá distribuição qui-quadrado ( $\chi^2_X$ ) quando a variável  $X$  tem distribuição normal, para o grau de liberdade ( $\nu(n-1)$ ) (Equação 20). Deve-se verificar se o valor calculado está no intervalo de aceitação ( $\chi^2_{(n-1,\alpha)}$ ) (Equação 21), se não, rejeita-se a hipótese de que o produto atenda à precisão pré-estabelecida.

$$\sigma_X = \frac{EP}{\sqrt{2}} \quad (19)$$

$$\chi^2_X = (n-1) \frac{S_{\Delta\bar{X}}^2}{\sigma_X^2} \quad (20)$$

$$\chi^2_X \leq \chi^2_{(n-1,\alpha)} \quad (21)$$

É válido ressaltar que as especificações do Decreto PEC e do PEC-PCD indicam apenas as tolerâncias aceitáveis para os produtos e não especifica o tamanho da amostra, bem como a localização dos pontos de checagem, necessária para a realização do controle de qualidade dos produtos.

Em relação as normativas internacionais, a ASPRS estabeleceu as suas primeiras diretrizes para o controle de qualidade para mapas de grande escala no ano de 1990 (ASPRS, 1990). Nessa época, os padrões foram estabelecidos tal qual a normativa brasileira, fixando a classe do produto de acordo com a sua escala. A atualização das diretrizes teve início em 2013. A atualização buscou adequar os padrões de controle para atender as novas tecnologias de aquisição e disseminação dos produtos digitais. Após diversas revisões e adequações, em 2015 foi apresentada a versão final do documento.

Em suma, a atualização da ASPRS (2015) buscou estabelecer padrões mais rígidos para a qualidade posicional dos produtos digitais. Os produtos digitais avaliados são: as ortoimagens, os dados digitais planimétricos e os dados digitais altimétricos. Os produtos são classes, conforme os valores obtidos por meio do indicador estatístico de dispersão REMQ (*Root Mean Square Error* – RMSE, em inglês), e o erros planimétricos e altimétricos aceitos são relativos ao tamanho do pixel e da escala do mapa. Conforme essa atualização de 2015, foram incluídos os seguintes parâmetros: a acurácia dos pontos de controle, a acurácia da aerotriangulação, a acurácia horizontal dos dados de elevação, a delimitação de áreas de baixa confiança (*low confidence areas*) para dados verticais e a definição de um número mínimo de pontos de checagem – em função da área a ser mapeada.

A especificação faz referência ao Padrão Nacional de Precisão de Dados Espaciais (NSSDA (*National Standard for Spatial Data Accuracy*), em inglês) de 1998, dos Estados Unidos, baseada nos estudos desenvolvidos por Merchant (1982), onde foi estabelecido um nível de confiança de 95% e a quantidade mínima de 20 pontos de checagem, bem definidos e distribuídos. A especificação técnica estabelece uma abordagem diferente para produtos gerados via Fotogrametria e para produtos gerados a partir de dados oriundos de sensores LiDAR.

Em 1998 o NSSDA estabeleceu uma padronização para os mapas georreferenciados e para dados geospaciais. O objetivo foi implementar análises estatísticas para estimar a qualidade posicional dos dados digitais a partir de pontos, imagens e vetores obtidos por diferentes meios de aquisição, como fotografias aéreas,

imagens de satélite e levantamentos topográficos. A acurácia posicional é mensurada por meio da análise estatística REMQ em função das coordenadas de referência e das coordenadas observadas. A medida de referência deverá ser obtida por meio de técnicas convencionais. Tais técnicas possuem acurácia centimétrica e dispõem de indicadores de precisão do levantamento.

### 2.3.1 Elementos para avaliação de qualidade

A etapa de avaliação é indispensável para a disseminação dos produtos cartográficos digitais. O processo tem como objetivo comparar os resultados obtidos a partir de um método com dados de referência. Os dados de referência devem ser obtidos por técnicas de posicionamento com acurácia superior ao método utilizado na elaboração do produto a ser avaliado. De forma geral, a avaliação dos resultados será realizada de duas maneiras, pela análise qualitativa e pela análise quantitativa.

A análise qualitativa é a maneira mais simples de avaliação. Esse tipo de avaliação tem como objetivo a análise visual e de forma intuitiva, visando observar a coerência dos resultados obtidos.

A métrica para análise quantitativa, no caso, a comparação pontual, o REMQ ou RMSE é uma medida frequentemente utilizada para verificar a acurácia posicional. Essa métrica, segundo Ghilani e Wolf (2006), é calculada a partir das discrepâncias entre as coordenadas de referência e as coordenadas extraídas dos modelos digitais e ortoimagens (observações). A formulação envolvida no cálculo do valor do REMQ relacionado à uma dada componente (X, Y ou Z) em um tamanho de amostra (n) é apresentada na Equação 22.

$$REMQ = \sqrt{EMQ} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Coordenadas_{referência} - Coordenadas_{observadas})^2} \quad (22)$$

## 2.4 Aplicações para os produtos cartográficos digitais gerados a partir de dados obtidos a partir de processos fotogramétricos

As aplicações para os produtos fotogramétricos são referentes a respectivas qualidades, sendo divididas em escalas e classes. A qualidade dos produtos gerados a partir das novas tecnologias, como a Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, é classificada conforme a PEC-PCD. Neste trabalho, as aplicações para os produtos gerados serão baseadas na Norma Brasileira (NBR) 14.166 de 1998 (BRASIL, 1998), intitulada Rede de Referência Cadastral Municipal – Procedimento.

A seguir são apresentadas as principais aplicações dos produtos cartográficos digitais, de acordo com a sua escala, conforme a NBR 14.166 (BRASIL, 1998):

- **Planta cadastral municipal:** Planta, na escala 1:1.000 ou maior, tendo como finalidade primordial os estudos sobre alinhamentos, nivelamentos e emplacamento de edificações, servindo de base aos cadastros de infraestrutura urbana, apoiando ainda a construção das plantas de quadras do Cadastro Imobiliário Fiscal, e o cadastro fundiário para registros públicos e cadastro de equipamentos comunitários ou sociais destinados, apresentando ainda pontos cotados, além da hidrografia, drenagem, sistema viário, obras de arte, logradouros e arborização, registrando, também, informações sobre o parcelamento do solo urbano e das edificações;
- **Planta genérica de valores (PGV):** Planta integrante do Cadastro Imobiliário Fiscal. Geralmente é apresentada na escala de 1:5.000 ou 1:10.000 e é obtida a partir da Planta de Referência Cadastral do Município;
- **Planta indicativa de sistemas de infraestrutura urbana:** Planta, na escala 1:1.000 ou maior, onde estão registradas as informações como: água, esgoto, eletricidade, iluminação pública, drenagem, guias, sarjetas, pavimentação, telefone, gás, oleodutos e outros;
- **Planta de quadra ou planta quadra:** na escala 1:1.000, 1:500 ou maiores.

## **2.5 Legislação brasileira no uso de VANT**

Os VANTs são considerados aeronaves, mesmo que não possuam tripulação ou piloto a bordo, e por isso, devem seguir as normas estabelecidas pelos órgãos responsáveis pela aviação civil brasileira. As normas buscam abranger as diversas complexidades em uma operação aérea e são relativas às diversas categorias de aeronaves. Tais normativas têm como objetivo proporcionar um espaço aéreo seguro para o desenvolvimento de atividades recreativas e não recreativas, de uma forma controlada e organizada, visando mitigar os riscos que eventualmente possam ocorrer.

No Brasil, o acesso ao espaço aéreo para atividades não recreativas com VANTs é regulamentado por três instituições, sendo elas: a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL).

A ANAC e a ANATEL são órgãos federais, sob a definição de agências reguladoras. As agências reguladoras foram criadas no âmbito do modelo administrativo de desestatização, em 1990. Essas agências possuem poderes de regular, controlar e fiscalizar as atividades correlatas à sua área de atuação. A seguir são apresentadas as normativas para o uso de VANTs em território brasileiro.

### **2.5.1 Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC)**

A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), criada em 2005 por meio da Lei nº 11.182/2015 e vinculada ao Ministério da Defesa, o Cap. I, Art. 8º tem como atribuições: realizar estudos, estabelecer normas, promover a implementação das normas e recomendações internacionais de aviação civil, observados os acordos, tratados e convenções internacionais de que seja parte a República Federativa do Brasil. No geral, a ANAC tem como objetivo regulamentar o acesso ao espaço aéreo brasileiro, tornando um espaço seguro, tanto para aeronaves quanto para pessoas anuentes e não anuentes.

Para realizar o requerimento de acesso ao espaço aéreo brasileiro, o usuário deverá cadastrar o VANT por meio do Sistema de Aeronaves Não Tripuladas (SISANT) da ANAC. O cadastro é obrigatório e deve fornecer as seguintes

informações: dados pessoais (nome, endereço, CPF e e-mail), dados da pessoa física (CNPJ) se for o caso, dados da aeronave (nome, modelo, fabricante, número de série e foto que identifique a aeronave) e uma combinação de nove dígitos, que deverá ser fixada em local visível na aeronave. Após o cadastramento será gerada uma certidão de cadastro do VANT para o uso não recreativo, que deverá ser portada durante a execução dos voos.

Em 2016, o DECEA disponibilizou o Sistema de Solicitação de Acesso ao Espaço Aéreo por RPAS (SARPAS) para facilitar o cadastro dos operadores e das solicitações de acesso ao espaço aéreo. O cadastramento é realizado online, por pessoa física ou pessoa jurídica, e deverá fornecer as seguintes informações: nome completo, e-mail, telefone para contato, CPF e data de nascimento. Além disso, o usuário deverá enviar uma foto do documento (CPF ou RG) e aceitar os termos explicitados pelo órgão.

Após o cadastramento do operador, o próximo passo consiste no cadastramento da aeronave e posteriormente a solicitação para acesso ao espaço aéreo no sistema SARPAS. A solicitação é realizada em 4 etapas: escolha da aeronave, tipo de operação (levantamento), determinação do ponto de decolagem com o auxílio de imagens de satélites, e o preenchimento de um formulário com os dados da operação.

O voo deve ser realizado conforme as diretrizes dispostas pelo Ministério da Defesa. O documento expedido pelo Ministério da Defesa, Instituto do Comando da Aeronáutica (ICA), do DECEA, por meio do Circular ICA 100/40 (2020), dispõe sobre as diretrizes perante a legislação brasileira para a realização de voos com ARP para fins não recreativos.

- O Art. 114 da Lei nº 7.565, de 19 de dezembro de 1986 (Código Brasileiro de Aeronáutica (CBAer)), dispõe que nenhuma aeronave poderá ser autorizada para o voo sem a prévia expedição do correspondente Certificado de Aeronavegabilidade (CA), que só será válido durante o prazo estipulado.
- O art. 8º, XXXI da Lei nº 11.182, de 27 de setembro de 2005, dispõe que a competência para emissão de CA cabe à ANAC como autoridade de aviação civil.

No Brasil, os RPAS são classificados em três diferentes classes de acordo com o peso máximo de decolagem (PMD). As classificações, conforme o ICA 100/40, são apresentadas no Quadro 7, contendo as seguintes informações: Classes, PMD, e Exigências de Aeronavegabilidade. No Quadro 8, apresenta-se um resumo das regulamentações dos RPAS de acordo com as classes.

Quadro 7. Classes dos RPAS segundo o ICA 100/40 de 2020.

<b>Classe</b>	<b>PMD (kg)</b>	<b>Exigências de Aeronavegabilidade</b>
Classe 1	PMD > 150 kg	Regulamentação similar a aeronaves tripuladas, mas com ajustes dos requisitos de certificação conforme cada caso. Devem ser registrados no Registro Aeronáutico Brasileiro (RAB) e identificados com a respectiva marca de nacionalidade e matrícula.
Classe 2	25 kg > PMD ≥ 150 kg	Devem ser registrados no RAB e identificados com a respectiva marca de nacionalidade e matrícula.
Classe 3	PMD ≤ 25 kg	Plataformas dessa classe que operem em até 120m acima do solo e em linha de visada visual não precisarão de projetos autorizados pela ANAC, mas deverão ser cadastradas no sistema SISANT/ANAC.

Fonte: Adaptado de ANAC

Quadro 8. Resumo das regulamentações para RPAS.

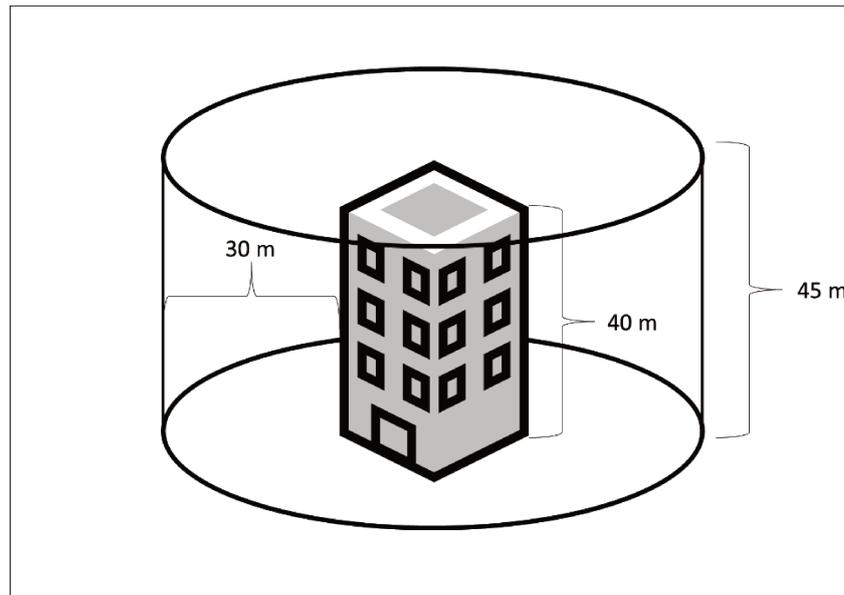
<b>Ação</b>	<b>Classe 1</b>	<b>Classe 2</b>	<b>Classe 3</b>
Registro da aeronave	Sim	Sim	Sim
Aprovação ou autorização do projeto	Sim	Sim	Apenas BVLOS ou acima de 120m
Idade mínima para operação	Sim	Sim	Sim
Certificado médico	Sim	Sim	Não
Licença e Habilitação	Sim	Sim	Apenas acima de 120 m
Local de Operação	Conforme o Princípio da sombra		

Fonte: Adaptado de ANAC

O princípio da sombra nada mais é que um volume no qual não é considerado, por parte do DECEA, como um espaço aéreo para aeronaves pilotadas. O volume de segurança (buffer) é considerado ao redor de um objeto (construções,

árvores, prédios, antenas, torres, etc.) com distâncias de 30m horizontal e 5m vertical. O princípio da sombra é ilustrado na Figura 11. A utilização de VANTs nesse volume necessita apenas de um pedido no SARPAS por não ser considerado um espaço aéreo

Figura 11. Princípio da Sombra.



Adaptado de ICA 100/40

O pedido para acesso ao espaço aéreo brasileiro deve ser realizado pelo Sistema SARPAS/DECEA e depende do tipo de aeronave e do tipo de levantamento a ser realizado, bem como as características da área a ser levantada.

As condicionantes operacionais específicas para operações de levantamento padrão e aerolevanteamento entre 30m a 120m de altura são descritas no ICA 100-40/2020 (BRASIL, 2020), sendo elas:

- Voar até 400ft AGL (*Above Ground Level*) (aproximadamente 120m de altura acima do nível do solo);
- Manter-se com velocidade igual ou inferior a 60 Knot (aproximadamente 120 Km/h);
- Manter-se, no mínimo, afastado 9Km de aeródromos cadastrados;
- Manter-se, no mínimo, afastado 3Km de helipontos cadastrados; e
- Manter-se, no mínimo, afastado 2Km de áreas nas quais sejam previstas operações ligadas à aviação agrícola.

As solicitações realizadas com base nestas condições foram analisadas pelo Órgão Regional responsável pelo espaço aéreo da região de Campinas/SP. As solicitações foram realizadas com antecedência de dois dias úteis em relação ao início da operação pretendida.

Neste trabalho, o tipo de levantamento definido foi o “levantamento convencional” (padrão). Este levantamento é relativo apenas a etapa de aquisição de imagens com um VANT e que não abrange a etapa de processamento.

Para a realização do voo em áreas de instituições públicas, como a UNICAMP, deve-se seguir as instruções dispostas no item 11.2.6.3 “sobrevoo de áreas de segurança” do Circular ICA 100/40 de 2020, onde é explicitado que: “As áreas de segurança, mesmo que não estejam protegidas por Espaços Aéreos Condicionados, não devem ser sobrevoadas sem a prévia autorização das autoridades responsáveis pela área envolvida”. O requerimento para acesso ao espaço aéreo foi realizado juntamente à Prefeitura do campus a priori do levantamento.

Outro documento importante que deve estar de posse do operador em comando no momento da execução do plano de voo é a Avaliação de Risco Operacional. Este documento é de extrema importância pois nele consta a avaliação das consequências de um acidente, em termos de probabilidade e severidade, tomando como referência o pior cenário previsível (BRASIL, 2018).

## **2.5.2 Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL)**

A Agência reguladora ANATEL, criada em 1997 por meio da Lei nº 9.472, possui a função de regular as telecomunicações. Essa organização inclui, entre outros aspectos, o disciplinamento e a fiscalização da execução, comercialização e uso dos serviços e da implantação e funcionamento de redes de telecomunicações, bem como da utilização dos recursos de órbita e espectro de radiofrequências.

Desta forma, o sistema de comunicação do Phantom 4, ou Enlace de Pilotagem (BRASIL, 2018), não necessita de licenças ou de qualquer outro tipo de autorização, devendo ser apenas certificada pelo órgão. O VANT DJI Phantom 4 já possui homologação no Brasil e deve ser realizada, pelo usuário, apenas a certificação do equipamento pelo sistema online da ANATEL.

## 3 MATERIAIS E MÉTODO

Este capítulo apresenta os materiais utilizados neste trabalho, bem como os métodos empregados para a geração e avaliação dos produtos cartográficos digitais.

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 *Hardware* utilizado para realização dos processamentos

A capacidade do *hardware* está diretamente relacionada ao tempo de processamento dos dados. Visando manter uma consistência, todos os processamentos foram realizados em uma mesma máquina, no Laboratório de Cartografia Digital (LCD) do InfrA.

- Desktop Intel®, com processador Core™ i7-3820 3,6Ghz, memória RAM de 16GB e 1TB em disco rígido, com placa de vídeo NVIDIA Quadro K600 e sistema operacional Windows 8.1.

#### 3.1.2 *Software*

O objetivo deste trabalho é avaliar os produtos cartográficos derivados dos processamentos fotogramétricos. Para isso, foram utilizados alguns *software* comerciais para a realização dos processamentos de dados topográficos, geodésicos e fotogramétricos, e também para a avaliação dos produtos gerados. O uso de tais *software* é possível por meio da licença estudantil obtida pela UNICAMP. A seguir são apresentados os *software* utilizados no desenvolvimento do presente trabalho.

- **TopconTools**

Neste trabalho, o TopconTools foi utilizado para a determinação das coordenadas dos pontos de apoio geodésico. O *software* comercial de análise e processamento de dados realiza, de forma automatizada, o processamento dos dados GNSS em modo relativo estático. Ao final do processamento é possível obter relatórios

de qualidade e exportar os resultados em arquivos de texto (.txt) com as coordenadas tridimensionais.

- **TopoEVN**

O *software* TopoEVN realiza, de forma automatizada, o cálculo das cadernetas de campo do levantamento topográfico. O *software* foi utilizado para a determinação das coordenadas dos pontos de controle a partir dos dados topográficos obtidos com a estação total. Ao final do processamento é possível obter relatórios de qualidade e exportar os resultados em arquivos de texto (.txt) com as coordenadas tridimensionais.

