

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

JORGE AUGUSTO DALMOLIN

AVALIAÇÃO DO USO DA FOTOGRAMETRIA DIGITAL EM LEVANTAMENTOS
TOPOGRÁFICOS

Joinville

2018

JORGE AUGUSTO DALMOLIN

AVALIAÇÃO DO USO DA FOTOGRAMETRIA DIGITAL EM LEVANTAMENTOS
TOPOGRÁFICOS

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Yader Alfonso Guerrero Pérez.

Coorientador: Me. Davi Schweitzer.

Joinville

2018

JORGE AUGUSTO DALMOLIN

**AVALIAÇÃO DO USO DA FOTOGRAMETRIA DIGITAL EM LEVANTAMENTOS
TOPOGRÁFICOS**

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, novembro de 2018.

Dra. Valéria Bennack
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Dr. Yader Alfonso Guerrero Pérez
Orientador

Dr. Breno Salgado Barra
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Leto Momm
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Luiz Henrique Teixeira

Membro

CBB Asfaltos/ Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais, alicerces de toda minha formação.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente.

Aos meus pais, Meri e Luiz, maior fonte de inspiração de minha trajetória acadêmica, pelo amor, estímulo e apoio incondicional, por estarem sempre presentes.

Ao meu orientador Dr. Yader, por confiar em mim a realização deste trabalho, e principalmente pela liberdade de alçar voos em busca de meus objetivos.

A minha namorada Priscila, por não medir esforços em me acompanhar para que esse trabalho fosse bem-sucedido, desde a fabricação dos alvos fotogramétricos, quanto nas idas a campo na distante Curva do Arroz, até as inacabáveis revisões de texto.

Aos companheiros serranos José e Lauro pela força desprendida nas idas a campo e pela forte e sincera amizade.

Aos jovens contemporâneos do curso de engenharia de infraestrutura, e agora engenheiras Claudia, Daiana, Eduarda, Mayara, Nicole e Thayara, pela amizade e a companhia nesses tantos anos de academia, cada conquista conta com o incentivo de vocês.

A GeoSky Aerolevantamentos e Engenharia, por toda consultoria prestada agilidade e comprometimento com este trabalho.

RESUMO

A fotogrametria digital tem como propósito a reconstrução de um espaço tridimensional, a partir de um conjunto de imagens bidimensionais provenientes da gravação de padrões de ondas eletromagnéticas, através de sensores ou câmeras fotográficas. É uma ciência aplicada com sucesso, há pelo menos três décadas, e exprime seus resultados na forma de mapas, listas de coordenadas, modelos digitais ou qualquer outro modo de representação geometricamente classificado dentro de tolerâncias e critérios de precisão e acurácia. Com a fomentação do uso de veículos aéreos não tripulados (VANTS) e a sua crescente utilização nas mais diversas práticas de engenharia civil e cartográfica, bem como o desenvolvimento e a popularização de sensores e câmeras com melhor resolução, esta pesquisa propõe, avaliar desempenho da aplicação de técnicas de fotogrametria digital em imagens capturadas a partir de um VANT, em comparação com informações estabelecidas por técnicas de aferição convencionais. Classificando os resultados obtidos de acordo com os padrões vigentes no país, sendo os produtos fotogramétricos estabelecidos classificados como sendo CLASSE A do Padrão de Exatidão Cartográfico Brasileiro, produzindo ajuste centimétrico nos três eixos de orientação, para os voos realizados a 80 m e 120 m, atestando adequabilidade do uso do VANT DJI Phantom 4. Com os dados adquiridos através dos voos à 40 m verificou-se a necessidade de projeto específico, com implantação de um número maior de pontos de apoio e controle além planejamento mais detalhado de modo a tornar os procedimentos computacionais de processamento de imagens menos onerosos.

Palavras-chave: Fotogrametria. Topografia. VANT. PEC-PCD

ABSTRACT

Digital photogrammetry has as its purpose the reconstruction of a three-dimensional space, from a set of two-dimensional images from the recording of electromagnetic wave patterns, through sensors or photographic cameras. It has been a successfully applied science for at least three decades and expresses its results in the form of maps, coordinate lists, digital models or any other mode of representation geometrically classified within tolerances and criteria of precision and accuracy. With the promotion of the use of unmanned aerial vehicles (UAV) and its increasing use in the most diverse civil and cartographic engineering practices, as well as the development and popularization of sensors and better resolution cameras, this research proposes to evaluate performance of application of digital photogrammetry techniques in images captured from a UAV, in comparison with information established by conventional calibration techniques. Classifying the results obtained according to the standards in force in the country, being the established photogrammetric products classified as CLASS A of the Brazilian Cartographic Accuracy Standard, producing centimetric adjustment in the three orientation axes, for flights performed at 80 m and 120 m, attesting adequacy of the use of VANT DJI Phantom 4. With the data acquired through the flights at 40 m, the need for a specific project was verified, with the implementation of a greater number of points of control and more detailed planning in order to make the procedures computationally less costly.

Keywords: Photogrammetry. Topography. UAV. PEC-PCD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Propagação da Onda Eletromagnética	18
Figura 2 - Espectro Eletromagnético	19
Figura 3 - Reflexão especular (a) e Reflexão difusa (b).....	20
Figura 4 - Princípio da Câmara Escura.....	21
Figura 5 – CCD de uma câmera e sua localização	23
Figura 6 - Distribuição matricial (à direita), equivalente a um conjunto de pixels (à esquerda)	25
Figura 7 - Diferentes resoluções espaciais para uma mesma cena	26
Figura 8 - Diferentes resoluções radiométricas para uma mesma cena do satélite LANDSAT	26
Figura 9 - Fotografia vertical (à cima), fotografia oblíqua baixa (ao centro), fotografia Oblíqua alta (abaixo).....	29
Figura 10 - Sobreposição longitudinal e lateral.....	30
Figura 11 - Parâmetros para obtenção da Escala de voo	30
Figura 12 - Comparação entre a área de cobertura do voo fotogramétrico com a área efetivamente mapeada	33
Figura 13 - Analogia entre as dimensões do CCD e do Pixel para obtenção da altura de voo	34
Figura 14 - Modelo Digital do Terreno (à esquerda) e Modelo tridimensional Texturizado (à direita).....	37
Figura 15 – Modelo Digital Tridimensional da Ponte Hercílio Luz obtido a partir de técnicas fotogramétricas	38
Figura 16 – Mapa de saúde da vegetação em uma plantação de canola.....	38
Figura 17 - Terreno da Universidade Federal de Santa Catarina localizado na região sul de Joinville	42
Figura 18 - Área Selecionada para mapeamento fotogramétrico	43
Figura 19 - VANT DJI Phantom 4	44
Figura 20 - Plano de voo no aplicativo DroneDeploy para 120 m de sobrevoo.	45
Figura 21 - Plano de voo no aplicativo DroneDeploy para 80m de sobrevoo.	45
Figura 22 - Plano de voo no aplicativo DroneDeploy para 40 m de sobrevoo.	46
Figura 23 - Distribuição dos pontos de Apoio e Checagem.....	47
Figura 24 - Formatos recomendados para pré-sinalização fotogramétrica.....	48

Figura 25 - Alvo fotogramétrico e suas dimensões em centímetros.....	49
Figura 26 - Comparação entre o GSD calculado e o alvo fotogramétrico	49
Figura 27 - Alvos fotogramétricos instalados para teste	50
Figura 28 - Vista do aplicativo de Controle do VANT DJI GO.....	50
Figura 29 - Resultado da captura de imagens em voo de teste à diferentes alturas (a): 50 m (b): 100m (c):120m, para o Alvo 1	51
Figura 30 - Resultado da captura de imagens em voo de teste à diferentes alturas (a): 50 m (b): 100m (c):120m, para o Alvo 2 pré-sinalizado.....	52
Figura 31 - Instalação de Alvo fotogramétrico em campo vista em corte, e grampos de fixação	53
Figura 32 - Conjunto Alvo/Pré-sinalização.....	53
Figura 33 – Limpeza da área de instalação.....	55
Figura 34 – Cravação da estaca	55
Figura 35 – Fixação do elemento de sinalização 1	55
Figura 36 – Fixação do elemento de sinalização 2 Figura 37 - Centralização do alvo	56
Figura 38 – Reforços instalados	56
Figura 39 - Tomada de coordenadas com dispositivo	56
Figura 40 - Processo de decolagem (a)Vista do aplicativo de mapeamento, (b)Operador, (c)VANT em processo de subida.....	58
Figura 41 - (a) Base, (b) Rover.....	60
Figura 42 - Sobreposição de capturas em relação ao ponto de obtenção à 120 m	66
Figura 43 - Representação do erro relacionado ao posicionamento de cada captura à 120 m .	68
Figura 44- Mosaico de Ortoimagens obtidas à 120 m.....	71
Figura 45 - Modelo Digital de Elevação correspondente a superfície exposta a captura das imagens a 120 m.....	72
Figura 46 - Representação em Curvas de Nível a cada 1 m.....	73
Figura 47 - Representação Tridimensional Modelo Tiled.....	73
Figura 48 - Sobreposição de capturas em relação ao ponto de obtenção à 80 m	74
Figura 49 - Representação do erro relacionado ao posicionamento de cada captura à 80 m ..	75
Figura 50- Mosaico de Ortoimagens obtidas a 80 m.....	78
Figura 51 - Modelo Digital de Elevação Correspondente a superfície exposta a captura das imagens à 80 m.....	79
Figura 52 - Representação em Curvas de Nível a cada 1 m.....	80