- **Agisoft Metashape**

O *software* comercial da Agisoft é um dos mais utilizados para a geração de produtos cartográficos digitais. O Metashape é versão atual do Agisoft PhotoScan. Este *software* realiza, de forma semi-automatizada algumas das etapas do processamento fotogramétrico, sendo elas: correspondência de imagens por meio de algoritmos de visão computação, calibração de câmara, fototriangulação, geração de nuvem de pontos georreferenciada e ortoimagens.

- **Trimble - Trimble Business Center (TBC)**

Este *software* comercial da Trimble possui diversas funções relacionadas ao processamento de dados geodésicos, topográficos e fotogramétricos. Neste trabalho, foi utilizada a extensão para a edição de nuvem de pontos 3D e a extensão para geração de superfícies. O input para as avaliações estatísticas dos MDTs é gerado por meio da extração das coordenadas altimétricas dos pontos de checagem a partir da superfície triangulada dos pontos que representam o nível do solo (terreno).

- **ArcGIS**

O *software* comercial da ESRI é um dos mais utilizados no mundo. Neste trabalho, o ArcGIS foi utilizado, basicamente, para a análise visual dos resultados e para extrair as coordenadas planimétricas dos pontos de checagem. As coordenadas planimétricas extraídas das ortoimagens são posteriormente utilizadas como input para as análises estatísticas de planimetria. Tal plataforma foi também utilizada para a geração dos mapas finais.

- **DroneDeploy**

O aplicativo livre DroneDeploy é destinado ao planejamento e execução de planos de voo com os VANTs da DJI. O planejamento do voo pode ser realizado via

*website* (online) ou por meio do aplicativo em um dispositivo móvel com sistema operacional Android ou IOS.

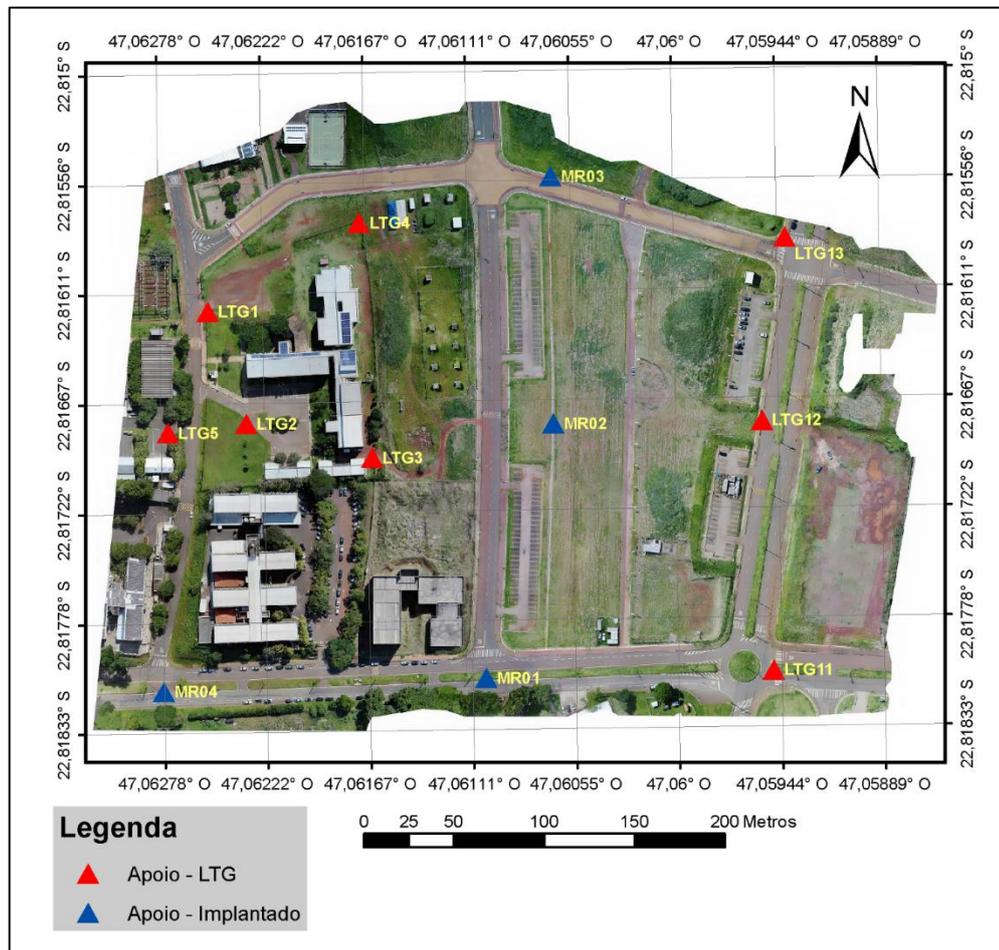
- **Microsoft Office Excel**

O aplicativo foi utilizado para a realização das análises estatísticas e posteriormente para a classificação PEC-PCD. As análises e a classificação do produto são baseadas nas coordenadas dos pontos de checagem, extraídos das ortomagens e dos MDTs, e as coordenadas de referência, obtidas via levantamento topográfico.

### 3.1.3 Conjunto de dados

Os dados a serem utilizados neste trabalho foram levantados no Campus de Barão Geraldo-UNICAMP, em Campinas – SP, em área anexa à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) ( $22^{\circ}48'57,44''S$   $47^{\circ}3'34,24''O$ ) (Figura 12).

Figura 12. Fotoíndice.



A escolha da área em estudo foi baseada na sua localização em relação ao Laboratório de Topografia e Geodésia (LTG). Buscou-se uma área em que não houvesse grandes esforços para a mobilização dos equipamentos e da equipe para materializar o apoio de campo, proporcionando uma redução no tempo para a realização dos levantamentos. A escolha da área baseou-se também nas restrições para o uso do espaço aéreo próximo à helipontos e aeroportos, conforme as especificações técnicas descritas no ICA 100/40 (BRASIL, 2020).

Uma das características principais da área, que favoreceu à escolha, foi o desnível relativamente grande dentro da área de interesse, de aproximadamente 34 m, o que facilitaria os experimentos, principalmente a questão de diferentes alturas de voo.

Os experimentos foram realizados a partir de 3 conjuntos de dados, sendo divididos em 2 seções, apoio de campo e imageamento aéreo. O apoio de campo engloba os dados do conjunto de dados 01 e 02. O conjunto de dados 01 contém as coordenadas tridimensionais dos marcos geodésicos cedidos pelo LTG (Apoio – LTG na Figura 12), o conjunto de dados 02 contém as coordenadas tridimensionais dos pontos de apoios geodésico obtidos via posicionamento relativo estático rápido (Apoio – Implantado na Figura 12) e as coordenadas tridimensionais dos pontos de controle e checagem obtidas por meio de técnica convencional de levantamento com o uso da estação total (Figura 16). O conjunto de dados 03 engloba os dados do imageamento aéreo, sendo eles: as imagens aéreas obtidas com o VANT Phantom 4, as informações sobre a geometria da câmara e os POE aproximados da plataforma. A seguir são apresentadas as descrições detalhadas dos conjuntos de dados.

### 3.1.3.1 Apoio de campo

- **Conjunto de dados 01**

Os dados descritos neste conjunto foram cedidos pelo Laboratório de Topografia e Geodésia (LTG) da UNICAMP. Foram levantados 8 pontos de apoio geodésico via técnica de posicionamento relativo estático com receptores GNSS Topcon Hyper/Hyper Lite+. O processamento das coordenadas foi realizado com o *software* TopconTools a partir dos dados da estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) SPC1, localizada no topo do

prédio do LTG e com linha de base menor que 1 km. As coordenadas utilizadas foram determinadas na projeção UTM (*Universal Transverse Mercator*), no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000), Zona 23 Sul, meridiano - 45 (Apêndice A).

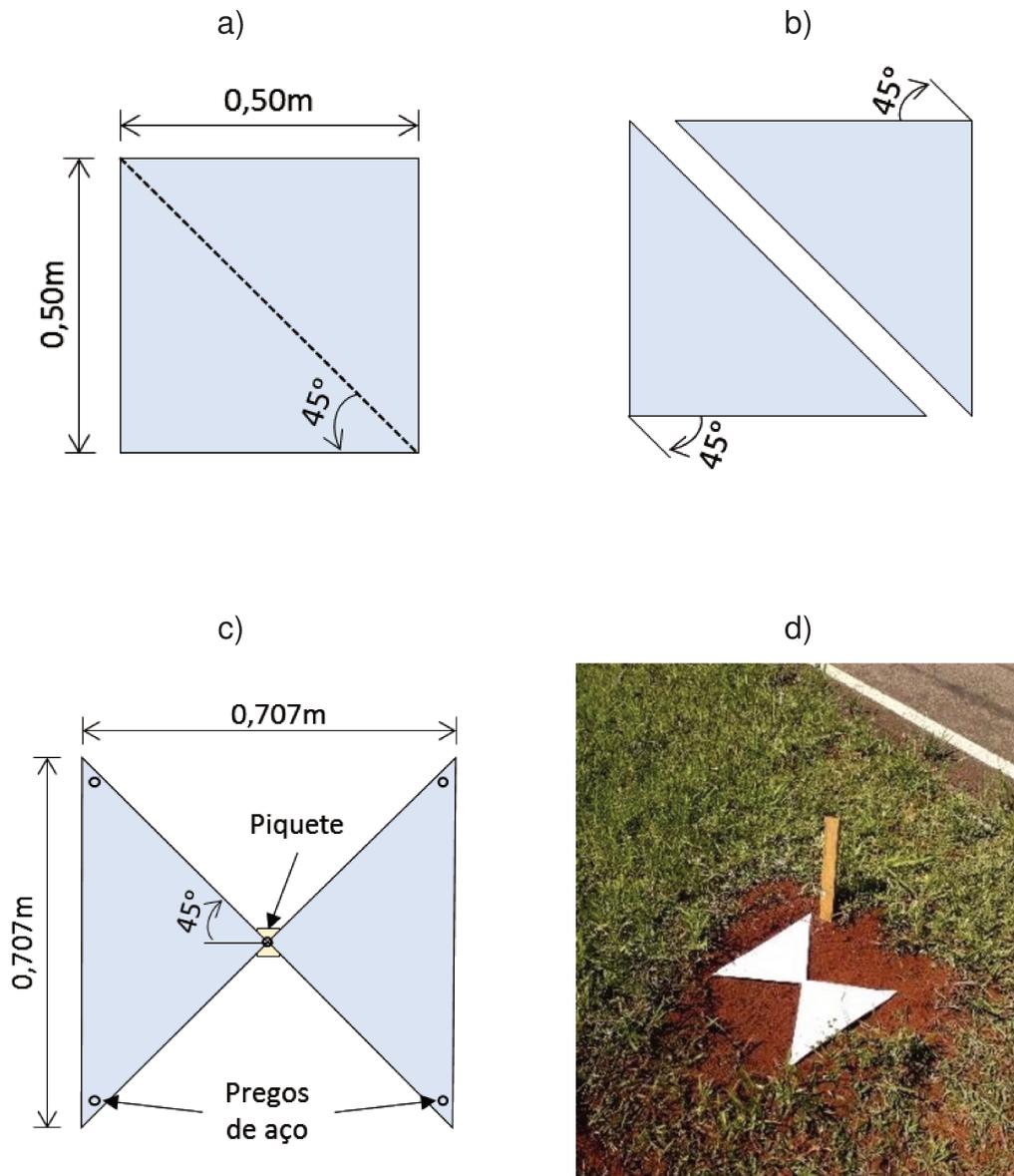
- **Conjunto de dados 02**

Os dados descritos neste conjunto foram obtidos em duas etapas, na primeira etapa foi aplicado o método de posicionamento relativo estático rápido e na segunda etapa foi aplicada a técnica de irradiação topográfica (com leituras conjugadas). A primeira etapa foi realizada com receptores GNSS Hyper/HyperLite+ e teve como objetivo a materialização de 4 novos marcos geodésicos (Apêndice B) para servir de apoio ao levantamento topográfico, assim como os marcos já conhecidos. O processamento das coordenadas foi realizado com o *software* TopconTools a partir dos dados da estação RBMC SPC1.

A segunda etapa foi realizada com o objetivo de determinar a posição dos pontos de controle e checagem do aerolevanteamento por meio da técnica de irradiação com o uso da estação total a partir dos marcos de apoio do conjunto de dados 01 e 02. O desvio-padrão das observações são de  $\pm 0,006\text{m}$  e  $\pm 0,008\text{m}$ , para planimetria e para altimetria, respectivamente.

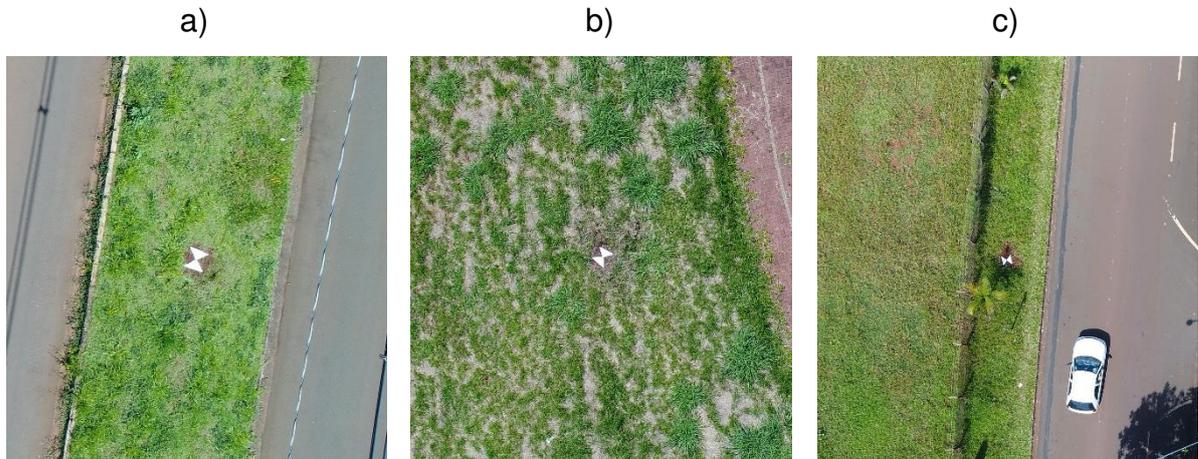
Antes da execução dos voos, foram instalados em campo alvos sobre cada ponto levantado com a estação total (voo pré-apoiado). O processo para confecção do alvo é simples: deve-se cortar uma cartolina branca de dimensões 0,5m x 0,5m (Figura 13a) com angulação de  $45^\circ$  e rotacionar as pontas  $45^\circ$  no sentido horário (Figura 13b), resultando em dois triângulos semelhantes cujas pontas são fixadas no centro do piquete (Figura 13c). Foram utilizados 4 pregos de aço 17x27mm para fixar as pontas das cartolinas no solo e um prego de aço 8x8mm para fixar as duas pontas das cartolinas no centro do piquete (Figura 13d). O objetivo foi facilitar a fotoidentificação manual dos alvos no *software* e reduzir o erro posicional inserido pelo operador.

Figura 13. Confeção dos alvos de cartolina. a) Dimensão do alvo. b) Corte em triângulos. c) Disposição final dos alvos. d) Representação dos alvos.



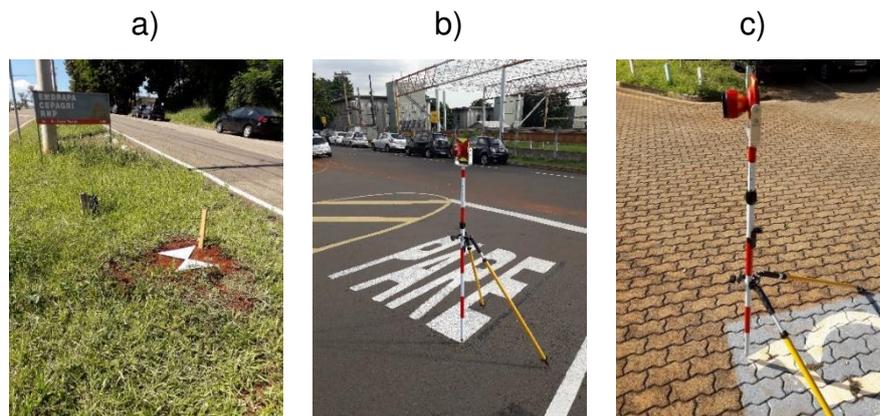
Como resultado dessa confecção, pode-se confirmar visualmente a resolução dos alvos a 21m (Figura 14a), a 31m (Figura 14b), e a 40m de altura acima do nível do solo (Figura 14c).

Figura 14. Resolução dos alvos a diferentes alturas de voo. a) 21m. b) 31m. c) 40m.



A materialização dos alvos foi uma das etapas que consumiram maior tempo, visto que foi necessária a retirada de uma parcela da camada de vegetação com dimensões aproximadas de 0,90m x 0,90m para implantação do piquete no solo e para fixar os alvos com pregos de aço (Figura 15a). Visando reduzir o tempo e facilitar a implantação dos alvos, utilizou-se da sinalização horizontal existente das vias (Figura 15b) e do estacionamento (Figura 15c) como pontos de referência.

Figura 15. Materialização dos alvos. a) Alvo implantado. b) Sinalização horizontal das vias. d) Sinalização horizontal do estacionamento.

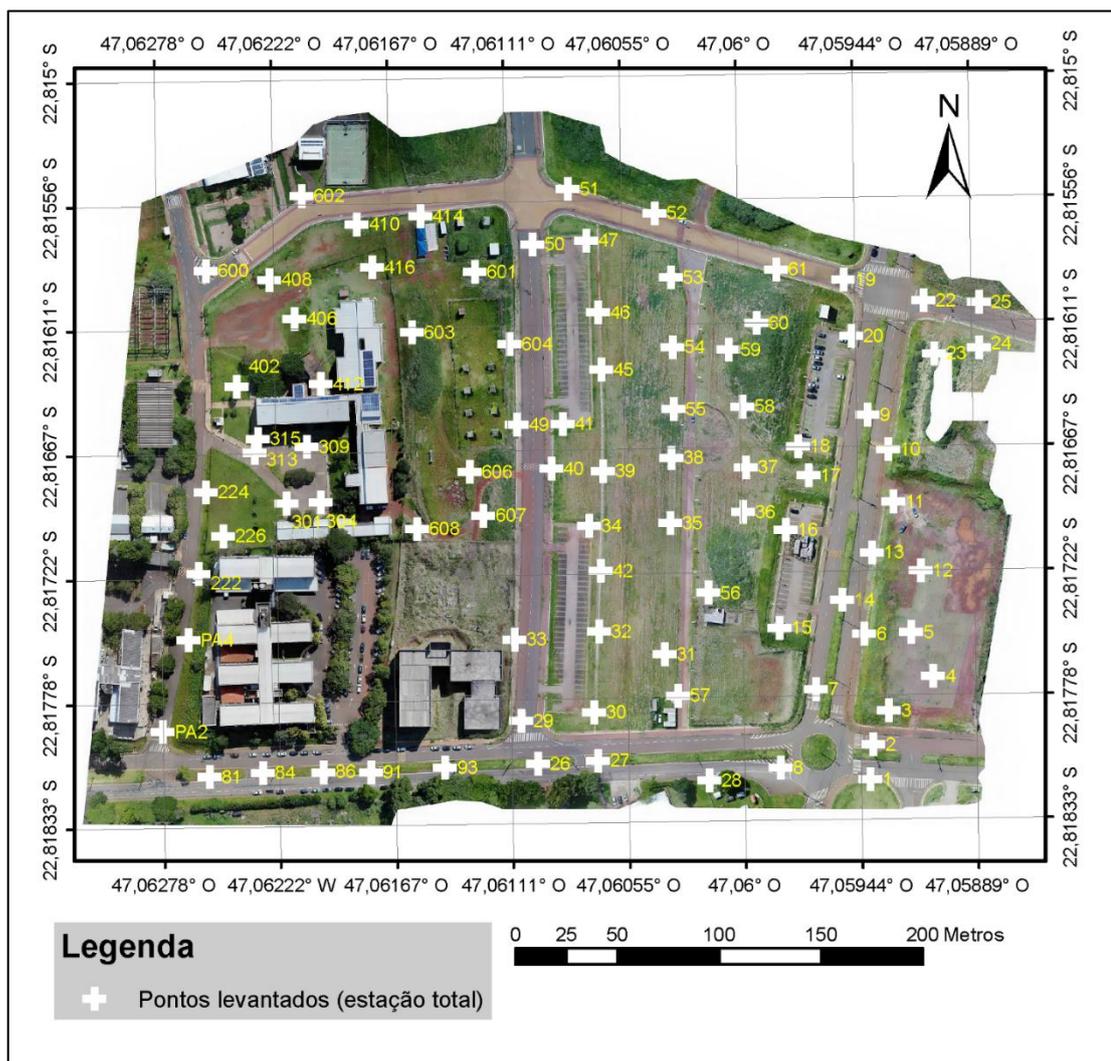


Após a implantação dos alvos, foi utilizada a estação total Nikon Nivo 5C para realizar o levantamento topográfico, resultando em 89 pontos bem distribuídos. O levantamento foi realizado com leituras conjugadas com o objetivo de eliminar possíveis erros sistemáticos oriundos do equipamento. Para realização desse tipo de levantamento é necessária a realização de leituras diretas (PD), e logo em seguida

inverte-se a luneta para a realização de leituras inversas (PI) do ponto ré e do ponto de interesse (irradiação).