Figura 53 - Representação Tridimensional Modelo Tiled.....	80
Figura 54 - Sobreposição de capturas em relação ao ponto de obtenção à 40 m	82
Figura 55 – Mosaico de Ortoimagens obtidas à 40m	83
Figura 56 - Modelo Digital de Elevação Correspondente a superfície exposta a captura das imagens à 40 m.....	84
Figura 57 - Representação em Curvas de Nível a cada 1 m.....	85
Figura 58 Comparativo da resolução espacial à diferentes alturas para o nível de zoom ideal -	87
Figura 59 – Alvo fotogramétrico identificado à uma altura de 40 m	87
Figura 60 - Comparativo da resolução espacial à diferentes alturas correspondentes ao mesmo nível de zoom	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação dos VANTS.....	31
Tabela 2 - Variação do GSD teórico com a altura de voo praticada (Equação 9).....	35
Tabela 3 - Precisão posicional de acordo com cada PEC.....	39
Tabela 4 - Padrão de exatidão Altimétrico dos produtos cartográficos digitais.....	40
Tabela 5- Resumos dos parâmetros de voos determinados	46
Tabela 7 – Resultados obtidos à 120m.....	67
Tabela 8- Erro em relação a posição de captura de cada imagem à 120 m.....	67
Tabela 9 - Avaliação do erro médio quadrático dos pontos de apoio. Dados obtidos à 120m	69
Tabela 10 - Avaliação do erro médio quadrático dos pontos de controle. Dados Obtidos a 120m.....	70
Tabela 11 - Parâmetros estatísticos e o Erro Padrão para o mapeamento a 120 m	70
Tabela 12 - Resultados obtidos à 80m.....	75
Tabela 13- Erro em relação a posição de captura de cada Imagem.....	76
Tabela 14 - Avaliação do erro médio quadrático dos pontos de apoio. Dados obtidos à 80m.	76
Tabela 15 - Avaliação do erro médio quadrático dos pontos de controle. Dados Obtidos a 80m	77
Tabela 16 - Parâmetros estatísticos e o Erro Padrão para o mapeamento a 80 m	77
Tabela 17 - Resultados obtidos à 40m.....	82
Tabela 18 – Comparativo do padrão de exatidão obtido para as diferentes alturas de voo e as resoluções espaciais correspondentes	86
Tabela 19 – Comparativo entre os parâmetros de processamento para diferentes alturas	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil
CCD – Charge Couple Device
CMA – Certificado Médico Aeronáutico
DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DER – Departamento de Estradas de Rodagem
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DP – Desvio Padrão
EP – Erro Padrão
GSD – Ground Sample Distance
ICPF – Índice de Condição de Pavimento Flexíveis
IES – Índice de Estado da Superfície do Pavimento
IGG – Índice de Gravidade Global
IGGE – Índice de Gravidade Global Expedito
IGI – Índice de Gravidade Individual
ISPRS – Internacional Society for Photogrammetry and Remote Sensing
LVC – Levantamento Visual Contínuo
MDE – Modelo Digital de Elevação
MDS – Modelo Digital de Superfície
MDT – Modelo Digital de Terreno
ND – Número Digital
PCD – Produtos Cartográficos Digitais
PCDG – Produtos de Conjuntos de Dados Aeroespaciais
PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica
PMD – Peso Máximo de Decolagem
RBAC – Regulamentos Brasileiros de Aviação Civil
RPA – Aeronaves Remotamente pilotadas
SISANT – Sistema de Aeronaves Não Tripuladas
VANT – Veículo Aéreo Não tripulado

LISTA DE SÍMBOLOS

- h_m – Altitude média do terreno
- h – Altitude da câmera no momento da captura
- B – Azul
- D – Distância no sensor embarcado
- E – Escala da fotografia
- F_{oap} – Frequência do conjunto de deformações
- F_{pr} – Frequência do conjunto de painelas e remendos
- F_t – Frequência do conjunto de trincas
- G – Verde
- GSD – Ground Sample Distance
- H – Altura de voo
- P_{oap} – Peso do conjunto de deformações
- P_{pr} – Peso do conjunto de painelas e remendos
- P_t – Peso do conjunto de trincas
- R – Vermelho
- b – Tamanho de um pixel em relação ao CCD
- d – Diâmetro da lente
- exp = Exposição
- f – Distância focal da câmera
- f – Frequência
- i – Distância imagem
- o – Distância objeto
- s – Brilho da cena
- t – Tempo de exposição
- v – Velocidade de da onda
- λ – Comprimento de onda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS.....	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos.....	14
1.1.3	Justificativa	14
1.1.4	Limitações da Pesquisa	15
2	PRINCÍPIOS DA FOTOGRAMETRIA	16
2.1	ASPECTOS HISTÓRICOS	16
2.2	FOTOGRAMETRIA DIGITAL.....	17
2.2.1	Aquisição de Dados	18
2.2.1.1	Radiação Eletromagnética.....	18
2.2.1.2	Câmeras Fotográficas	20
2.2.1.3	Imagens Digitais.....	24
2.3	AEROFOTOGRAMETRIA.....	27
2.3.1	Geometria Aplicada a Imagens Aéreas	27
2.3.2	Veículos Aéreos Não Tripulados.....	31
2.3.3	Projeto de Levantamento Aéreo	32
2.3.4	Principais Aplicações	36
2.4	PRECISÃO E EXATIDÃO.....	39
2.4.1	Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais	39
3	METODOLOGIA	41
3.1	PROJETO AEROFOTOGRAMETRICO	41
3.1.1	Área Mapeada.....	42
3.1.2	Planos de Voo.....	43
3.1.3	Planejamento da Distribuição dos pontos de apoio e checagem	47

3.1.4	Projeto de Alvos Fotogramétricos e Pré-sinalização.....	48
3.1.5	1ª Etapa de Campo - Instalação dos Alvos Fotogramétricos.....	54
3.1.6	2ª Etapa de Campo - Realização das Missões de Voo	57
3.1.6.1	Voo à 120 m	58
3.1.6.2	Voos à 80 m.....	59
3.1.6.3	Voos à 40 m.....	59
3.1.7	Georreferenciamento	60
3.1.8	Processamento dos Dados	61
3.1.8.1	Alinhamento da câmera (Orientação interior e exterior).....	61
3.1.8.2	Adensamento da nuvem de pontos (Fototriangulação analítica).....	62
3.1.8.3	Superfície (Modelo Numérico de Elevação)	62
3.1.8.4	Texturas e Mosaico de Ortofotos (Retificação e normalização de imagens)	63
3.1.9	Apresentação e Representação gráfica.....	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1	Georreferenciamento	65
4.2	Processamento e pós processamento de dados.....	66
4.2.1	Resultados obtidos à 120m.....	66
4.2.1.1	Posição Estimada de captura de imagens	67
4.2.1.2	Avaliação dos pontos de checagem.....	68
4.2.1.3	Análise e qualidade PEC PCD	70
4.2.1.4	Produtos Fotogramétricos.....	71
4.2.2	Resultados obtidos à 80 m.....	74
4.2.2.1	Posição Estimada de captura de imagens	75
4.2.2.2	Avaliação dos pontos de checagem.....	76
4.2.2.3	Análise e qualidade PEC PCD	77
4.2.2.4	Produtos Fotogramétricos.....	78
4.2.3	Resultados obtidos à 40 m.....	81

4.2.3.1	Avaliação dos pontos de checagem.....	83
4.2.3.2	Produtos Fotogramétricos.....	83
4.2.4	Análise comparativa e resumo dos parâmetros de processamento utilizados	85
5	CONCLUSÃO	89
5.1	PESQUISAS PROPOSTAS	Erro! Indicador não definido.

1 INTRODUÇÃO

A fotogrametria é definida pela *Internacional Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ISPRS) como sendo a arte, ciência e tecnologia de se obter informação confiável de imagens de sensores, sobre a Terra e seu meio ambiente, e outros processos de gravação, medição, análise e representação. Um dos objetivos da fotogrametria, segundo Coelho e Brito (2007), consiste em reduzir o trabalho de campo no levantamento de coordenadas de um ou vários pontos, além de diminuir o tempo de obtenção destes dados.

Em um primeiro momento, conforme Burch (1997), as imagens possuíam baixa resolução geométrica devido às limitações impostas pelos sensores utilizados, bem como a grande distância destes com a superfície, uma vez que eram dispostos em aviões e aeronaves de maior porte, com operações restritas quanto à altura de voo.