Para a determinação das coordenadas são necessários os seguintes dados: azimute inicial, ângulos horizontais e verticais, e a distância inclinada. O azimute inicial foi obtido a partir da diferença entre as coordenadas dos pontos de apoio, e as medições de ângulos e distâncias foram obtidas com a estação total. Após a determinação das coordenadas, realizou-se uma média das observações para um mesmo ponto, resultando em 89 pontos bem distribuídos pela área em estudo (Figura 16). O Apêndice C, apresenta as coordenadas dos pontos levantados, e que posteriormente serão usados como pontos de controle ou pontos de checagem, no sistema de coordenadas UTM, SIRGAS 2000, Zona 23S, meridiano -45.

Figura 16. Localização dos pontos levantados.



### 3.1.3.2 Imageamento aéreo

- Conjunto de dados 3

Os dados descritos neste conjunto foram obtidos com o VANT DJI Phantom 4 *Advanced* (Figura 17). O VANT de baixo custo possui 4 hélices, sua massa é de aproximadamente 1,38kg e é equipado com um sistema de navegação GNSS e orientação IMU. Para o imageamento, o VANT possui uma câmara digital compacta não-métrica FC6310 acoplada ao *gimball* na parte inferior da sua estrutura. As informações referentes ao sensor digital são apresentadas no Quadro 9.

Figura 17. VANT DJI Phantom 4 Advanced.



Quadro 9. Especificações da câmara utilizada no conjunto de dados 3.

Distância focal (mm)	8,80
Tamanho do pixel ( $\mu\text{m}$ )	2,63 x 2,63
Tamanho do sensor em coluna e linha (pixel)	4864 x 3648
Tamanho do sensor (mm)	12,80 x 9,60
Deslocamento do ponto principal (mm)	6,40 x 3,80

Neste trabalho, a estação de controle no solo é composta pelo VANT Phantom 4 *Advanced* e pela aplicação online DroneDeploy, operado por meio de um dispositivo móvel com sistema operacional Android.

A comunicação entre os dispositivos é realizada por meio de conexão sem fio, a uma frequência de 2,4Ghz. No Brasil, não são necessárias licenças ou permissões para o uso dessa faixa de frequência, porém, o equipamento deve ser homologado pela ANATEL.

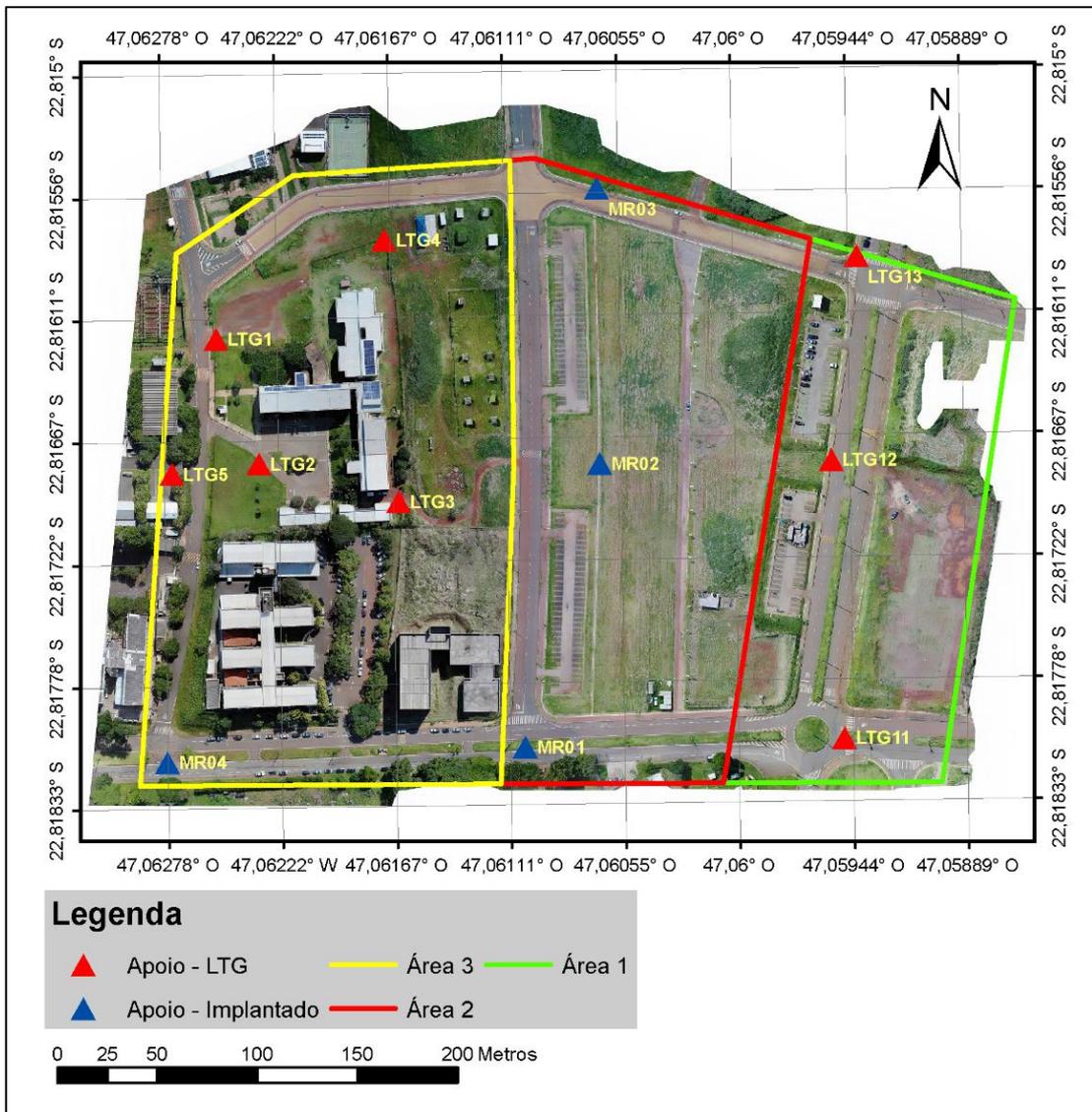
O sistema de orientação e o sistema de navegação são usados como auxílio para a realização do voo projetado, além disso, fornecem dados para o piloto automático do VANT ajustar o trajeto e a velocidade da aeronave.

As imagens obtidas com o VANT são armazenadas em formato *Joint Photographic Experts Group* (JPEG) e anexado à sua base de dados, também conhecida por *Exchangeable Image File Format* (EXIF), são registradas, em forma de metadados, as informações referentes ao sensor e a plataforma no momento da tomada da imagem.

Os metadados contêm os dados estimados sobre o momento da tomada da imagem, tais como: os POE aproximados, a distância focal nominal e as dimensões do sensor. Vale destacar que esses dados são utilizados apenas como uma aproximação inicial e que a sua aplicação visa simplificar o processo de correspondência de imagens, resultando na diminuição do esforço computacional, e conseqüentemente, no tempo de processamento.

O planejamento do levantamento aerofotogramétrico considerou a autonomia da bateria e os experimentos a serem realizados. Visando facilitar a aquisição e o processamento dos dados, a área em estudo foi dividida em três áreas menores (polígonos vermelho, amarelo e verde) (Figura 18).

Figura 18. Divisão da área em estudo.

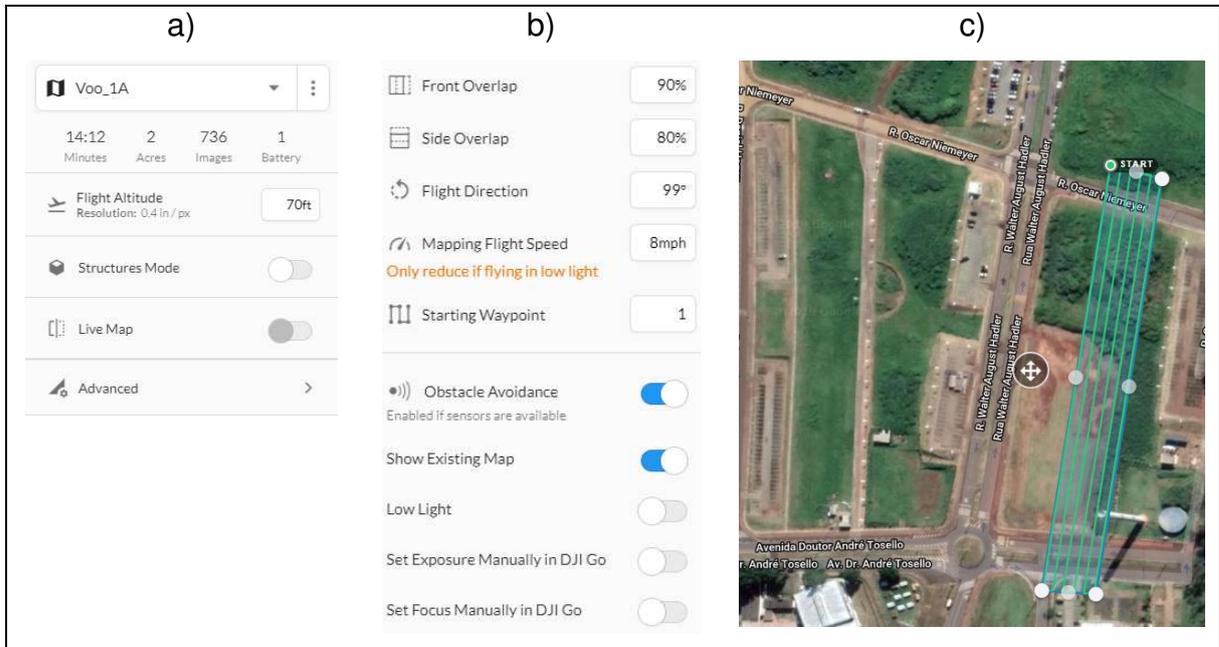


Para a obtenção dos dados fotogramétricos utilizou-se as ferramentas de planejamento e execução das missões da aplicação DroneDeploy. O banco de dados do aplicativo possui dados sobre as características do Phantom 4, sendo eles: o tamanho do pixel, as características do sensor digital (distância focal e tamanho do sensor) e a autonomia da bateria, o que auxilia no planejamento do voo.

A ferramenta de planejamento (Figura 19a e Figura 19b) auxilia, a partir de uma imagem de satélite (Figura 19c), a definição de todos os parâmetros para a realização do voo, sendo eles: delimitação da área em estudo, altura de voo ou resolução espacial aproximada, taxas de recobrimento das imagens (lateral e longitudinal), sentido das faixas de voo, a velocidade da aeronave, o ponto inicial da

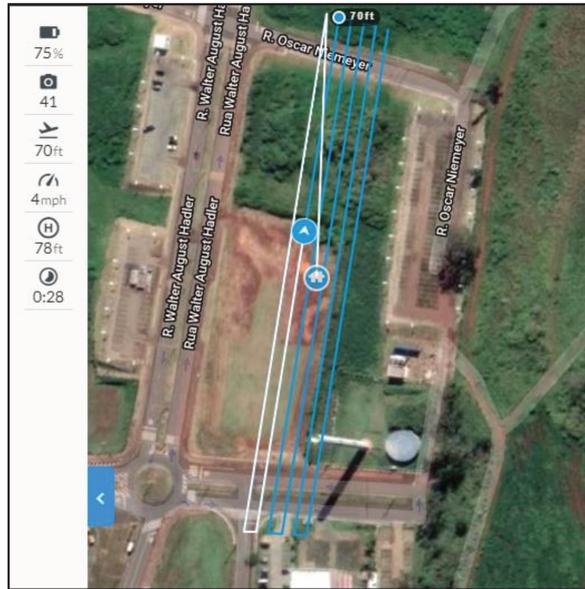
missão, ativação do sensor de obstáculos e opções de exposição e foco do sensor digital.

Figura 19. Interface da aplicação DroneDeploy com a ferramenta de planejamento da missão.



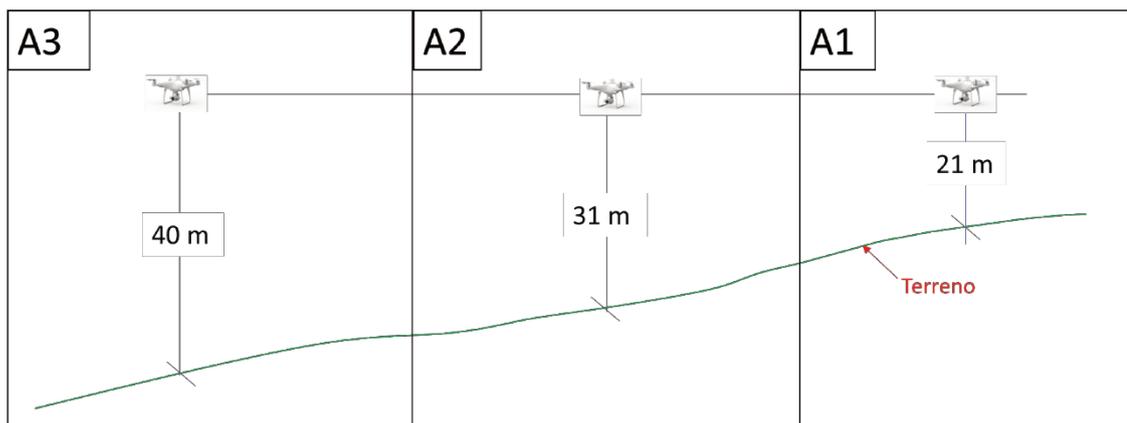
Após a configuração da missão, a aplicação estima a duração do levantamento, o número de imagens a serem registradas e a quantidade de baterias necessárias para a realização segura do voo. A aplicação fornece, em tempo real, informações como: a autonomia da bateria, a quantidades de imagens registradas, a altura de voo, a velocidade da plataforma, a distância entre a plataforma e o ponto de decolagem e o tempo de voo (Figura 20). Tais informações são de vital importância para tomadas de decisão por parte do operador frente a situações adversas, como uma possível falha do sistema ou fatores externos.

Figura 20. Interface da aplicação DroneDeploy para a realização do levantamento.



Ao total, foram realizados 9 planos de voo a uma altura constante de 21m a partir do ponto mais alto ao leste da Área 1, o que permite a análise de diferentes alturas de voo para os experimentos. Para melhor entendimento das alturas de voo média em cada área, foi confeccionada a (Figura 21).

Figura 21. Alturas de voo.



Como resultado, foram obtidas 4627 imagens em aproximadamente 2h24 de voo. Os voos das áreas 1, 2 e 3 foram realizados nos dias 10/04, 11/04 e 18/04 de 2019, respectivamente, entre o período das 10h30 às 13h00.

A escolha do horário para a obtenção das imagens foi baseada no alto contraste dos alvos com a superfície terrestre e na redução de sombras projetadas pelas edificações, árvores, postes, etc. A justificativa para a escolha do horário buscou

atender as recomendações de Vosseman *et al.* (2004), em que as aquisições das imagens devem ser realizadas sob as mesmas características de refletância, iluminação e contraste. As informações sobre as configurações de aquisição das imagens são apresentadas no Quadro 10.

Quadro 10. Informações sobre as aquisições das imagens por voo.

Área	Voo	Imagens	Tempo de voo (min)	Recob. (%)		Altura de voo		GSD aproximado (cm)				
				Long.	Lat.	(ft)	(m)					
1	1A	613	14	90	80	70	21	0,63				
	1B	406	15									
	1C	998	20									
2	2A	498	16			90	80	100	31	0,93		
	2B	455	17									
	2C	382	13									
3	3A	431	17					90	80	130	40	1,19
	3B	408	15									
	3C	418	17									

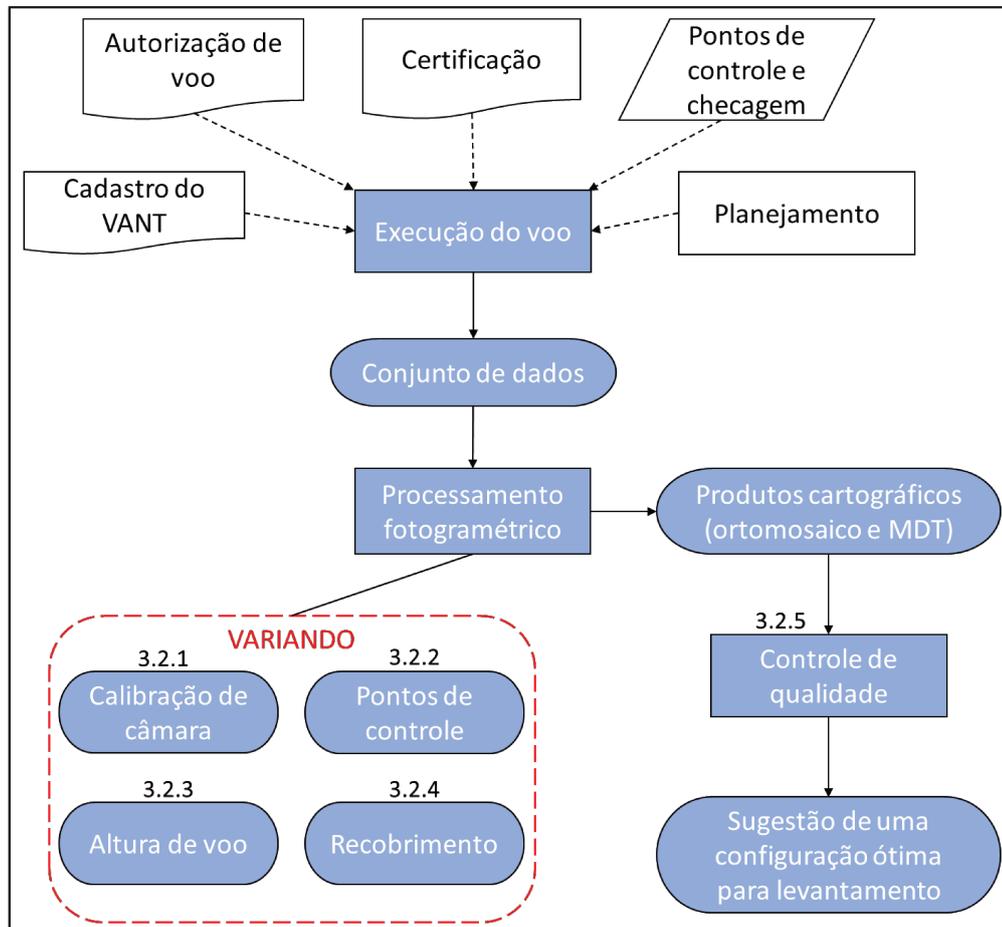
O Quadro 10 apresenta as seguintes informações: a área levantada, a missão realizada, o número de imagens obtidas, o tempo de voo em minutos, a taxa de recobrimento lateral e longitudinal das imagens, a altura de voo em pés e em metros, e a resolução espacial aproximada (*Ground Sample Distance* - GSD). Uma das limitações de VANTs, como o Phantom 4, é a autonomia de voo. Neste caso, constatou-se, levando em conta a segurança quanto a falta de bateria, uma autonomia aproximada de 17 minutos. É possível a realização de voos mais longos, como o voo 1C de 20 minutos, porém, vale ressaltar que neste voo o clima estava favorável, sem ventos fortes e outras interferências, o que reduziu o consumo de bateria.