Neste sentido, abre-se a discussão entorno do que realmente são dados confiáveis. Para Coelho e Brito (2007), informações fotogramétricas confiáveis são mapas, listas de coordenadas, modelos tridimensionais ou qualquer outro modo de representação geometricamente classificado dentro de tolerâncias, critérios de precisão e acurácia desejáveis. O que variará entre as aplicações, são os refinamentos necessários entorno destes dados.

No Brasil, segundo Ramos (2014), o controle de qualidade de produtos cartográficos é feito pelo Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), definido pelo decreto presidencial número 89.817 de 1984, que define e estabelece critérios a serem atingidos pelas incertezas de um mapeamento se comparadas com pontos materializados no terreno com coordenadas adquiridas por sistemas de baixa incerteza.

Tal processo pode ser racionalizado e automatizado até certo ponto com o auxílio de veículos aéreos não tripulados e aplicação de técnicas de fotogrametria e fotointerpretação para quantificação objetiva dos resultados, elaboração de mapas e modelos digitais detalhados de superfícies extensas.

É com essa premissa que a fomentação do uso de veículos aéreos não tripulados de pequena escala se torna aliada no processo de obtenção de dados, provendo meios para que, de forma cada vez mais acessível, ágil e menos onerosa, levantamentos topográficos com maior

exatidão e confiabilidade sejam realizados, fazendo uso da fotogrametria para interpretação e tratamento dos dados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho da aplicação de técnicas de fotogrametria digital para levantamentos topográficos em área previamente definida com o uso de um VANT.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Elaborar o projeto de levantamento aerofotogramétrico referente a área selecionada;
- Alocar e identificar os pontos de controle e apoio a serem aplicados no espaço objeto;
- Executar os levantamentos aerofotogramétricos;
- Aferir as coordenadas dos pontos de controle e apoio com um sistema GPS RTK;
- Analisar os resultados obtidos sob comparação aos padrões legais vigentes, Padrão de Exatidão Cartográfico Brasileiro.

1.1.3 Justificativa

Esta pesquisa tem o intuito de destacar as vantagens que podem ser obtidas tecnicamente com o uso da tecnologia de aquisição de imagens através de veículos aéreos não tripulados para aferição objetiva de parâmetros topográficos sobre uma determinada área. Ressaltando as verificações estatísticas de qualidade necessárias para obtenção de produtos fotogramétricos válidos, uma vez que tais verificações, em algumas aplicações de engenharia são incorretamente preteridas, em função da agilidade ou da diminuição de custos para o levantamento. Sendo assim, esta pesquisa torna possível a obtenção de parâmetros de referência para o planejamento de levantamentos a serem realizados em situação semelhante,

levando em conta as limitações deste estudo, envolvendo o tipo de aeronave, sensor utilizado, altura de captura de imagens, taxas de sobreposição aplicadas.

1.1.4 Limitações da Pesquisa

Para este estudo foi realizado um levantamento aerofotogramétrico em uma fração correspondente a 227.000 m² do terreno pertencente a Universidade Federal de Santa Catarina, situado no km 52 da rodovia BR-101 - localidade Curva do Arroz, através da captura de imagens em alturas de voo definidas como sendo: 120 m, 80 m e 40 m, com taxa de superposição em ambos os sentidos igual a 75% e velocidade limitada a 15m/s.

Como sensor, fez-se uso da câmera fotográfica não métrica de tecnologia CMOS de 1/2,3” com resolução de 12 Mp [4000X3000], embarcada em um VANT DJI Phantom 4 do tipo quadricoptero equipado com estabilizador de imagens do tipo gimbal, controlado remotamente através de uma interface Android instalada em dispositivo móvel.

Para o controle de qualidade do levantamento, 30 pontos foram demarcados fisicamente em campo através de alvos fotogramétricos, rígidos e imóveis, dotados de dimensões adequadas para a boa visibilidade, georreferenciados por meio do sistema GPS RTK com receptores de dupla frequência do tipo L1/L2.

Os pós-processamento, foi executado, em um processador CPU Intel Core I7 7500 2,90GHZ, com 16 Gb de memória RAM, VGA NVIDIA GeForce 940MX e SSD de 128Gb de capacidade rodando um software de processamento digital de imagens.

2 PRINCÍPIOS DA FOTOGRAMETRIA

De acordo com Coelho e Brito (2007), a fotogrametria tem como propósito a reconstrução de um espaço tridimensional ou parte do mesmo, chamado espaço-objeto, a partir de um conjunto de imagens bidimensionais, chamado de espaço-imagem, advindas da gravação de padrões de ondas eletromagnéticas, sem contato físico direto entre o sensor e a superfície ou alvo de interesse.