Após a etapa de coleta das imagens foi realizada a primeira análise visual dos dados. Nessa etapa foram extraídas as imagens de início e fim dos levantamentos, que são registradas automaticamente pelo sistema, e as imagens que não possuem qualidade visual coerente, como o arrastamento e a falta de luminosidade, ao total, 18 imagens foram excluídas.

### 3.2 Método

Neste trabalho, a rotina para o processamento de dados fotogramétricos por meio de *software* comercial foi utilizada para a geração de ortoimagens, MDEs e MDTs. A qualidade dos produtos será mensurada a partir das análises estatísticas das coordenadas dos pontos de checagem. O método proposto para a geração de uma configuração ideal de processamento para obtenção de produtos PEC-PCD Classe A é dividida em 4 etapas (Figura 22): (1) aquisição dos conjuntos de dados, (2) processamento fotogramétrico utilizando diferentes configurações em relação à calibração de câmara, pontos de controle, altura de voo e recobrimento de imagens, (3) avaliação da qualidade dos produtos cartográficos, e (4) sugestão de uma configuração ótima utilizando uma combinação dos melhores resultados obtidos para cada parâmetro de processamento.

Figura 22. Fluxograma das atividades.



Na primeira etapa, para a materialização dos conjuntos de dados, realizou-se a certificação do VANT, o cadastro do piloto, e o cadastro do VANT. A seguir, foi realizado o planejamento da aquisição dos dados topográficos e fotogramétricos para posteriormente solicitar o acesso ao espaço aéreo brasileiro por meio do sistema SARPAS/DECEA e pela UNICAMP. Foram definidas a geometria de aquisição (área a ser imageada, altura de voo e sobreposição) e a localização do ponto de decolagem e pouso, respeitando a autonomia da bateria, a distância de visibilidade e demais regulamentações do Circular ICA/100-40 (2018). O tempo de espera para a aprovação da solicitação depende das características do voo e da plataforma, neste caso, o tempo de espera foi de 48h para o VANT Classe 3, com distância de visibilidade inferior a 200 m entre a estação de controle em solo e a plataforma, o que permitiu o acompanhamento visual da aeronave sem a necessidade de dispositivos auxiliares ou observadores em solo.

Após concedida a autorização de acesso ao espaço aéreo, procedeu-se a etapa de levantamento topográfico, onde foram sinalizados e levantados 89 pontos – a serem utilizados como controle e checagem, utilizando uma estação total a partir de 12 pontos de apoio geodésico obtidos com receptores GNSS (apresentados na seção anterior).

Procedendo para a etapa de aquisição, 4609 imagens, com taxas de recobrimento de 90%/80% e GSD aproximado variando entre 0,63 cm a 1,19 cm, foram obtidas com o VANT Phantom 4 Advanced a uma altura de 21 m (a partir do ponto mais alto ao leste da Área 1 (Figura 18)).

A segunda etapa é relativa ao processamento fotogramétrico utilizando o *software* Agisoft Metashape sob diferentes configurações de calibração de câmara, pontos de controle, altura de voo e recobrimento. O processamento seguiu o fluxograma convencional para a geração da nuvem de pontos georreferenciada, MDS, MDT e ortoimagem, e foi executado em 4 etapas:

Antes das principais etapas, as imagens com os respectivos POE e as coordenadas dos pontos de controle foram importadas para o *software*. Os POE extraídos dos EXIF são utilizados apenas como aproximações iniciais, uma vez que os mesmos são de baixa precisão (desvio de 30m para X, Y e Z, e 10º para os ângulos de Euler). Os pontos de controle foram identificados nas imagens de forma manual e um projeto modelo foi salvo para ser utilizado nos processamentos. Essa abordagem foi utilizada para evitar a inserção de erros por parte do operador e para manter os

mesmos desvios das fotocoordenadas. Para efeitos de informação, os erros de reprojeção na identificação dos pontos de controle nas imagens não são superiores à 0,6 pixel.

(1) alinhamento das câmaras: nesta etapa são estimados os POE e POI a partir da extração de *tie-points* das imagens, no qual são comparados com os *tie-points* extraídos das demais imagens, e também utilizando os pontos de controle tridimensionais. Como parâmetros adicionais, os POI, foram inseridos os seguintes parâmetros: distância focal, deslocamento do ponto principal, distorção radial simétrica e descentrada. O parâmetro para alinhamento foi selecionado em “médio”. Nessa etapa, a opção “*pair preselection*” reduz o esforço computacional no processo de correspondência, uma vez que o processo se dará baseado nos POE aproximados das imagens adjacentes. Após executar a fototriangulação, são obtidos os POE e POI e as coordenadas 3D dos *tie points* (nuvem de pontos esparsa).

(2) o segundo passo é a geração da nuvem de pontos densa computando um mapa de profundidade para cada imagem, e posteriormente, mesclar os mapas de profundidade em um mesmo sistema de referência. O parâmetro para a densificação da nuvem de pontos foi definido como “médio”. O parâmetro “médio” foi escolhido devido à grande quantidade de imagens obtidas em cada um dos *subplots*. A utilização do parâmetro “*high*” ou “*ultra-high*” resultariam em um tempo de processamento muito maior pois estes consideram melhores resoluções da imagem. A nuvem de pontos resultante será utilizada como dado de entrada para a geração do MDE e MDT.

A nuvem de pontos resultante é submetida a uma avaliação visual, na qual tem-se como objetivo identificar pontos que não foram bem reconstruídos devido a possíveis falhas nos algoritmos de correspondência de imagens, como em planos de telhado e/ou superfícies homogêneas. Identificou-se que nenhuma das nuvens de ponto necessitou de edição manual.

Para a geração do MDT, a nuvem de pontos georeferenciada é importada para o *software* TBC. A partir disto, utiliza-se as ferramentas para edição e classificação de nuvem de pontos para classificar, de forma automática, apenas os pontos que representam o terreno. Após a classificação, a nuvem de pontos é submetida à um processo de filtragem dos pontos de terreno. Por meio da extensão de edição e geração de superfícies, gera-se uma malha triangular entre os pontos vizinhos, na qual o resultado é uma superfície MDT. Uma alternativa para o tratamento

da nuvem de pontos e geração da superfície, é a utilização de ferramentas biblioteca LASTools (ISENBURG, 2020).

(3) o resultado da reconstrução do MDE é utilizado como dado de entrada para a geração da ortoimagem georeferenciada. As resoluções dos MDEs para as alturas de 21m, 31m e 40m, são respectivamente, 0,02m, 0,03m e 0,04m.

(4) Finalmente, a ortoimagem é gerada e exportada com 2,0cm de resolução espacial. Essa escolha teve como objetivo padronizar a avaliação planimétrica em detrimento da resolução.

O método proposto visa investigar uma configuração ótima para a geração de produtos com alta precisão, conforme a legislação brasileira. Os melhores resultados das análises, referentes a qualidade posicional dos produtos – segundo o PEC-PCD, serão utilizados para compor uma sugestão para mapeamento aéreo utilizando o VANT Phantom 4.

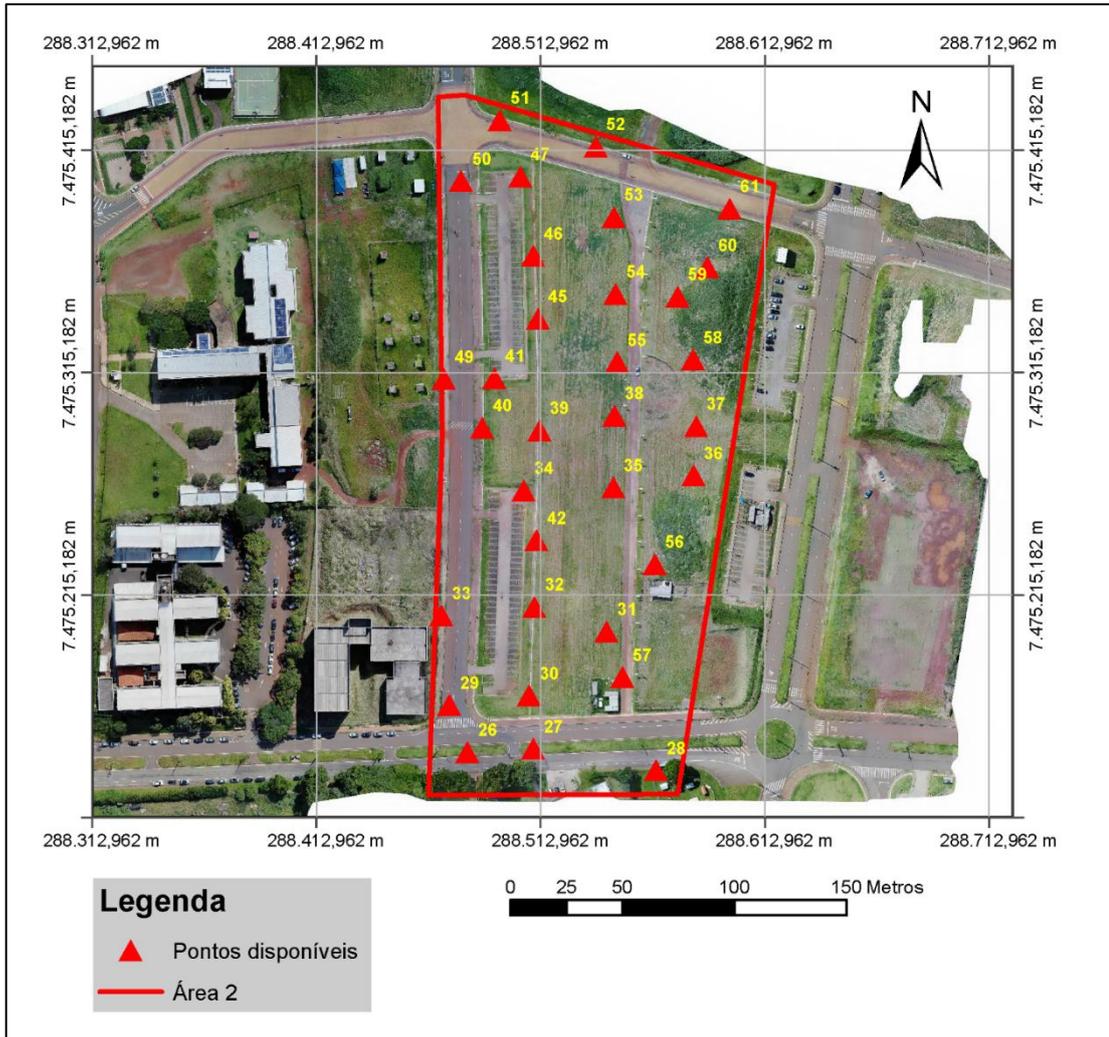
### **3.2.1 Calibração de câmara**

Esta etapa tem como objetivo avaliar os POI na fototriangulação obtidos a partir da inserção desses parâmetros como fixos e também realizando a calibração em serviço. Essas abordagens são realizadas da seguinte maneira: (1) serão realizados processamentos utilizando-se do método de calibração em serviço a partir dos dados disponíveis (pontos de controle no solo, as imagens e seus respectivos POE) para um determinado experimento; e (2) serão realizados processamentos nos quais a fototriangulação será realizada apenas para ajustar os POE (georeferenciamento indireto), neste caso, os POI serão pré-determinados e inseridos como “parâmetros pré-determinados” ou “fixos” na fototriangulação.

A primeira abordagem considera a calibração em serviço, sendo os POI desconhecidos e os POE inseridos como parâmetros iniciais aproximados (extraídos do EXIF).

A segunda abordagem é realizar a calibração em serviço (fototriangulação com parâmetros adicionais) utilizando os dados disponíveis da Área 2 (Figura 23). Os POI resultantes serão aplicados como parâmetros fixos nos próximos experimentos e os POE serão considerados como aproximados (extraídos do EXIF). O processamento foi realizado com 23 pontos de apoio.

Figura 23. Dados da área 2.



Nesta etapa de calibração da câmara para determinação dos POI, serão considerados os seguintes coeficientes:  $f$  é distância focal calibrada em mm, deslocamento do ponto principal em mm ( $c_x$  e  $c_y$ ), os coeficientes de distorção radial simétrica ( $k_1$ ,  $k_2$ , e  $k_3$ ) e os coeficiente distorção descentrada ( $p_1$  e  $p_2$ ).

A partir deste momento, os experimentos realizados com a calibração (1) serão denominados como “Calibração em serviço” e (2) serão denominados “Fototriangulação com POI pré-calibrados (fixos)”. Os próximos estudos serão realizados com os dois métodos de calibração e uma comparação será apresentada. O objetivo é comparar a inserção de POI pré-calibrados como fixos na fototriangulação em relação a calibração em serviço utilizando os dados obtidos com o VANT e dos pontos de controle no solo. A qualidade dessas abordagens é mensurada a partir da análise estatística dos demais experimentos.

### **3.2.2 Variação do número de pontos de controle**

Esta etapa tem como objetivo analisar a influência da utilização de diferentes números de pontos de controle no resultado final. Esse estudo se faz necessário pois estes pontos são essenciais para o georeferenciamento indireto das imagens e também para a modelagem dos erros sistemáticos oriundos do conjunto de lentes – se a calibração em serviço for considerada. Desta forma, foram realizados 12 diferentes processamentos sob diferentes configurações de pontos de controle (variando-se em número) e considerando a influência dos POI (calibração em serviço versus inserção dos POI pré-calibrados).

Os processamentos foram realizados com os dados da Área 2 a altas taxas de recobrimento de 90%/80%. Os pontos de controle no solo foram escolhidos em função da sua posição em relação a área de estudo e aos demais, visando manter uma distância homogênea para que sejam evitadas áreas com concentração de pontos. A definição dos pontos de checagem foi baseada nos pontos não utilizados como apoio, sendo escolhidos de forma aleatória. Para a padronização do controle de qualidade dos resultados, utilizou-se os mesmos 22 pontos de checagem.

### **3.2.3 Variação da altura de voo**

Este experimento tem como objetivo analisar a influência de diferentes alturas de voo da plataforma aérea para a aquisição das imagens na qualidade dos produtos gerados. Para essa análise, foram utilizadas as imagens obtidas às alturas de voo de 21m (Área 1), 31m (Área 2) e 40m (Área 3). Essa análise foi possível devido ao relevo do terreno ao longo da área em estudo, o que proporcionou a aquisição em diferentes alturas – a partir de altura fixa ao leste na área em estudo. No total, foram realizados 6 diferentes processamentos utilizando a diferentes alturas de voo (21m, 31m e 40m) considerando a influência dos POI (calibração em serviço vs inserção dos POI pré-calibrados como parâmetros fixos).

### 3.2.4 Variação da taxa de recobrimento das imagens

Esta etapa tem como objetivo avaliar a qualidade dos resultados sob diferentes configurações de taxas de recobrimento de imagens. A taxa de recobrimento é referente a área sobreposta entre 2 imagens, o que possibilita a extração de *tie points*. Além da quantidade de *tie points* gerados, analisou-se também o tempo de processamento, a quantidade de elementos gerados na nuvem de pontos e a qualidade das ortoimagens.

Neste contexto, foi realizado um voo a taxas de recobrimento de 90%/80% (longitudinal e lateral, respectivamente) a 31m de altura (Área 2). A partir deste voo inicial, realizou-se uma redução das taxas de recobrimento no ambiente virtual de forma manual, extraindo-se imagens consecutivas das linhas de voo. Em relação ao recobrimento longitudinal, extraiu-se uma imagem da linha de voo, reduzindo em 10% a taxa – de 90% para 80%. Em relação ao recobrimento lateral, o mesmo processo reduz em 20% a taxa de cobertura – de 80% para 60%. Esse procedimento foi repetido até serem alcançadas taxas de recobrimento de 60%/40% (longitudinal e lateral, respectivamente). Além disso, considerou-se a influência dos POI (calibração em serviço vs inserção dos POI pré-calibrados como parâmetros fixos).

### 3.2.5 Controle de qualidade

Esta etapa correspondeu a aplicação de testes estatísticos em amostras extraídas dos produtos cartográficos digitais (ortoimagens e MDTs) gerados à diferentes configurações - apresentados nas etapas anteriores e comparadas aos pontos de checagem de melhor precisão. Tais amostras foram submetidas ao PEC-PCD, além de análise de dispersão REMQ. Para a realização do controle de qualidade, foi gerado, primeiramente, os conjuntos de dados de referência – descritos na Seção 3.1.

Segundo, foi feita a análise das componentes X e Y a partir das ortoimagens. Para isso, a ortomagem gerada a diferentes configurações foi importada para o *software* ArcGIS e criou-se uma camada (*layer*) de pontos no formato shapefile. O próximo passo foi a identificação de cada um dos alvos que representam um determinado ponto de checagem e então atribuiu-se um novo ponto no centro de cada

um dos alvos. Após essa etapa, foi possível obter um arquivo de texto com o nome do ponto e as respectivas coordenadas X e Y.

Para a análise dos MDTs, foram importadas as coordenadas X e Y de cada um dos pontos de checagem em arquivo de texto para o *software* TBC. A partir da transformação desses pontos para a um ponto com coordenadas planimétricas, interpolou-se do MDT a coordenada Z para cada ponto. Após essa etapa, foi possível obter um arquivo de texto com o nome do ponto, as coordenadas X, Y e Z.

É válido salientar que cada experimento possui os seus respectivos pontos de controle e pontos de checagem.

A qualidade dos produtos é avaliada por meio da análise estatística quando são comparadas as coordenadas de referência, obtidas por método de levantamento convencional de melhor precisão, e as observações dos mesmos pontos, extraídas das ortoimagens e MDTs.

Para isso, foram calculados os valores das diferenças, de média e desvio padrão em função do tamanho da amostra extraída. Com esses dados, aplicou-se os testes de tendência t-student, o teste de hipóteses para os valores do qui-quadrado e a análise estatística REMQ. O teste de tendência tem como objetivo a identificação de erros sistemáticos no conjunto de dados gerado. O teste do qui-quadrado tem como objetivo verificar a precisão dos pontos extraídos em relação aos pontos de referência. O teste de dispersão REMQ é uma medida geral de qualidade de um conjunto de dados.

Por fim, após as análises estatísticas, classifica-se os produtos em classes e escalas de acordo com a precisão obtida e a 90% dos pontos cuja diferença é menor que o EP para determinada classe/escala conforme o PEC-PCD da ET-ADGV.

A seguir, no Quadro 11 é apresentado um resumo dos experimentos realizados, com as seguintes informações: experimento realizado, a área na qual os experimentos foram realizados, a quantidade de pontos de controle e de pontos de checagem em cada processamento, a configuração de processamento (tipo de calibração e recobrimento longitudinal e lateral, respectivamente), e a quantidade de processamentos realizados.

Quadro 11. Informações sobre os experimentos realizados.

<b>Experimento</b>	<b>Área</b>	<b>Controle / checagem</b>	<b>Configuração</b>	<b>Total</b>
Calibração de câmara	Área 2	23 / 0	Calibração em serviço, Recobrimento de 90%/80%	1
Pontos de Controle	Área 2	0, 3, 4, 5, 8, 10 / 22	Calibração em serviço / POI pré-calibrados (fixo). Recobrimento de 90%/80%	12
Altura de Voo	Área 1 Área 2 Área 3	8 / 16	Calibração em serviço / POI pré-calibrados (fixo). Recobrimento de 90%/80%	6
Recobrimento	Área 2	Calibração em serviço 8 / 22  POI pré- calibrados 5 / 22	Calibração em serviço / POI pré-calibrados (fixo). Recobrimento de: 90%/80%, 80%/60%, 70%/60% 70%/40% 60%/60% 60%/40%	12

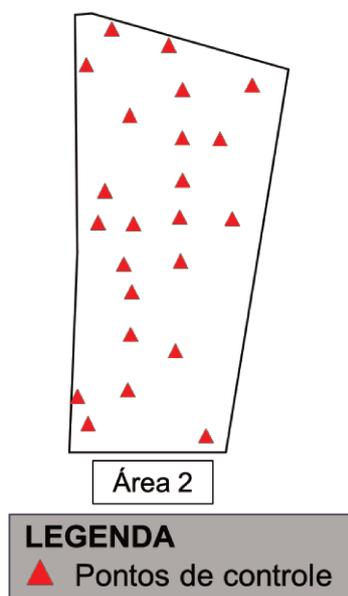
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este trabalho apresenta como métrica o controle de qualidade dos dados digitais por meio de análises estatísticas, considerando as diferentes configurações utilizadas nos processamentos com o *software* Agisoft Metashape, sendo estas: duas abordagens distintas para calibração da câmara, variação do número de pontos de controle, variação de altura de voo, e variação nas taxas de recobrimento.

### 4.1.1 Calibração de câmara

Para avaliar os dois métodos de calibração de câmara, primeiramente foram obtidos os POI com a calibração em serviço utilizando os dados da Área 2, 1335 imagens obtidas com taxas de recobrimento de 90%/80%, GSD aproximado de 0,93 cm, e 23 pontos de controle. O *software* Metashape não fornece informações sobre a qualidade da calibração, por isso, a precisão da calibração em serviço é mensurada a partir da inserção destes parâmetros determinados nos processamentos denominados como “fixos” nos próximos experimentos. A configuração dos pontos de controle é ilustrada na Figura 24. Os resultados dos POI são apresentados na Tabela 1.

Figura 24. Configuração dos pontos de controle. Tabela 1. Resultados dos POI.

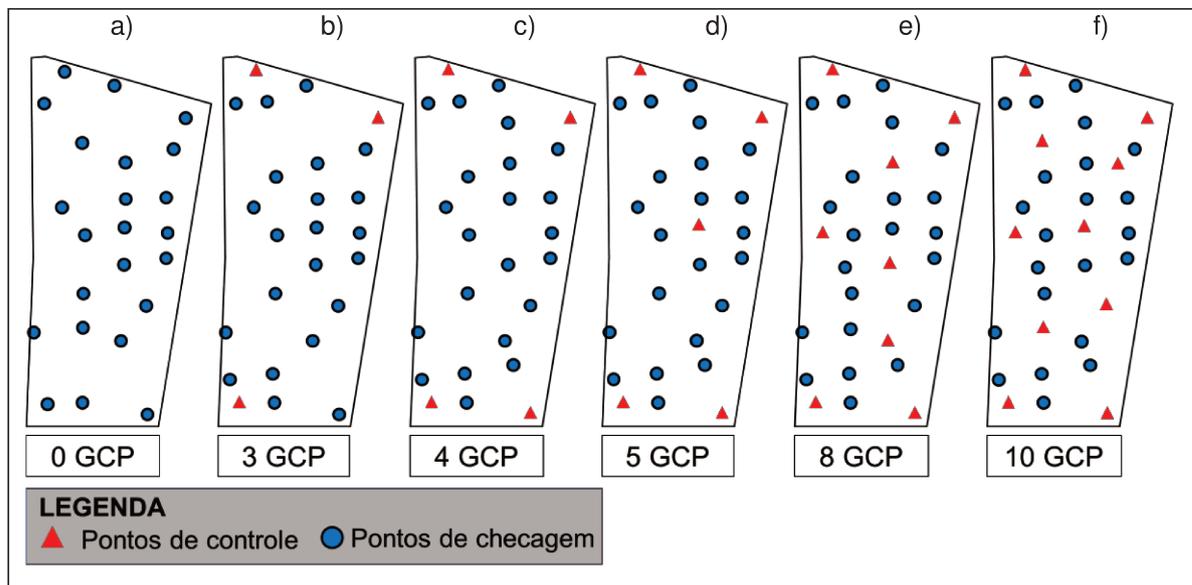


POI	Pontos de controle
$f$ (mm)	8,585
$c_x$ (mm)	- 0,044
$c_y$ (mm)	0,014
$k_1 \times 10^{-3}$	3,139
$k_2 \times 10^{-2}$	- 1,837
$k_3 \times 10^{-2}$	1,935
$p_1 \times 10^{-3}$	- 0,195
$p_2 \times 10^{-3}$	-0,300

### 4.1.2 Variação do número de pontos de controle

Neste experimento foram realizados 12 diferentes processamentos com diferentes números de pontos de controle (0, 3, 4, 5, 8, e 10) considerando os dois métodos de calibração. A qualidade dos resultados foi mensurada a partir de 22 pontos de checagem. A configuração dos pontos de controle e dos pontos de checagem é ilustrada na Figura 25.

Figura 25. Configuração dos pontos de controle e 22 de checagem.



Como resultado dos processamentos, 12 diferentes conjuntos de ortoimagens e MDTs foram gerados. A Tabela 2 apresenta os resultados para a fototriangulação com os POI desconhecidos e os POE sendo considerados como aproximados (denominado “calibração em serviço”). A Tabela 3 apresenta os resultados para a fototriangulação com o POI pré-calibrados (fixo). As tabelas apresentam as seguintes informações: número de pontos de controle utilizados no processo de fototriangulação, REMQ (X, Y, e Z), os mínimos e os máximos, a média, o desvio padrão, “Tend.” representa a presença de tendências (sim - existe tendência, não - sem tendência), a escala obtida para o PEC-PCD Classe A (planimetria), a escala e a equidistância obtida para o PEC-PCD Classe A (altimetria dos pontos cotados), e a escala e a equidistância obtida para o PEC-PCD Classe A (altimetria das curvas de nível). Todas as medidas são representadas em metros.

Tabela 2. Resultados do experimento de pontos de controle  
(POI desconhecidos e POE aproximados - calibração em serviço).

Pontos de controle – calibração em serviço							
Pontos	0	3	4	5	8	10	
X (m)	REMQ	0,517	0,041	0,031	0,025	0,026	0,024
	Máx.	- 0,261	0,040	0,038	0,031	0,033	0,047
	Mín.	- 0,703	- 0,095	- 0,068	- 0,054	- 0,052	- 0,047
	$\mu$	- 0,503	- 0,020	- 0,013	0,009	- 0,005	0,001
	$\sigma$	0,122	0,037	0,029	0,025	0,026	0,025
	Tend.	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
	PEC-PCD Classe A - Planimetria						
Escala	1:10.000	1:500	1:500	1:500	1:250	1:250	
Y (m)	REMQ	2,210	0,040	0,037	0,032	0,032	0,029
	Máx.	2,317	0,091	0,078	0,074	0,074	0,069
	Mín.	2,046	-0,033	-0,052	-0,041	-0,041	-0,043
	$\mu$	2,209	0,018	-0,002	0,009	0,005	0,002
	$\sigma$	0,072	0,037	0,038	0,032	0,032	0,030
	Tend.	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
	PEC-PCD Classe A - Planimetria						
Escala	1:15.000	1:500	1:500	1:500	1:500	1:500	
Z (m)	REMQ	9,556	0,428	0,371	0,045	0,035	0,034
	Máx.	- 7,149	0,172	- 0,055	0,036	0,061	0,082
	Mín.	- 12,658	- 0,681	- 0,601	- 0,098	- 0,051	- 0,044
	$\mu$	- 9,422	- 0,369	- 0,337	- 0,026	0,001	0,005
	$\sigma$	1,628	0,222	0,158	0,037	0,036	0,034
	Tend.	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não
	PEC-PCD Classe A – Altimetria dos Pontos Cotados						
	Escala	1:250.000	1:10.000	1:10.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000
	Eq.	100,000	5,000	5,000	0,500	0,500	0,500
	PEC-PCD Classe A – Altimetria das Curvas de Nível						
Escala	1:100.000	1:5.000	1:5.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000	
Eq.	50,000	2,000	2,000	0,250	0,250	0,250	

De acordo com a Tabela 2, o uso dos POE obtidos a partir dos sensores do VANT e zero pontos de controle geram produtos de baixa qualidade, com PEC-PCD Classe A na escala de 1:15.000 (planimetria), 1:250.000 (altimetria dos pontos cotados), e 1:100.000 (altimetria das curvas de nível), com REMQ de 0,517m, 2,210m e 9,556m, para X, Y, e Z, respectivamente.

Em relação ao processamento utilizando 4 pontos de controle localizados nas bordas externas da área em estudo, obteve-se o PEC-PCD Classe A na escala de 1:500 (planimetria), 1:10.000 com equidistância das curvas de nível de 5,00m

(altimetria dos pontos cotados), e 1:10.000 com equidistância entre as curvas de nível de 2,00m (altimetria das curvas de nível), com REMQ de 0,031m para X e 0,037m para Y, enquanto o REMQ na componente Z é igual a 0,371m.

Comparando os processamentos utilizando 4 e 5 pontos de controle, ao adicionar um ponto de controle no centro da área em estudo, confirma-se a redução do REMQ em Z, de 0,371m para 0,045m, e um PEC-PCD Classe A para a escala de 1:1.000 com equidistância entre as curvas de nível de 0,50m (altimetria dos pontos cotados) e 1:1.000 com equidistância entre as curvas de 0,25m. Inserir um ponto de controle no centro da área aumenta a qualidade altimétrica do MDT, fato também observado por Martinez-Carriconto *et al.* (2018). Porém, no processamento com 5 pontos de controle apenas a ortoimagem pode ser aceita como produto confiável devido a existência de tendência no MDT.

A partir da análise dos resultados da Tabela 2, obteve-se uma configuração ótima utilizando 8 pontos de controle bem distribuídos nas bordas externas e no centro da área, no qual foram gerados resultados sem tendências e com alta precisão para a ortoimagem e MDT. Os erros obtidos na ortoimagem foram de 0,026m e 0,033m para X e para Y, respectivamente, com PEC-PCD Classe A na escala de 1:500 (planimetria). Em relação ao MDT, foi obtido um REMQ de 0,030m para a componente Z, com PEC-PCD Classe A na escala de 1:1.000 com equidistância de 0,250m (pontos cotados) e na escala de 1:1.000 com equidistância de 0,150m. Além disso, a comparação demonstra que a inserção de mais 5 pontos de controle reduz os desvios padrão das observação, mas não necessariamente representa um aumento expressivo na precisão dos produtos gerados.

Tabela 3. Resultados do experimento de pontos de controle (POI pré-calibrados (fixo)).

Pontos de controle – POI pré-calibrados (fixo)								
Pontos		0	3	4	5	8	10	
X (m)	REMQ	0,457	0,038	0,031	0,025	0,026	0,024	
	Máx.	- 0,241	0,024	0,027	0,033	0,036	0,032	
	Mín.	- 0,643	- 0,082	- 0,067	- 0,051	- 0,050	- 0,054	
	$\mu$	- 0,440	- 0,027	- 0,018	- 0,007	- 0,005	- 0,002	
	$\sigma$	0,128	0,027	0,026	0,025	0,027	0,024	
	Tend.	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	
	PEC-PCD Classe A - Planimetria							
Escala		1:5.000	1:500	1:500	1:250	1:100	1:250	
Y (m)	REMQ	2,177	0,027	0,031	0,032	0,033	0,030	
	Máx.	2,562	0,044	0,069	0,070	0,080	0,075	
	Mín.	1,825	0,048	- 0,055	- 0,045	- 0,044	- 0,046	
	$\mu$	2,167	- 0,001	0,000	0,009	0,005	0,003	
	$\sigma$	0,214	0,028	0,032	0,031	0,033	0,031	
	Tend.	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	
	PEC-PCD Classe A - Planimetria							
Escala		1:15.000	1:500	1:500	1:500	1:500	1:500	
Z (m)	REMQ	10,312	0,037	0,034	0,032	0,030	0,029	
	Máx.	- 7,184	0,020	0,083	0,060	0,067	0,070	
	Mín.	- 12,904	- 0,066	- 0,057	- 0,045	- 0,038	- 0,036	
	$\mu$	- 10,153	- 0,022	0,005	0,003	0,003	0,007	
	$\sigma$	1,849	0,030	0,034	0,033	0,031	0,029	
	Tend.	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	
	PEC-PCD Classe A – Altimetria dos Pontos Cotados							
	Escala		1:250.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000
	Eq.		100,000	0,500	0,500	0,500	0,250	0,250
	PEC-PCD Classe A – Altimetria das Curvas de Nível							
Escala		1:100.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000	
Eq.		50,000	0,250	0,250	0,150	0,150	0,150	

Conforme a Tabela 3, a inserção de POI pré-calibrados (fixo), a utilização dos POE obtidos a partir dos sensores do VANT e zero pontos de controle, resultam em produtos com baixa precisão, com REMQ de 0,457m, 2,177m, e 10,312m, para X, Y, e Z, respectivamente. A utilização de 3 pontos de controle localizados na borda externa da área em estudo aumenta expressivamente a precisão dos produtos gerados, com erros decimétricos (0,038m (X), 0,027m (Y) e 0,037m (Z)), porém ainda existem tendências tanto na ortorectificação quanto no MDT.

O processamento com 4 pontos de controle posicionados nas bordas externas da área em estudo apresentou o mesmo comportamento com 3 pontos de controle, porém, a adição de um ponto de controle proporcionou uma redução no desvio-padrão das observações. Mesmo com produtos gerados de alta precisão, apenas o MDT pode ser utilizado devido a presença de tendências na ortoimagem.

Uma configuração ótima é obtida ao aplicar 5 pontos de controle, sendo estes, posicionados nas bordas externas e um no centro da área em estudo. Como resultado, foram obtidos os REMQ de 0,025m, 0,032m, e 0,032m, para X, Y, e Z, respectivamente. Os produtos gerados são dotados de alta precisão e são classificados como PEC-PCD Classe A na escala de 1:500 (planimetria), 1:1.000 com equidistância de 0,50m para a altimetria dos pontos cotados e 0,15m para a altimetria das curvas de nível.

O comportamento dos resultados obtidos a partir da utilização de mais pontos de controle (POI pré-calibrados) seguiu o mesmo padrão do experimento anterior com os POE e POI desconhecidos, onde, a inserção de mais pontos de controle apresenta uma redução dos máximos e mínimos, média e desvio-padrão, porém, não apresenta um aumento expressivo da precisão, fato também observado por Oniga *et al.* (2020).

Um fato importante foi observado quando comparados os experimentos com a inserção de POI pré-calibrados e com a utilização dos POI como desconhecidos, que é a redução do trabalho de campo em relação a coleta de pontos de controle (AGÜERA-VEGA *et al.*, 2017a). Nota-se que a configuração ótima para a calibração em serviço é a utilização de no mínimo 8 pontos de controle bem distribuídos nas bordas e no centro da área. Em relação à inserção de POI pré-calibrados (fixo), a configuração ótima é obtida a partir da utilização de 5 pontos de controle localizados na borda e no centro da área.

Visando facilitar a análise do comportamento dos POI em relação a variação do número de pontos de controle quando a fototriangulação é realizada com ambos POE e POI desconhecidos (calibração em serviço), foi concebida a Tabela 4 com as seguintes informações: número de pontos de controle utilizados no processamento, a distância focal em mm, o deslocamento das coordenadas X e Y do ponto principal em mm, os coeficientes de distorção radial simétrica ( $k_1$ ,  $k_2$ , e  $k_3$ ), e os coeficientes de distorção descentrada ( $p_1$  e  $p_2$ ).

Tabela 4. Resultados dos POI para a calibração em serviço (POI desconhecido e POE aproximado).

POI	Número de Pontos de Controle						
	0	3	4	5	8	10	23
$f$ (mm)	8,598	8,577	8,578	8,586	8,586	8,585	8,585
$c_x$ (mm)	-0,044	-0,044	-0,044	-0,044	-0,044	-0,044	-0,044
$c_y$ (mm)	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
$k_1 \times 10^{-3}$	2,259	2,1330	2,303	3,027	3,095	3,095	3,139
$k_2 \times 10^{-2}$	-1,838	-1,8212	-1,824	-1,837	-1,839	-1,837	-1,837
$k_3 \times 10^{-2}$	1,942	1,9133	1,917	1,935	1,937	1,935	1,935
$p_1 \times 10^{-3}$	-0,197	-0,1963	-0,196	-0,196	-0,195	-0,195	-0,195
$p_2 \times 10^{-3}$	-0,300	-0,2982	-0,299	-0,300	-0,300	-0,300	-0,300

A Tabela 4 demonstra que a distância focal ( $f$ ), o deslocamento das coordenadas do ponto principal ( $c_x$  e  $c_y$ ), os coeficientes de distorção  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $p_1$  e  $p_2$ , são bem determinados via calibração em serviço. Essa afirmação é baseada nos processamentos realizados com 0, 10 e 23 pontos de controle, que apresentam uma variação de 0,013mm na distância focal calibrada, além de apresentar os mesmos valores para o deslocamento das coordenadas do ponto principal, e valores similares para os coeficientes de distorção ( $k_2$ ,  $k_3$ ,  $p_1$  e  $p_2$ ). A comparação demonstra que é necessário a utilização de um alto número de pontos de controle para determinar o coeficiente de distorção radial simétrica  $k_1$  quando se aplica a fototriangulação com os POE e os POI desconhecidos.

Segundo Brown (1971), as câmaras digitais não-métricas expressam grandes valores de distorção radial, especialmente devido ao coeficiente  $k_1$ . É importante salientar que  $k_1$  é o coeficiente que apresenta a maior magnitude dentre os demais coeficientes de distorção no deslocamento do ponto medido no plano da imagem. A calibração de câmara possui influência na qualidade dos produtos, porém, identifica-se que o problema da qualidade pode estar relacionado a orientação indireta das imagens.

### 4.1.3 Variação da altura de voo

O experimento de variação de altura de voo resultou em 6 diferentes processamentos, e os dados utilizados são descritos no Quadro 12, com as seguintes informações: área imageada, tempo de voo para a aquisição das imagens, recobrimento lateral e longitudinal das imagens, altura de voo em pés e em metros, e elemento de resolução espacial aproximado.

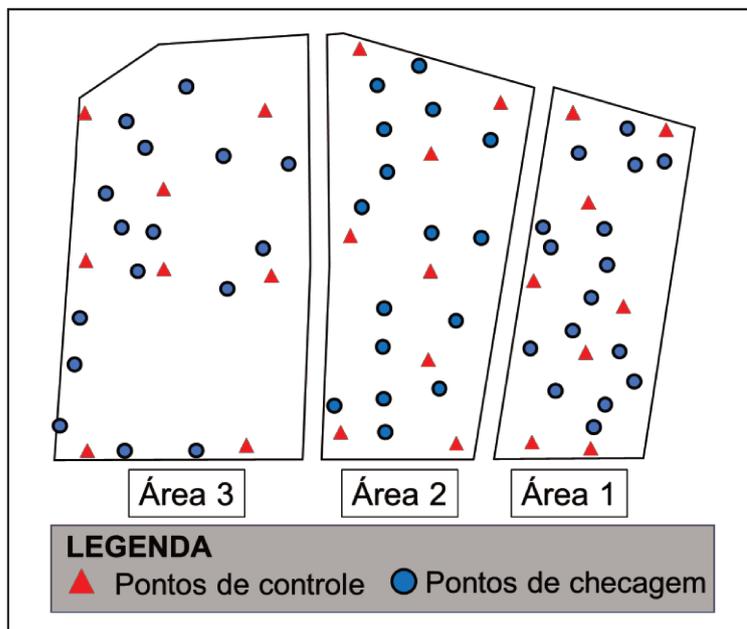
Quadro 12. Informações para a avaliação da influência da altura de voo.