O mesmo autor destaca que se trata por tanto, de uma transformação de sistemas: um sistema fotográfico, bidimensional, próprio de cada câmera ou sensor, com a origem estabelecida no centro de seu quadro de captura e com as coordenadas determinadas através de calibração em laboratório. Convertido para um sistema tridimensional, o próprio espaço-objeto, em que no caso convencional trata-se da representação em um sistema de coordenadas, conhecido ou arbitrário, georreferenciados ou não, de um número semi-infinito de pontos que sejam suficientes para descrever a geometria da superfície submetida a análise.

Pontos de controle são empregados para que esta conversão de sistemas seja efetuada. Demarcados no próprio espaço-objeto e localizados no espaço-imagem, são fundamentais para que seja possível através da computação gráfica a inferência da função matemática que estrutura a representação de um conjunto no outro.

O número de imagens envolvidas na construção do espaço-imagem é variável, segundo Coelho e Brito (2007) é desejável que sejam ao menos duas, tomadas de ângulos diferentes e com área de superposição, a fim de viabilizar a visão estereoscópica, o que possibilita maiores acurácias e precisões na restituição tridimensional do espaço-imagem.

2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS

Surgida na segunda metade do século XIX, anos após o advento da fotografia, a fotogrametria teve seus primeiros estudos desenvolvidos pelo engenheiro geodesta e militar do exército francês Aimé Laussedat, considerado pai da fotogrametria e o precursor da aerofotogrametria, sendo o primeiro homem a obter imagens fotográficas a partir de um balão. A invenção do estereocomparador, no início do século XX marcou a primeira revolução da fotogrametria,

que por meio deste equipamento desenvolvido por Pullfrich, teve inúmeros processos matemáticos abreviados por aparelhos óptico-mecânicos.

O mapeamento de superfícies extensas foi possível a partir da técnica desenvolvida pelo austríaco Theodore Scheimplflug, responsável por desenvolver um método bem-sucedido de retificação de fotografias aéreas. Os retificadores analógicos, posteriormente substituídos pelos restituidores analógicos permitiam visão estereoscópica através de um par de fotografias com área de superposição. Foi neste período também que houve o surgimento do processo de fototriangulação, abreviando e facilitando o trabalho de campo, sendo possível o adensamento dos pontos obtidos em campo no laboratório. (Coelho e Brito, 2007).

O desenvolvimento do computador, durante a Segunda Guerra Mundial, foi responsável por uma nova transformação nos processos fotogramétricos praticados até então, no que era conhecido como fotogrametria analógica. Segundo Coelho e Brito (2007), os processos desenvolvidos mecanicamente até então passaram a ser executados computacionalmente.

O primeiro trabalho deste campo de pesquisa foi desenvolvido em 1953 no Laboratório de Pesquisa Balística, em Aberdeen, Maryland, Estados Unidos pelo Dr. Helmut Schmidt onde, a partir de então foi possível estabelecer uma análise completa de propagação de erros dos processos de adensamento.

Em 1957 o finlandês Uki Helava desenvolveu o conceito de restituidor analítico, que fazia uso de servomecanismos para medir as coordenadas do espaço-imagem em pontos homólogos, e de controle, no espaço-objeto, sendo todos os demais cálculos efetuados computacionalmente, simplificando e agilizando o processamento final dos dados, permitindo a fototriangulação de conjuntos de fotos mais numerosos e robustos.

2.2 FOTOGRAMETRIA DIGITAL

Surgida nos anos 80, para Coelho e Brito (2007), teve seu uso fomentado de maneira expressiva somente após a segunda metade da década seguinte, em virtude do relevante aumento da capacidade de processamento dos computadores, que até então tinham dificuldades no tratamento do elevado volume de dados advindo dos processos iterativos de análise de imagens digitais. Para a fotogrametria digital os dados acerca do espaço-imagem podem ser obtidos de duas formas, através do escaneamento de imagens analógicas ou ainda a obtenção direta de matrizes digitais, oriundas de câmeras e sensores com essa finalidade, método que hoje é utilizado na quase totalidade dos casos.