Área	Tempo de voo	Recobrimento (%)		Altura de voo (m)	GSD (cm)
		Longitudinal	Lateral		
1	49 min	90	80	21	0,63
2	46 min	90	80	31	0,93
3	49 min	90	80	40	1,19

As áreas apresentam as mesmas características de declividade, porém, com diferentes feições acima do solo. Os processamentos serão realizados da seguinte maneira: utilizando os dados da Área 1, com aproximadamente 2,80ha, a 21m de altura e GSD aproximado de 0,63cm; utilizando os dados da Área 2, com aproximadamente 3,85ha, a 31m de altura e GSD aproximado de 0,93cm; e utilizando os dados da Área 3, com aproximadamente 5,27ha, a 40m de altura e GSD aproximado de 1,19cm.

Os processamentos foram realizados a taxas de recobrimento de imagens de 90% longitudinal e 80% lateral. Para realizar os processamentos, 8 pontos de controle foram utilizados. A razão para a escolha do número de pontos de controle foi baseada nos resultados do experimento de variação de pontos de controle, no qual, um mínimo de 8 pontos de controle se faz necessário para geração de produtos com alta precisão e sem tendências. A avaliação da qualidade dos resultados será baseada em 16 pontos de checagem bem distribuídos. A configuração dos pontos de controle e dos pontos de checagem é ilustrada na Figura 26.

Figura 26. Configuração dos pontos de controle e de checagem.



Procedendo para a etapa de avaliação da qualidade por meio das análises estatísticas, a Tabela 5 apresenta os resultados dos processamentos a diferentes alturas de voo a partir da calibração em serviço, e a Tabela 6 apresenta os resultados dos processamentos a diferentes alturas de voo com a inserção dos POI pré-calibrados (fixo).

Tabela 5. Resultados do experimento de altura de voo (POI desconhecido e POE aproximado - calibração em serviço).

Altura de voo – calibração em serviço					
Altura (m)		21,00	31,00	40,00	
Área		1	2	3	
X (m)	REMQ	0,008	0,024	0,026	
	Máx.	0,017	0,033	0,049	
	Mín.	- 0,016	- 0,052	- 0,039	
	$\mu$	0,000	- 0,002	0,006	
	$\sigma$	0,008	0,0024	0,026	
	Tend.	Não	Não	Não	
	PEC-PCD Classe A - Planimetria				
Escala		1:100	1:250	1:250	
Y (m)	REMQ	0,008	0,032	0,021	
	Máx.	0,019	0,074	0,010	
	Mín.	- 0,013	- 0,038	- 0,050	
	$\mu$	0,000	0,009	- 0,010	
	$\sigma$	0,008	0,031	0,019	
	Tend.	Não	Não	Sim	
	PEC-PCD Classe A - Planimetria				
Escala		1:100	1:500	1:500	
Z (m)	REMQ	0,029	0,033	0,056	
	Máx.	0,066	0,061	0,085	
	Mín.	- 0,044	- 0,047	- 0,076	
	$\mu$	0,004	- 0,002	- 0,004	
	$\sigma$	0,030	0,034	0,058	
	Tend.	Não	Não	Não	
	PEC-PCD Classe A – Altimetria dos Pontos Cotados				
	Escala		1:1.000	1:1.000	1:1.000
	Eq.		0,250	0,500	0,500
	PEC-PCD Classe A – Altimetria das Curvas de Nível				
	Escala		1:1.000	1:1.000	1:1.000
Eq.		0,150	0,250	0,250	

Tabela 6. Resultados do experimento de altura de voo (POI pré-calibrado (fixo)).

Altura de voo – POI pré-calibrado (fixo)					
Altura (m)		21,00	31,00	40,00	
Área		1	2	3	
X (m)	REMQ	0,006	0,024	0,027	
	Máx.	0,006	0,036	0,052	
	Mín.	- 0,016	- 0,050	- 0,032	
	$\mu$	- 0,002	- 0,001	0,005	
	$\sigma$	0,006	0,025	0,027	
	Tend.	Não	Não	Não	
	PEC-PCD Classe A - Planimetria				
Escala		1:100	1:250	1:500	
Y (m)	REMQ	0,006	0,033	0,021	
	Máx.	0,016	0,080	0,014	
	Mín.	- 0,009	- 0,042	- 0,060	
	$\mu$	- 0,002	0,033	- 0,009	
	$\sigma$	0,006	0,009	0,020	
	Tend.	Não	Não	Não	
	PEC-PCD Classe A - Planimetria				
Escala		1:100	1:500	1:500	
Z (m)	REMQ	0,050	0,027	0,027	
	Máx.	0,086	0,067	0,060	
	Mín.	- 0,051	- 0,035	- 0,037	
	$\mu$	0,031	- 0,001	0,009	
	$\sigma$	0,040	0,028	0,027	
	Tend.	Sim	Não	Não	
	PEC-PCD Classe A – Altimetria dos Pontos Cotados				
	Escala		1:1.000	1:1.000	1:1.000
	Eq.		0,500	0,250	0,500
	PEC-PCD Classe A – Altimetria das Curvas de Nível				
	Escala		1:1.000	1:1.000	1:1.000
Eq.		0,250	0,150	0,250	

Conforme a Tabela 5, os resultados obtidos a uma baixa altura de voo de 21m, apresenta uma alta precisão tanto para a ortoimagem, com PEC-PCD Classe A na escala de 1:100 (planimetria), quanto para o MDT, com o PEC-PCD Classe A na escala de 1:1.000 com equidistância das curvas de nível de 0,25m para a altimetria dos pontos cotados e 0,15m para a altimetria das curvas de nível. Os erros gerados no processamento foram de 0,008m para X e Y, e 0,029m para Z, e possuem uma distribuição normal livres de tendência.

Elevando a altura de voo para 40m, aumenta-se a magnitude dos erros obtidos, com um REMQ de 0,026m, 0,021m, e 0,056m (para X, Y, e Z, respectivamente). Em relação ao comportamento da amostra, o MDT não apresentou tendência, porém, a componente Y da ortomagem apresentou tendência, fato que pode estar relacionado a redução da resolução espacial para 2,0cm. Esses produtos são classificados segundo o PEC-PCD como Classe A na escala de 1:500 (planimetria), e 1:1.000 com equidistância das curvas de nível de 0,50m para a altimetria dos pontos cotados e 0,25m para a altimetria das curvas de nível.

Além disso, foi identificado piores precisões no MDT ao elevar a altura de aquisição das imagens, na qual condiz com as referências abordadas no Capítulo I. Segundo Kraus (2011), a redução na qualidade altimétrica é relativa à distância focal e a relação linha de base e altura entre duas imagens consecutivas.

Em relação ao resultados com os POI pré-calibrados (fixo) (Tabela 6), os resultados para 31m e 41m foram classificados como PEC-PCD Classe A para a escala 1:500, além disso, identifica-se uma semelhança nos erros obtidos de 0,024 e 0,027 m para a componente X, e 0,027 m para a altimetria.

O melhor resultado planimétrico foi obtido com a altura de voo de 21 m, no qual foram gerados erros de 0,006 m tanto para X quanto para Y, sendo classificado como PEC-PCD Classe A para a escala de 1:100 para planimetria. Em relação à componente Z, foi obtido um erro de 0,050 m, com PEC-PCD Classe A para a escala 1:1.000 equidistância das curvas de nível de 0,50m para a altimetria dos pontos cotados e 0,25m para a altimetria das curvas de nível. O alto erro em Z tem relação com os POI obtidos por meio da pré-calibração, sendo comprovado pela comparação entre os resultados obtidos a 21 m de altura com os POI fixos (Tabela 6) e com os POI desconhecidos (Tabela 5). A diferença na altimetria indica erros na determinação dos POI utilizando o campo de calibração (Área 2), além disso Prybzilla *et al.* (2019), aconselha a aquisição de imagens à diferentes resoluções quando a calibração em serviço for aplicada.

Visando analisar o comportamento da calibração em serviço utilizando diferentes alturas de voo, foi concebida a Tabela 7 com as seguintes informações: altura de voo, a distância focal em mm, o deslocamento das coordenadas em X e em Y do ponto principal em mm, os coeficientes de distorção radial simétrica ( $k_1$ ,  $k_2$ , e  $k_3$ ), e os coeficientes de distorção descentrada ( $p_1$  e  $p_2$ ).

Tabela 7. Resultados dos POI obtidos a diferentes alturas de voo (POI ajustável).

POI	Altura de voo		
	21 m	31 m	40 m
$f$ (mm)	8,581	8,586	8,578
$c_x$ (mm)	-0,045	-0,044	-0,044
$c_y$ (mm)	0,012	0,014	0,013
$k_1 \times 10^{-3}$	3,1582	3,095	3,612
$k_2 \times 10^{-2}$	-1,9564	-1,839	-1,991
$k_3 \times 10^{-2}$	2,0403	1,937	2,048
$p_1 \times 10^{-3}$	-0,2236	-0,195	-0,223
$p_2 \times 10^{-3}$	-0,3285	-0,300	-0,304

Segundo a Tabela 7, foram obtidos valores similares para a distância focal ( $f$ ) e para as coordenadas do ponto principal ( $c_x$  e  $c_y$ ). Porém, em relação aos coeficientes de distorção radial simétrica, nota-se uma disparidade entre os valores obtidos para  $k_1$ , no qual a Área 3 (40 m) possui o maior valor. A Área 3 possui diferentes feições, como quinas de telhado e demais feições bem definidas, se comparado as demais áreas, fator que contribuiu para o processo de correspondência de imagens.

Um outro fator que influenciou a diferença nos valores obtidos para os POI foi a aquisição das imagens em diferentes dias. O VANT Phantom 4 possui uma câmara de baixo custo, e conseqüente, os POI não apresentam os mesmos valores para diferentes levantamentos devido à baixa estabilidade geométrica.

#### 4.1.4 Variação da taxa de recobrimento das imagens

A variação da taxa de recobrimento foi avaliada a partir de 12 diferentes processamentos, e os dados utilizados são derivados dos levantamentos realizados na Área 2, com altura de 31m e GSD aproximado de 0,93m. As taxas de recobrimento longitudinal e lateral utilizadas nos processamentos são, respectivamente: 90% e 80% 90% e 80% (1335 imagens), 80% e 60% (360 imagens), 70% e 60% (353 imagens), 70% e 40 (179 imagens), 60% e 60 (183 imagens) e 60% e 40 (132 imagens).

Nesta etapa, serão analisados os resultados obtidos com a calibração em serviço utilizando 8 pontos (Tabela 8) e os resultados obtidos com a fototriangulação utilização dos POI pré-calibrados (fixo) com 5 pontos de controle (Tabela 9). A justificativa para a determinação do número de pontos de controle é baseada no experimento de variação do número de pontos de controle, no qual o número mínimo de pontos de controle para a geração de produtos confiáveis e precisos aplicando a calibração em serviço são 8 pontos, e com a utilização dos POI pré-calibrados são 5 pontos. A configuração dos pontos de controle e dos pontos de checagem é ilustrada na Figura 25.

Tabela 8. Resultados para os processamentos da variação do recobrimento de imagens (POI desconhecido e POE aproximado - calibração em serviço com 8 pontos de controle).

Recobrimento de imagens – calibração em serviço com 8 pontos de controle							
Longitudinal	90%	80%	70%	70%	60%	60%	
Lateral	80%	60%	60%	40%	60%	40%	
X (m)	REMQ	0,026	0,027	0,031	0,035	0,033	0,043
	Máx.	0,033	0,035	0,047	0,052	0,049	0,064
	Mín.	- 0,052	- 0,050	- 0,062	- 0,061	- 0,065	- 0,072
	$\mu$	- 0,005	- 0,002	- 0,002	0,000	- 0,004	- 0,003
	$\sigma$	0,026	0,027	0,032	0,036	0,027	0,044
	Tend.	Não	Não	Não	Não	Não	Não
	PEC-PCD Classe A - Planimetria						
Escala	1:250	1:500	1:500	1:500	1:500	1:500	
Y (m)	REMQ	0,032	0,032	0,032	0,032	0,030	0,029
	Máx.	0,074	0,069	0,068	0,067	0,072	0,057
	Mín.	- 0,041	- 0,044	- 0,037	- 0,051	- 0,036	- 0,055
	$\mu$	0,005	0,006	0,012	0,000	0,014	0,003
	$\sigma$	0,032	0,032	0,031	0,033	0,027	0,030
	Tend.	Não	Não	Sim	Não	Sim	Não
	PEC-PCD Classe A - Planimetria						
Escala	1:500	1:500	1:500	1:500	1:500	1:500	
Z (m)	REMQ	0,035	0,032	0,041	0,041	0,041	0,050
	Máx.	0,061	0,063	0,098	0,093	0,086	0,154
	Mín.	- 0,051	- 0,023	- 0,039	- 0,052	- 0,027	- 0,045
	$\mu$	0,001	0,021	0,023	0,019	0,026	0,024
	$\sigma$	0,036	0,025	0,035	0,037	0,032	0,045
	Tend.	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
	PEC-PCD Classe A – Altimetria dos Pontos Cotados						
Escala	1:1.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000	
Eq.	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	
PEC-PCD Classe A – Altimetria das Curvas de Nível							
Escala	1:1.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000	
Eq.	0,250	0,150	0,250	0,250	0,250	0,250	

De acordo com a Tabela 8, os produtos gerados com alta taxa de recobrimento de imagens de 90%/80% e 8 pontos de controle possuem alta precisão e apresentam resultados sem tendência para a ortorectificação e para o MDT. Em contrapartida, ao reduzir a taxa de recobrimento para 80%/60%, identificou-se o aumento da média dos erros na componente altimétrica, logo o MDT não pode ser utilizado devido a presença de tendência no MDT.

Nota-se que a precisão planimétrica não é influenciada com a redução da taxa de recobrimento. Comparando o processamento com 90%/80% e 60%/40%o PEC-PCD Classe A é obtido para a escala de 1:500 na planimetria. Além disso, foi identificado que ao reduzir o número de *tie-points* devido à redução da redundância das observações de um mesmo ponto, tem-se como resultado produtos com maiores amplitudes de erros (máximos e mínimos), aumento da média e do desvio-padrão. Por mais que neste caso a precisão do MDT se mantenha a mesma para os processamentos com 90%/80% e 60%/40%, com um PEC-PCD Classe A na escala de 1:1.000 com equidistância de 0,50 e 0,250, tais produtos não podem ser aplicados devido a existência de tendências. A solução para a redução desses erros e para o aumento da precisão altimétrica é a inserção de mais pontos de controle.

A Tabela 9 apresenta os resultados para os processamentos a diferentes taxas de recobrimento de imagens aplicando os POI pré-calibrados (fixos) e 5 pontos de controle.

Tabela 9. Resultados para os processamentos da variação do recobrimento de imagens – POI pré-calibrados (fixo) com 5 pontos de controle.

Recobrimento de imagens – POI pré-calibrados (fixo) com 5 pontos de controle							
Longitudinal	90%	80%	70%	70%	60%	60%	
Lateral	80%	60%	60%	40%	60%	40%	
X (m)	REMQ	0,025	0,025	0,028	0,027	0,026	0,031
	Máx.	0,033	0,056	0,042	0,043	0,047	0,046
	Mín.	- 0,051	-0,041	-0,063	-0,054	-0,056	-0,054
	$\mu$	- 0,007	0,001	-0,006	0,006	-0,005	-0,003
	$\sigma$	0,025	0,025	0,028	0,027	0,026	0,032
	Tend.	Não	Não	Não	Não	Não	Não
	PEC-PCD Classe A - Planimetria						
Escala	1:250	1:250	1:250	1:500	1:500	1:500	
Y (m)	REMQ	0,032	0,032	0,032	0,033	0,033	0,032
	Máx.	0,070	0,064	0,074	0,083	0,075	0,067
	Mín.	- 0,045	-0,049	-0,041	-0,032	-0,048	-0,048
	$\mu$	0,009	0,008	0,011	0,014	0,008	0,010
	$\sigma$	0,031	0,031	0,031	0,031	0,033	0,031
	Tend.	Não	Não	Não	Sim	Não	Não
	PEC-PCD Classe A - Planimetria						
Escala	1:500	1:500	1:500	1:500	1:500	1:500	
Z (m)	REMQ	0,032	0,038	0,060	0,083	0,043	0,055
	Máx.	0,060	0,041	0,039	-0,054	0,047	0,102
	Mín.	- 0,045	-0,076	-0,127	-0,164	-0,098	-0,022
	$\mu$	0,003	-0,012	-0,038	-0,054	-0,020	0,046
	$\sigma$	0,033	0,037	0,047	0,064	0,040	0,032
	Tend.	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
	PEC-PCD Classe A – Altimetria dos Pontos Cotados						
	Escala	1:1.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000
	Eq.	0,500	0,500	1,000	1,000	0,500	0,500
	PEC-PCD Classe A – Altimetria das Curvas de Nível						
Escala	1:1.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000	1:1.000	
Eq.	0,150	0,250	0,500	0,500	0,250	0,250	

De acordo com a Tabela 9, a variação do recobrimento não apresenta diferenças expressivas quando a precisão planimétrica é analisada. Em referência aos processamentos a altas taxas de 90%/80% e a taxas de 60%/40%, nota-se uma constância para os erros (máximos e mínimos, média e desvio padrão) e também uma mesma precisão para o PEC-PDC Classe A, com a escala de 1:500 para a planimetria.

Em relação ao MDT, nota-se que a redução da taxa de recobrimento das imagens influencia diretamente na amplitude dos erros obtidos, bem como no

aumento da média e do desvio-padrão das observações. Para o recobrimento de 90%/80%, a média é igual a 0,003m e o desvio-padrão é igual a 0,033, com um REMQ de 0,032m. Reduzindo o recobrimento em 10% longitudinal e 20% lateral (80%/60%), foram obtidos - 0,012m para a média, 0,037m para o desvio-padrão, e 0,038m para o REMQ. Reduzindo o recobrimento para taxas de 60%/40%, a média decresce para um valor de 0,046 m, o desvio-padrão é igual a 0,032m e o REMQ para 0,055m.

A redução da taxa de recobrimento possui influência no número de pontos homólogos identificados nos pares de imagens consecutivos, tanto para o sentido longitudinal quanto para o sentido lateral, e conseqüentemente na determinação dos POE e dos POI por meio da fototriangulação. Outro fato que deve ser estudado é o tempo consumido para o processamento e para a geração dos produtos cartográficos. Visando identificar o comportamento dos *tie-points* gerados a diferentes taxas de recobrimento de imagens, bem como o tempo consumido para a geração da nuvem de pontos e da ortoimagem, foi concebida a Tabela 10 com as seguintes informações: taxa de recobrimento das imagens (lateral e longitudinal, respectivamente), quantidade de imagens utilizadas nos processamento, quantidade de *tie-points* gerados, quantidade de elementos da nuvem de pontos, e tempo total de processamento para geração dos produtos finais.

Tabela 10. Resultados da variação de pontos de controle com POI pré-calibrados (fixo)

Recobrimento (%)		Número de imagens	Elementos		Tempo total de processamento
Longitudinal	Lateral		<i>Tie-points</i>	Nuvem de pontos	
90	80	1335	1.795.827	62.385.746	26 h 8 min
80	60	360	509.816	57.284.618	2 h 33 min
70	60	353	414.915	52.137.894	1 h 3 min
70	40	179	233.482	50.370.437	1 h 2 min
60	60	183	207.276	46.228.425	44 min
60	40	132	145.032	42.172.112	42 min

A partir da Tabela 10, foi identificado que maiores taxas de recobrimento resultam em maior tempo de processamento devido ao volume de dados que são processados. O resultado da utilização de maiores taxas de recobrimento é o aumento do número de pontos homólogos sendo visualizados por mais imagens, e

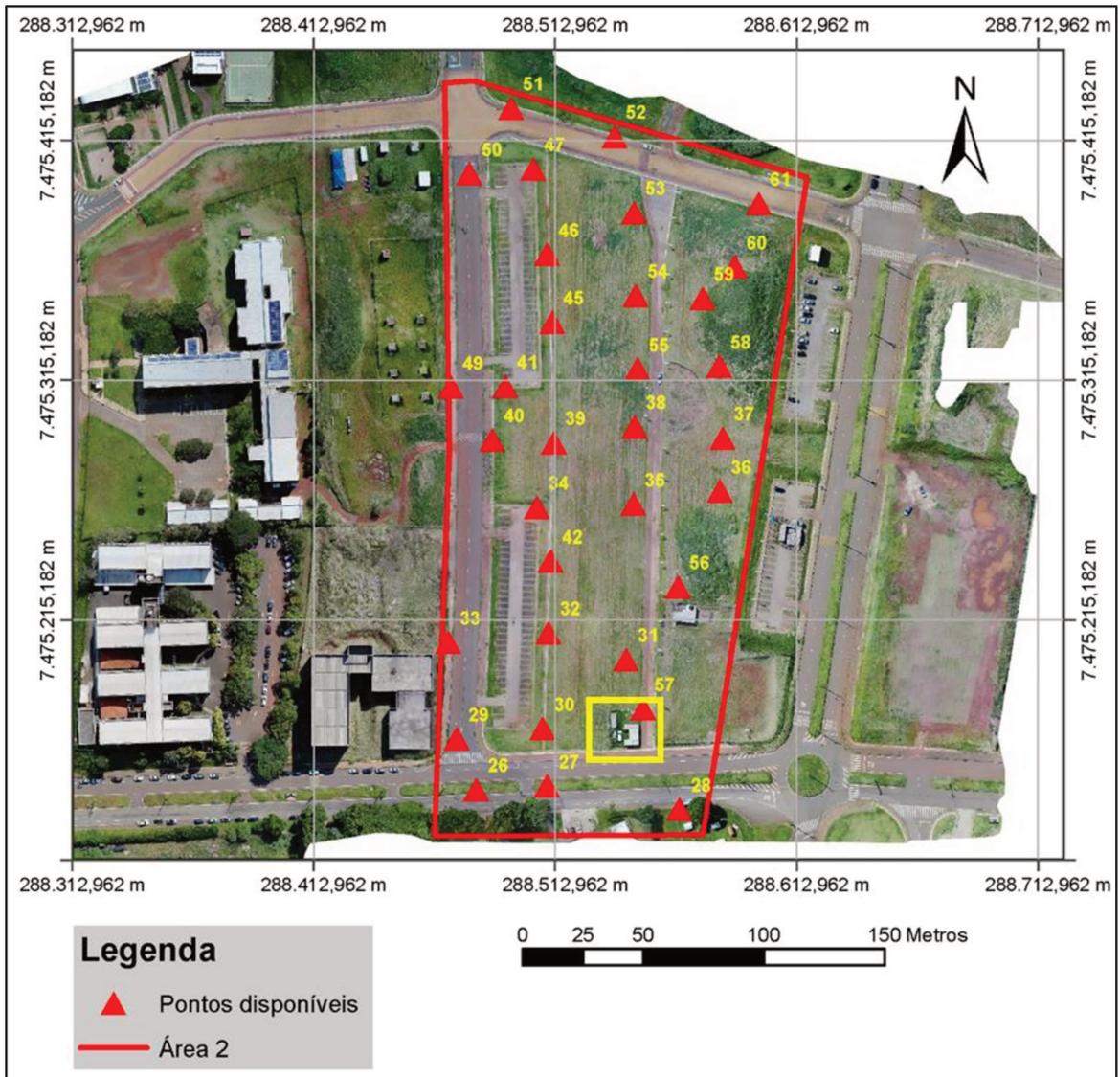
consequentemente, maior é o número de *tie-points* gerados e utilizados no processo de fototriangulação.

A redução da taxa de recobrimento de 90%/80% para 80%/60% apresenta uma redução no tempo de processamento de aproximadamente 10 vezes, de 26 horas e 8 minutos para 2 horas e 33 minutos, e apresentam resultados similares para a precisão (apresentados na Tabela 9). Um detalhe interessante é que essa redução do recobrimento apresenta uma redução no número de *tie points* de 1,795 milhões para 509 mil pontos, e a nuvem de pontos densa apresenta uma diferença de 62 milhões para 57 milhões de elementos.

Além disso, a redução do recobrimento não apresentou depreciação da precisão planimétrica. Em contrapartida, a redução dessa taxa resulta em depreciação da precisão posicional (altimétrica), devido à redução de *tie points* gerados e aplicados no processo de fototriangulação. É válido ressaltar que o aumento do número de pontos de controle aumenta a precisão posicional dos produtos, e neste caso, entende-se que é viável o aumento do trabalho de campo para a coleta de mais alguns pontos de controle em função da redução do tempo de processamento de 90%/80% para 80%/60%, com uma economia de 23 horas de processamento.

Outra consequência são as presenças de falhas na ortoimagem devido à falta de informação para gerar um produto completo. Considerando o desnível do terreno e uma baixa taxa de recobrimento de 60%/40%, a ortoimagem gerada resultou em falta de detalhes, como nas bordas dos telhados e nas demais feições acima do solo. A Figura 27 apresenta a região avaliada, a Figura 27a apresenta a ortoimagem gerada a taxas de recobrimento de 90%/80%, a Figura 27b apresenta a ortoimagem gerada a taxas de 80%/60%, a Figura 27c a taxas de 70%/60%, a Figura 27d a taxas de recobrimentos 70%/40%, a Figura 27e a taxas de recobrimentos 60%/60% e a Figura 27f a taxas de recobrimentos 60%/40%.

Figura 27. Influência do recobrimento de imagens na geração de ortoimagens.









As Figuras ilustram uma mesma construção presente nas ortoimagens geradas a diferentes taxas de recobrimento. A Figura 27a apresenta a melhor qualidade visual, nota-se que a taxas de 90%80% é possível identificar perfeitamente as bordas do telhado. Nota-se também, a depreciação da qualidade nas diferentes

taxas de recobrimento. A pior qualidade visual é referente à ortoimagem gerada a taxas de recobrimento de 60%/40% (Figura 27f), na qual a falta de informação é expressa em falhas na ortoimagem.

Segundo Oliveira *et al.* (2018), para a geração de uma ortoimagem verdadeira “*true ortho*” (ortoimagem livre de oclusões e de duplo mapeamento com uma escala única), um procedimento para detecção em compensação das oclusões por meio da utilização de imagens adjacentes do plano de voo seguido por um ajustamento de cor se faz necessário.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho demonstrou a utilização de um VANT para aquisição de imagens aéreas visando a geração de produtos cartográficos digitais. Em relação a utilização de um VANT para a aquisição de imagens, alguns pontos devem ser levados em consideração, como: a capacidade a carga, autonomia da bateria – que tem como consequência uma menor área mapeada, a legislação vigente para o acesso ao espaço aéreo, e o uso de sensores de baixo custo e que possuem baixa precisão. Em relação as vantagens deste tipo de plataforma, tem-se uma melhor resolução espacial e temporal, o baixo custo de aquisição e manutenção, o alto nível de automação, e a flexibilidade no pouso, decolagem e em manobras aéreas.

Em síntese, após as análises dos resultados, chega-se a diversas conclusões em relação ao processamento fotogramétrico sob diferentes configurações utilizando imagens obtidas pelo VANT Phantom 4 Advanced.

Com base nos resultados obtidos nos experimentos de calibração de câmara, pode-se concluir que, por mais que o processo de calibração de câmara se faça necessário com uma maior frequência para uma câmara não-métrica, os resultados demonstram que a câmara digital FC6130 é um tanto quanto estável. Portanto, a fototriangulação pode ser realizada aplicando-se a calibração em serviço com parâmetros adicionais, sendo determinados simultaneamente os POI, POE e as coordenadas dos *tie points*, ao invés da utilização de um campo de calibração ou outros métodos de calibração. Neste trabalho, conclui-se que para o equipamento em questão, a diferença entre inserir um conjunto de POI pré-calibrados na fototriangulação e a calibração em serviço (fototriangulação com parâmetros adicionais) é a necessidade da utilização de mais alguns pontos de controle.

Com base nos resultados obtidos nos experimentos de pontos de controle, pode-se concluir que a quantidade de pontos aplicados no processamento tem relação direta com a qualidade final dos produtos gerados, tanto no processo de georeferenciamento indireto das imagens bem como no processo de calibração de câmara. Conclui-se que para o equipamento em questão, é necessária uma quantidade maior de pontos de controle para o georeferenciamento indireto das imagens bem como para a modelagem dos erros sistemáticos derivados do conjunto

de lentes da câmara digital. Por ser uma das etapas que possui maior custo, se faz necessário identificar o número ótimo de pontos de controle.

Com base nos resultados obtidos nos experimentos de altura de voo, pode-se concluir que levantamentos realizados a baixas alturas não apresentam grandes diferenças para os resultados planimétricos, porém, esta é inversamente proporcional a qualidade posicional dos MDTs. Além disso, deve-se levar em consideração as feições acima do solo devido ao processo de correspondência de imagens. Nota-se que ao elevar a altura de voo, pior qualidade visual é obtida, porém, maior é a área levantada. Essa relação entre resolução espacial e área a ser mapeada deve ser levada em consideração devido, principalmente, a autonomia dos VANTs.

Com base nos resultados obtidos nos experimentos de recobrimento de imagens, pode-se concluir que as taxas de recobrimento estão diretamente relacionadas a quantidade de *tie points* gerados. Por um lado, é possível obter mais *tie points*, melhor qualidade visual da ortoimagem e melhor qualidade posicional dos MDTs a maiores taxas de recobrimento. Por outro lado, nota-se um custo computacional muito alto. Além disso, conclui-se que a variação da altura não apresentou diferenças na qualidade posicional das ortoimagens, ao contrário da qualidade posicional dos MDTs.

A partir da análise dos resultados obtidos, sugere-se uma configuração para a geração de produtos Classe A para a escala de 1:500 para a planimetria e 1:1.000 para a altimetria dos pontos cotados (com equidistância entre curvas de nível de 0,50m), sendo: 5 pontos de controle para georreferenciamento indireto utilizando POI pré-calibrados e 8 pontos de controle para o processo de fototriangulação com parâmetros adicionais (calibração em serviço); taxa de recobrimento de imagens de 80% longitudinal e de 60% lateral; e altura de voo de 31m. Os produtos gerados podem ser aplicados em plantas cadastrais municipais, atendendo os pré-requisitos para as mais diversas aplicações na engenharia civil e transportes, servindo de base aos cadastros infraestrutura urbana (água, esgoto, drenagem, pavimentação, força e luz, telefone, gás, etc.).

Para trabalhos futuros, recomenda-se: Em relação ao método de calibração de câmara em serviço, aplicar diferentes alturas de voo bem como a utilização de imagens oblíquas e não somente verticais (nadir); Investigar se o levantamento realizado em terreno mais acidentado conduz aos mesmos resultados obtidos em terreno com característica de plano inclinado; Investigar se a calibração em serviço

apresenta os mesmos resultados finais obtidos com o Agisoft Metashape utilizando outros *software* fotogramétricos, como por exemplo: Pix4DMapper, 3DF Zephyr, VisualSfM, Bentley ContextCapture, PhotoModeler, Trimble Inpho, etc.; Validar a configuração proposta neste trabalho em uma outra área com características similares à área em estudo; e Estudar os métodos de avaliação de precisão posicional a partir de feições lineares extraídas das ortoimagens e compará-las com o método de avaliação pontual.

Finalmente, como contribuição, o estudo demonstrou a influência de 4 parâmetros na geração ortoimagens e MDTs e como os resultados se comportam à diferentes configurações de calibração de câmara, número de pontos de controle, recobrimento de imagens, e altura de voo. É importante salientar que não é possível garantir os mesmos resultados quando são aplicados outros tipos de VANTs, ou realizando o processamento dos dados utilizando outro *software* fotogramétrico ou mapeando áreas com diferentes aspectos (em relação à declividade e feições distintas). Contudo, essa influência pode ser considerada similar a outros VANTs e *software* fotogramétricos, mas com variações em magnitude.

## REFERÊNCIAS

AGÜERA-VEGA, F.; CARVAJAL-RAMÍREZ, F.; MARTÍNEZ-CARRICONDO, P. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 98, p. 221–227, 2017a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.002>

AGÜERA-VEGA, F.; CARVAJAL-RAMÍREZ, F.; MARTÍNEZ-CARRICONDO, P. Accuracy of digital surface models and orthophotos derived from unmanned aerial vehicle photogrammetry. **Journal of Surveying Engineering**, v. 143, n. 2, p. 04016025, 2017b. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000206](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000206)

AHMAD, M. J.; AHMAD, A.; KANNIAH, K. D. Large scale topographic mapping based on unmanned aerial vehicle and aerial photogrammetric technique. *In: 9th IGRSM International Conference and Exhibition on Geospatial & Remote Sensing (IGRSM 2018) 24–25 Abril, Kuala Lumpur, Malaysia, 2018. Proceedings [...]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 169, n. 1, p. 012077, 2018.. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/169/1/012077>

AL-RAWABDEH, A.; MOUSSA, A.; FOROUTAN, M.; EL-SHEIMY, N.; HABIB, A. Time series UAV image-based point clouds for landslide progression evaluation applications. **Sensors (Switzerland)**, v. 17, n. 10, p. 2378, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17102378>

ALSPAUGH, D. A brief history of Photogrammetry. *In: McGLONE, J. C.; E. MIKHAIL; BETHEL, J (Eds.) Manual of photogrammetry*. 5. ed. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, p. 1-12. 2004.

ARONOFF, S. The minimum accuracy value as an index of classification accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 51, n. 1, p. 99-111, 1985.

ASPRS. Accuracy Standards for Large-scale Maps. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 56, n. 7, p. 1068-1070, 1990.

ASPRS. Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 79, n. 12, p. 1073–1085, 2013.

ASPRS. Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, n. 81, v. 3, p. 53, 2015.

BAY, H.; TUYTELAARS, T.; VAN GOOL, L. Surf: Speeded up Robust Features. *In*: 9th European Conference on Computer Vision, Graz, Austria, May 7-13, 2006. **Proceedings** [...]. Computer Vision – ECCV 2006, Springer, p. 404–417, 2006.

BOLKAS, D. Assessment of GCP number and separation distance for small UAS surveys with and without GNSS-PPK positioning. **Journal of Surveying Engineering**, v. 145, n. 3, p. 04019007, 2019. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000283](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000283)

BRASIL. **Decreto-lei nº 1.177, de 21 de Junho de 1971**. Dispõe sobre aerolevantamentos no território nacional, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1971. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Decreto-Lei/1965-1988/De1177.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Decreto-Lei/1965-1988/De1177.htm). Acesso em: 5 de jul. 2020.

BRASIL. **Decreto nº 84.557, de 12 de Março de 1980**. Regulamenta o Decreto-Lei nº 1.177, de 21 de junho de 1971, que dispõe sobre aerolevanteamento no território nacional e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1980. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1980-1987/decreto-84557-12-marco-1980-433880-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acesso em: 5 de jul. 2020.

BRASIL. **Decreto-lei nº 89.817, de 20 de Junho de 1984**. Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Brasília, DF: Presidência da República, 1984. Disponível em:

<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1980-1987/decreto-89817-20-junho-1984-439814-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acesso em: 5 de jul. 2020.

BRASIL. **Lei nº 7.565, de 19 de Dezembro de 1986**. Dispõe sobre o Código Brasileiro de Aeronáutica. DF: Presidência da República, 1986. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L7565.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L7565.htm). Acesso em: 5 de jul. 2020.

BRASIL. **Decreto nº 2.278, de 17 de Julho de 1997**. Regulamenta o Decreto-Lei nº 1.177, de 21 de junho de 1971, que dispõe sobre aerolevantamentos no território nacional e dá outras providências. DF: Presidência da República, 1997. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/D2278.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D2278.htm). Acesso em: 5 de jul. 2020.

BRASIL. **Lei nº 9.472, de 16 de Julho de 1997**. Dispõe sobre a organização dos serviços de telecomunicações, a criação e funcionamento de um órgão regulador e outros aspectos institucionais, nos termos da Emenda Constitucional nº 8, de 1995. Brasília, DF: Presidência da República, 1997. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9472.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9472.htm). Acesso em: 5 de jul. 2020.

BRASIL. **Lei nº 11.182, de 27 de Setembro de 2005**. Cria a Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC, e dá outras providências. DF: Presidência da República, 2005. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Ato2004-2006/2005/Lei/L11182.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Ato2004-2006/2005/Lei/L11182.htm). Acesso em: 5 de jul. 2020.

BRASIL. **Decreto nº 6.666, de 27 de Novembro de 2008**. Institui, no âmbito do Poder Executivo federal, a Infra-Estrutura Nacional de Dados Espaciais - INDE, e dá outras providências. DF: Presidência da República, 2008. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Ato2007-2010/2008/Decreto/D6666.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Ato2007-2010/2008/Decreto/D6666.htm). Acesso em: 5 de jul. 2020.

BRASIL. **Exército Brasileiro. Especificação Técnica Para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV)**. DF: Secretaria Geral do Exército, Diretoria de Serviço Geográfico. 2011. Disponível em:

[http://www.geoportal.eb.mil.br/portal/images/PDF/ET\\_ADGV\\_Vs\\_2\\_1\\_3.pdf](http://www.geoportal.eb.mil.br/portal/images/PDF/ET_ADGV_Vs_2_1_3.pdf). Acesso em: 5 de jul. 2020.

BRASIL. **Norma da Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG)**. Brasília: DSG, 94 p. 2016. Disponível em: [http://www.geoportal.eb.mil.br/portal/images/PDF/ET\\_CQDG\\_1a\\_edicao\\_2016.pdf](http://www.geoportal.eb.mil.br/portal/images/PDF/ET_CQDG_1a_edicao_2016.pdf). Acesso em: 5 de jul. 2020.

BRASIL. **Portaria Normativa nº 101, de 26 de Dezembro de 2018**. Dispõe sobre os procedimentos para a atividade de aerolevanteamento no território nacional e dá outras providências. DF: Ministério da Defesa, 2018. Disponível em: [http://www.in.gov.br/materia//asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/57221160/d\\_o1-2018-12-28-portaria-normativa-n-101-gm-md-de-26-de-dezembro-de-2018-57220914](http://www.in.gov.br/materia//asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/57221160/d_o1-2018-12-28-portaria-normativa-n-101-gm-md-de-26-de-dezembro-de-2018-57220914). Acesso em: 05 de jul. 2020.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro ICA 100-40**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=5250>. Acesso em: 05 de jul. 2020.

BRITO, J.; COELHO, L. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: EdUERJ, p. 196, 2007.

BROWN, D. C. Close-range camera calibration. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 37, n. 8, p. 855-866, 1971.

CAMPOS, M. B.; TOMMASELLI, A. M. G.; MORAES, M. V. A.; MARCATO JUNIOR, J. Análise comparativa dos resultados obtidos pelos métodos de calibração de campo tridimensional e bidimensional. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 2, p. 308–328, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702015000200018>

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 (Switzerland)**, v. 12, n. 7, p. 9161-9180, 2012. DOI: <https://doi.org/10.3390/s120709161s>

CHIANG, K. W.; TSAI, M. L.; NASER, E. S.; HABIB, A.; CHU, C. H. A New calibration method using low cost MEM IMUs to verify the performance of UAV-borne MMS payloads. **Sensors (Switzerland)**, v. 15, n. 3, p. 6560–6585, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/s150306560>

COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 92, p. 79–97, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>

DALMOLIN, Q.; LEAL, E. M. Análise da Qualidade Posicional em Bases Cartográficas Geradas em CAD. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 7, n. 1, p.21-40, 2001.