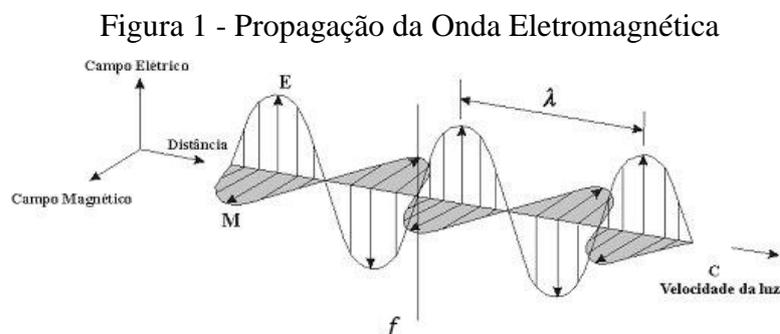
De acordo com Coelho e Brito (2007), a fotogrametria digital tem como objetivo principal a reconstrução automática do espaço-objeto, a partir do espaço-imagem em formato digital. Embora o mesmo autor indique, que a automatização de todos os processos ainda está longe de se tornar realidade, uma vez que o relevo terrestre apresenta inúmeras discontinuidades que podem se misturar e serem confundidas com as feições presentes no terreno, como edificações, pontes e demais construções. Para tanto, evitar este problema é possível por intermédio da aplicação de condições de contorno, sendo necessária a interação do homem nestes processos.

Para Coelho e Brito (2007) o estado-da-arte em fotogrametria digital, atualmente é o mapeamento semiautomático, ou seja, os processos implementados tentam ser automáticos, mas ainda exigem a supervisão e eventual intervenção humana nos mesmos.

2.2.1 Aquisição de Dados

2.2.1.1 Radiação Eletromagnética

A maioria dos sensores captadores de imagem detecta e registra a radiação eletromagnética, esta, caracterizada por viajar à velocidade da luz e possuir dois campos a ela associados: um campo elétrico e outro magnético, perpendiculares entre si e com variação senoidal como na figura 1. Vale ainda dizer que, embora possa ser encarada com onda, também pode ser considerada como sendo minúsculos pacotes de energia, chamados de fótons, caracterizando a teoria da dualidade onda-partícula. Coelho e Brito, (2007).



Fonte: Núcleo de Geotecnologias da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Adaptado pelo autor.

A radiação eletromagnética, vista como onda possui dois parâmetros principais que variam formando o espectro eletromagnético na figura 2. Estes parâmetros são o comprimento de onda e a frequência, está inversamente proporcional a última, como expressa a consagrada equação de propagação de onda:

$$v = \lambda f$$

Equação 1 – Propagação de Onda

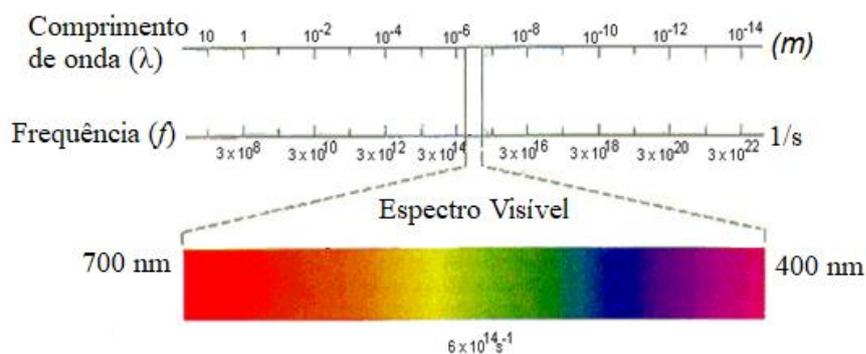
Onde:

v = Velocidade da onda(m/s)

λ = Comprimento de onda (m)

f = Frequência (hz)

Figura 2 - Espectro Eletromagnético

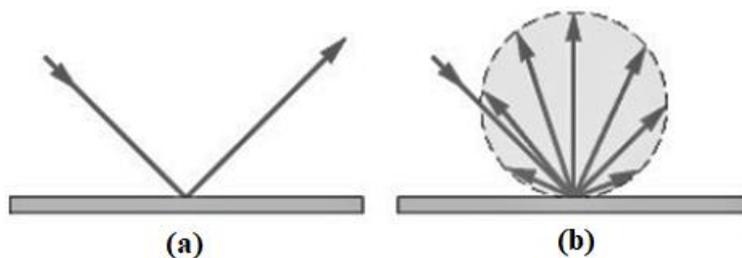


Fonte: Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Adaptado pelo autor.

Os corpos respondem à energia eletromagnética que incide sobre eles de três maneiras: absorvendo-a, transmitindo-a ou refletindo-a, além da emissão, propriedade natural de todos os corpos. Em fotogrametria, interessam principalmente os processos de reflexão e emissão, pois a partir do somatório destas pelas feições da superfície terrestre que os diodos fotossensíveis usados em câmeras digitais ou filmes analógicos detectam e registram essa radiação, indicam Coelho e Brito (2007).