DANDOIS, J. P.; OLANO, M.; ELLIS, E. C. Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision UAV estimates of forest structure. **Remote Sensing**, v. 7, n. 10, p. 13895–13920, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs71013895>

DE LA ESCALERA, A.; ARMINGOL, J. M. Automatic chessboard detection for intrinsic and extrinsic camera parameter calibration. **Sensors**, v. 10, n. 3, p. 2027–2044, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3390/s100302027>

DEBIASI, P.; HAINOSZ, F.; MITISHITA, E. A. Calibração em serviço de câmara digital de baixo custo com o uso de pontos de apoio altimétrico. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 18, n. 2, p. 225–241, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1982-21702012000200004>

DOMINGO, D.; ØRKA, H. O.; NÆSSET, E.; KACHAMBA, D.; GOBAKKEN, T. Effects of UAV image resolution, camera type, and image overlap on accuracy of biomass predictions in a tropical woodland. **Remote Sensing**, v. 11, n. 8, p. 948, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11080948>

DOUTERLOIGNE, K.; GAUTAMA, S.; PHILIPS, W. Fully automatic and robust UAV camera calibration using chessboard patterns. *In: 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, South Africa, 2009. Proceedings [...]. IEEE, Cape Town, p. 551-554, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2009.5418141>*

DOYLE, F. The Historical Development of Analytical Photogrammetry. **Photogrammetric Engineering**, v. 30, n. 2, p. 259–265, 1964.

EISENBEISS, H.; SAUERBIER, M. Investigation of UAV systems and flight modes for photogrammetric applications. **The Photogrammetric Record**, v. 26, n. 136, p. 400–421, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2011.00657.x>

FLAMMINI, F.; PRAGLIOLA, C.; SMARRA, G. Railway infrastructure monitoring by drones. *In: 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), 2016, Toulouse, France. Proceeding [...]. Toulouse, IEEE, p. 1-6, 2016.*

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.

FURUKAWA, Y.; PONCE, J. Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. **IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence**, v. 32, n. 8, p. 1362-1376, 2009.

GALO, M.; CAMARGO, P. D. O. O uso do GPS no controle de qualidade de cartas. *In: 1º COBRAC - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, Tomo II, 1994, p. 41-48, Florianópolis – SC. Anais [...]. Florianópolis, 1994. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1790.1603>*

GALO, M.; TOMMASELLI, A. M. G. Calibração de câmaras. In: Piteri, Marco A.; Rodrigues, José C. (Org.). **Fundamentos de visão computacional**. Presidente Prudente, Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP. p. 53-112. 2011.

GEIGER, A.; MOOSMANN, F.; CAR, Ö.; SCHUSTER, B. Automatic camera and range sensor calibration using a single shot. *In: 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Saint Paul, MN, USA, 14-18 May 2012. Proceedings [...]*. IEEE, Saint Paul, p. 3936-3943, 2012.

GERKE, M.; PRZYBILLA, H. J. Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. **Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation**, v. 2016, n. 1, p.17-30, 2016.

GERK, M. Developments in UAV-photogrammetry. **Journal of Digital Landscape Architecture**, v. 3, p. 262-272, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14627/537642028>

GHILANI, C. D.; WOLF, P. R. **Adjustment computations: spatial data analysis**. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ. 2006.

GÓMEZ-CANDÓN, D.; DE CASTRO, A. I.; LÓPEZ-GRANADOS, F. Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat. **Precision Agriculture**, v. 15, n. 1, p. 44–56, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9335-4>

GONÇALVES, J. A.; BASTOS, L.; MADEIRA, S.; MAGALHÃES, A.; BIO, B. Three-dimensional data collection for coastal management—efficiency and applicability of terrestrial and airborne methods. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 24, p. 9380–9399, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1523591>

GONZÁLEZ-QUIÑONES, J.; REINOSO-GORDO, J.; LEÓN-ROBLES, C.; GARCÍA-BALBOA, J.; ARIZA-LÓPEZ, F. Variables influencing the accuracy of 3D modeling of existing roads using consumer cameras in aerial photogrammetry. **Sensors (Switzerland)**, v. 18, n. 11, p.3880, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18113880>

GREENWOOD, W. W.; LYNCH, J. P.; ZEKOS, D. Applications of UAVs in civil infrastructure. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 25, n. 2, p. 04019002, 2019. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000464](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000464)

HAMID, N. A.; AHMAD, A. Calibration of high-resolution digital camera based on different photogrammetric methods. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 18, n. 1, p. 012030, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012030>

ISENBURG, M. **LASTOOLS: Software for rapid converting, filtering, viewing, gridding, and compressing of LIDAR.** Disponível em: <http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/>. Acesso em 10 de out. de 2020.

JAMES, M. R.; ROBSON, S.; SMITH, M. W. 3-D uncertainty-based topographic change detection with Structure-from-Motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 42, n. 12, p. 1769–1788, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.4125>

JAUD, M.; PASSOT, S.; LE BIVIC, R.; DELACOURT, C.; GRANDJEAN, P.; LE DANTEC, N. Assessing the accuracy of high-resolution digital surface models computed by PhotoScan® and MicMac® in sub-optimal survey conditions. **Remote Sensing**, v. 8, n. 6, p. 465, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8060465>

KRAFT, T., GESSNER, M., MEIBNER, H., CRAMER, M., PRZYBILLA, H.J. AND GERKE, M., 2016. Evaluation of a metric camera system tailored for high precision UAV applications. *In: XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic. Proceedings [...]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B1, Prague, 2016.*

KRAUS, K. **Photogrammetry – Geometry from images and laser scans.** 2. ed. Berlin: Walter de Gruyter. 2007. 448 p.

LIM, K.; TREITZ, P.; WULDER, M.; ST-ONGE, B.; FLOOD, M. LiDAR remote sensing of forest structure. **Progress in Physical Geography**, v. 27, n. 1, p. 88-106, 2033. DOI: <https://doi.org/10.1191/0309133303pp360ra>

LOWE, D. G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. **International journal of computer vision**, v. 60, n. 2, p. 91–110, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>

MADAWALAGAMA, S. L.; MUNASINGHE, N.; DAMPEGAMA, S. D. P. J.; SAMARAKOON, L. Low cost aerial mapping with consumer-grade drones. *In: 37<sup>o</sup> Asian Conference on Remote Sensing, Colombo, 2016. Proceedings [...].* Colombo, 2016.

MARTÍNEZ-CARRICONDO, P.; AGÜERA-VEGA, F.; CARVAJAL-RAMÍREZ, F.; MESAS-CARRASCOSA, F. J.; GARCÍA-FERRER, A.; PÉREZ-PORRAS, F. J. Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 72, p. 1–10, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.015>

MAURICE, M.J., KOEVA, M.N., GERKE, M., NEX, F. AND GEVAERT, C. A photogrammetric approach for map updating using UAV in Rwanda. *In: The GeoTechRwanda, Kigali, Rwanda, 18-20 November, 2015. Proceedings [...].* Rwanda, p. 1-16. 2015.

MERCHANT, D. C. Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps. *In: American Congress on Surveying and Mapping*, v. 1, 1982. **Proceedings [...].** Technical Papers of the American Congress on Surveying and Mapping, 1982.

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

MILLER, S. Photogrammetric products. *In: McGLONE, J. C.; E. MIKHAIL; BETHEL, J. (Eds.) Manual of photogrammetry*. 5<sup>o</sup> ed. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, p. 983-1013, 2004.

MONICO, J. F. G.; DAL POZ, A. P.; GALO, M.; DOS SANTOS, M. C.; DE OLIVEIRA, L. C. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 3, p. 469-483, 2009.

MONTGOMERY D. C; RUNGER G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 6th ed. USA John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, 2013, 811p.

OLIVEIRA, R. A.; TOMMASELLI, A. M. G. Geração automática de Modelos Digital de Superfície utilizando múltiplas imagens. *In*: III Simpósio Brasileiro de Geomática, 2012, Presidente Prudente. **Anais [...]**. Presidente Prudente: III SGB, 2012. v. 1. p. 193-198.

OLIVEIRA, H. C.; GALO, M.; POZ, A. P. D. Height-gradient-based method for occlusion detection in true orthophoto generation. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 12, n. 11, p. 2222–2226, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2459671>

OLIVEIRA, H. C.; GUIZILINI, V. C.; NUNES, I. P.; SOUZA, J. R. Failure detection in row crops from UAV images using morphological operators. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 15, n. 7, p. 991–995, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2819944>

ONIGA, V. E.; PFEIFER, N.; LOGHIN, A.-M. 3D calibration test-field for digital cameras mounted on unmanned aerial systems (UAS). **Remote Sensing**, v. 10, n. 12, p. 2017, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10122017>

ONIGA, V. E.; BREABAN, A. I.; PFEIFER, N.; CHIRILA, C. Determining the suitable number of ground control points for UAS images georeferencing by varying number and spatial distribution. **Remote Sensing**, v. 12, n. 5, p. 876, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12050876>

PATIAS, P.; GIAGKAS, F.; GEORGIADIS, C.; MALLINIS, G.; KAIMARIS, D.; TSIΟΥKAS, V. Evaluating horizontal positional accuracy of low-cost UAV orthomosaics over forest terrain using ground control points extracted from different

sources. *In*: Fifth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2017), Paphos, Cyprus, 2017. **Proceedings** [...]. SPIE Proceedings 104440U, Paphos, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2278008>

PÉREZ, M.; AGÜERA, F.; CARVAJAL, F. Digital camera calibration using images taken from an Unmanned Aerial Vehicle. *In*: International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g), 14-16 Sep, Zurich, Prague, 2012. **Proceedings** [...]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. XXXVIII-1/C22, Zurich, p. 167–171, 2012.

PRZYBILLA, H.J.; GERKE, M.; DIKHOFF, I.; GHASSOUN, Y. Investigations on the geometric quality of cameras for UAV applications using the high-precision UAV test field Zollern colliery. *In*: 2019 ISPRS Geospatial Week 2019, 10–14 June 2019, Enschede, The Netherlands, 2019. **Proceedings** [...]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, XLII-2/W13, p. 531-538, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-531-2019>

RANGEL, J. M.G.; GONÇALVES, G.R.; PÉREZ, J.A. The impact of number and spatial distribution of GCPs on the positional accuracy of geospatial products derived from low-cost UASs. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 21, p. 7154–7171, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1515508>

REMONDINO, F.; FRASER, C. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. *In*: ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology', Dresden, 25-27 September, 2006. **Proceedings** [...]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 36, n. 5, p. 266–272, 2006.

REMONDINO, F.; BARAZZETTI, L.; NEX, F.; SCAIONI, M.; SARAZZI, D. UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling: current status and future perspectives. *In*: The International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g) 14–16 September, Zurich, Switzerland, 2011. **Proceedings** [...]. International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII-

1/C22, p. 25–31, 2011. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-25-2011>

REMONDINO, F.; SPERA, M.G.; NOCERINO, E.; MENNA, F.; NEX, F. State of the art in high density image matching. **The photogrammetric record**, v. 29, n. 146, p. 144-166, 2014.

REMONDINO, F.; NOCERINO, E.; TOSCHI, I.; MENNA, F. A critical review of automated photogrammetric processing of large datasets. *In*: ICOMOS/ISPRS International Scientific Committee on Heritage Documentation (CIPA) - 26th International CIPA Symposium – Digital Workflows for Heritage Conservation, 28 August–1 September, Ottawa, Canada, 2017. **Proceedings** [...]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 62W5, p. 591–599, 1 ago. 2017. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-591-2017>

RIDOLFI, E.; BUFFI, G.; VENTURI, S.; MANCIOLA, P. Accuracy analysis of a dam model from drone surveys. **Sensors (Switzerland)**, v. 17, n. 8, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17081777>

ROSTEN, E.; DRUMMOND, T. Machine Learning for High-Speed Corner Detection. In ECCV; Leonardis, A.; Bischof, H.; Pinz, A. (eds). Computer Vision - ECCV. Lecture Notes in Computer Science; **Springer**, 2006; Vol. 3951, pp 430–443. DOI: [https://doi.org/10.1007/11744023\\_3](https://doi.org/10.1007/11744023_3)

SANTOS, S. D. R.; HUINCA, S. C. M. Considerações sobre a utilização do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) nos dias atuais. *In*: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 27-30 de Julho, Recife, Pernambuco, 2010. **Anais** [...]. Recife, Pernambuco, p. 1-5, 2010.

SANZ-ABLANEDO, E.; CHANDLER, E.; RODRÍGUEZ-PÉREZ, J. H.; 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. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10101606>

SCHENK, T. Towards Automatic Aerial Triangulation. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 52, n. 3, p. 110–121, 1997.

SIEBERT, S.; TEIZER, J. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an unmanned aerial vehicle (UAV) system. **Automation in Construction**, v. 41, p. 1–14, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.01.004>

STÖCKER, C.; BENNETT, R.; NEX, F.; GERKE, M.; ZEVENBERGEN, J. Review of the current state of UAV regulations. **Remote Sensing**, v. 9, n. 5, p. 459, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9050459>

SUN, P.; LU, N. G.; DONG, M. L.; YAN, B. X.; WANG, J. Simultaneous all-parameters calibration and assessment of a stereo camera pair using a scale bar. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 18, n. 11, p. 3964. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18113964>

TAHAR, K. N.; AHMAD, A. An evaluation on fixed wing and multi-rotor UAV images using photogrammetric image processing. **International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering**, v. 7, n. 1, p. 48-52, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1078074>

TOMMASELLI, A. M. G; LOPES, R. F; MARQUES, A. P. S. Desenvolvimento de uma Estratégia para a Medição Automática de Pontos Homólogos em Fototriangulação. *In: II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Presidente Prudente, SP, 2007. Anais [...]. Presidente Prudente, SP: Universidade Estadual Paulista, 2007. v. 1. p. 646-654, 2007.*

TONKIN, T. N.; MIDGLEY, N. G. Ground-control networks for image-based surface reconstruction: an investigation of optimum survey designs using UAV derived Imagery and structure-from-motion photogrammetry. **Remote Sensing**, v. 8, n. 9, p. 786, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8090786>

TORRES-SÁNCHEZ, J.; LÓPEZ-GRANADOS, F.; BORRA-SERRANO, I.; PEÑA, J. M. Assessing UAV-collected image overlap influence on computation time and digital

surface model accuracy in olive orchards. **Precision Agriculture**, v. 19, n. 1, p. 115–133, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9502-0>

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. DOI: <https://doi.org/doi:10.1109/TGRS.2013.2265295>

UDIN, W. S.; AHMAD, A. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation flying altitude using unmanned aerial vehicle. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 18, p. 012027, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012027>

VACCA, G.; FURFARO, G.; DESSÌ, A. The use of the UAV images for the building 3D model generation. In: **International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives**, v. XLII-4/W8, p.217-223, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W8-217-2018>

VOSSEMAN, G.; SESTER, M.; HELMUT, M. Basic computer vision techniques. In: McGLONE, J. C.; E. MIKHAIL; BETHEL, J (Eds.) **Manual of photogrammetry**. 5. ed. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, p. 455-499. 2004.

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.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry – with applications in GIS**. 3. ed. USA: McGraw-Hill, 2004. 608 p.

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. DOI: <https://doi.org/10.1109/34.888718>

**APÊNDICE A – Coordenadas dos marcos geodésicos cedidos pelo LTG  
– UTM SIRGAS2000 (-23S)**

Marco	E (m)	N (m)	h (m)	Std Dev n (m)	Std Dev e (m)	Std Dev u (m)
LTG1	288320,431	7475348,931	614,250	0,001	0,002	0,008
LTG2	288341,806	7475286,114	615,768	0,001	0,002	0,008
LTG3	288411,720	7475267,090	620,178	0,002	0,003	0,009
LTG4	288404,390	7475398,769	620,635	0,002	0,003	0,008
LTG5	288298,424	7475280,840	613,020	0,001	0,002	0,008
LTG11	288634,421	7475148,644	639,442	0,001	0,002	0,009
LTG12	288627,646	7475288,396	639,772	0,001	0,002	0,009
LTG13	288640,190	7475391,175	639,825	0,001	0,002	0,009

**APÊNDICE B – Coordenadas dos marcos geodésicos implantados–  
UTM SIRGAS2000 (-23S)**

Marco	E (m)	N (m)	h (m)	Std Dev n (m)	Std Dev e (m)	Std Dev u (m)
MR01	288474,968	7475143,850	626,140	0,004	0,006	0,016
MR02	288511,980	7475286,391	628,385	0,002	0,003	0,017
MR03	288510,565	7475425,006	628,172	0,004	0,004	0,018
MR04	288296,257	7475136,020	606,628	0,002	0,004	0,013

**APÊNDICE C – Coordenadas dos pontos levantados – UTM  
SIRGAS2000 (-23S)**

ID	E (m)	N (m)	h (m)	ID	E (m)	N (m)	h (m)
1	288643,318	7475136,985	639,805	29	288472,117	7475165,839	626,050
2	288644,894	7475154,306	639,933	30	288507,734	7475170,063	628,964
3	288652,571	7475171,108	641,316	31	288542,386	7475198,886	631,981
4	288674,178	7475188,048	641,377	32	288510,133	7475210,070	628,648
5	288663,516	7475209,779	641,599	33	288468,740	7475206,114	626,325
6	288640,340	7475208,933	639,336	34	288505,390	7475262,171	626,651
7	288616,829	7475181,476	638,001	35	288545,230	7475263,538	632,066
8	288599,408	7475142,729	636,670	36	288580,945	7475268,978	634,911
9	288642,143	7475317,057	640,423	37	288582,192	7475291,124	634,877
10	288652,312	7475300,036	640,441	38	288545,661	7475295,788	632,173
11	288654,653	7475274,205	641,184	39	288512,245	7475289,200	628,457
12	288668,263	7475240,133	641,603	40	288486,870	7475290,384	626,684
13	288644,234	7475249,009	639,860	41	288492,407	7475312,603	627,157
14	288629,569	7475225,753	639,374	42	288511,156	7475239,777	628,502
15	288598,888	7475211,935	638,922	45	288511,459	7475339,423	628,412
16	288601,923	7475260,136	639,950	46	288509,773	7475367,733	628,379
17	288613,234	7475287,109	639,060	47	288503,828	7475403,407	626,455
18	288607,824	7475301,548	640,694	49	288469,928	7475312,240	626,557
19	288630,130	7475383,903	638,865	50	288477,545	7475401,389	625,795
20	288633,966	7475356,258	640,382	51	288494,759	7475428,817	626,947
22	288669,405	7475373,813	642,642	52	288537,349	7475416,873	630,324
23	288674,709	7475347,557	644,863	53	288545,349	7475385,115	631,701
24	288696,650	7475350,478	645,865	54	288546,294	7475350,529	632,017
25	288696,777	7475373,032	645,124	55	288546,805	7475319,881	632,142
26	288480,331	7475144,659	626,582	56	288563,800	7475229,132	633,811
27	288509,666	7475146,210	629,204	57	288549,165	7475178,386	632,450
28	288564,476	7475136,398	633,782	58	288580,650	7475321,078	635,229
60	288587,498	7475362,591	635,409	59	288573,903	7475349,362	634,343
61	288597,166	7475389,016	635,827	402	288332,312	7475330,847	615,145
81	288318,967	7475137,988	609,382	406	288360,493	7475364,541	618,729
84	288345,237	7475140,078	612,337	408	288348,188	7475383,780	616,746
86	288374,891	7475140,574	615,603	410	288391,218	7475411,331	619,868
87	288374,895	7475140,577	615,581	412	288373,488	7475332,200	619,780
91	288398,211	7475140,493	618,120	414	288422,387	7475415,257	621,734

93	288434,734	7475142,784	622,066	416	288398,822	7475390,029	620,304
222	288313,452	7475238,267	612,064	600	288317,095	7475388,228	613,734
224	288317,144	7475278,764	613,258	601	288449,068	7475387,869	624,502
226	288325,724	7475256,967	614,357	602	288364,157	7475425,394	618,067
301	288356,821	7475273,241	616,093	603	288418,366	7475357,842	621,664
304	288373,606	7475273,588	616,246	604	288466,230	7475352,075	626,148
309	288366,688	7475301,182	616,006	606	288446,728	7475288,852	623,520
311	288332,303	7475330,841	615,156	607	288453,426	7475267,181	624,207
313	288341,099	7475298,101	615,479	608	288420,793	7475260,590	621,249
315	288342,655	7475305,157	615,586	PARE2	288295,921	7475160,336	607,088
				PARE4	288308,664	7475205,691	610,089