O fenômeno de reflexão da radiação eletromagnética acontece de duas formas: especular e difusa. A reflexão especular é caracterizada por refletir de forma espelhada, em relação a direção normal da superfície, parte das ondas que incidem na mesma, figura 3a.

Figura 3 - Reflexão especular (a) e Reflexão difusa (b)



Fonte: *KMD Lighting Design Consultation*.

A reflexão difusa é objeto de maior interesse nos processos fotogramétricos, neste tipo, as ondas incidentes em uma superfície são refletidas em inúmeras direções com diferentes intensidades, figura 3b. Coelho e Brito (2007), pontuam que cada corpo reage de maneira diferente à mesma radiação, graças as peculiaridades que cada um deles possui. É através deste atributo que é possível conceituar a teoria das cores, assim se observa a coloração de um corpo, pois ele emite e reflete de forma difusa radiação eletromagnética no comprimento de onda correspondente a esta coloração. É conhecendo como um corpo reage a diferentes faixas do espectro eletromagnético, que se pode estabelecer um padrão de resposta espectral para este corpo. (Shimabukuro e Ponzoni, 2017).

2.2.1.2 Câmeras Fotográficas

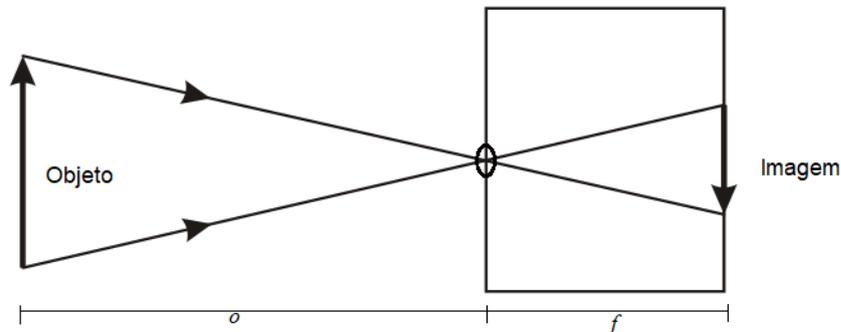
A fotografia foi desenvolvida no final do século XIX, graças as diligências dos franceses Nicéphore Niépce, Louis Daguerre e do inglês Willian Talbot. O mecanismo de funcionamento da câmera escura é de tal simplicidade que em sua essência, é utilizado até os dias atuais nos aparatos mais tecnológicos, indicam Coelho e Brito (2007).

O funcionamento simplificado de uma câmera escura pode ser exemplificado através da (Figura 4), onde observamos um objeto a ser fotografado e uma câmara escura, que se consiste em um recipiente oco, dotado de uma minúscula abertura equipada com lentes, por onde a luz terá seu fluxo concentrado.

Esta câmara oca possui seu interior revestido por paredes escuras, exceto uma, posicionada no lado oposto da abertura, onde se encontra um dispositivo que pode ser sensibilizado pela luz, como um filme no caso de câmaras analógicas ou matrizes de *charge coupled devices* (CCD), *complementary metal-oxide semiconductors* (CMOS), no caso digital, de acordo com Coelho e Brito (2007).

A imagem formada é invertida, em relação ao objeto fotografado e é formada em uma distância que varia em função da distância do objeto a abertura.

Figura 4 - Princípio da Câmara Escura



Fonte: Autor

Quando o arranjo está devidamente posicionado, pode-se relacionar a distância focal (f), a distância imagem (i) e a distância objeto (o) do seguinte modo, através da Lei de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{o} + \frac{1}{i}$$

Equação 2

Coelho e Brito (2007) ponderam, que embora a Lei de Gauss determine de maneira rígida uma distância imagem, com relação a uma distância objeto estabelecida, indispensáveis para que o sistema esteja focado de forma absoluta, há um intervalo de tolerância dentro do qual mudanças de posição do objeto não acarretam perda de nitidez da imagem. Esse conceito é definido como sendo profundidade de campo.

No caso de fotografias aéreas, de maneira geral, a distância objeto assume valores muito grandes, simplificando a equação de Gauss, de onde pode se concluir que, nesses casos $f=i$.

De acordo com Lillesand e Kiefer (2000) apud. Coelho e Brito (2007), um conceito imprescindível para a compreensão das câmeras fotográficas é o fator de exposição em qualquer ponto do plano focal, como expressa equação 3.

$$Exp = \frac{sd^2tf^2}{4}$$

Equação 3

Onde:

 exp = Exposição (J/mm²) s = Brilho da cena (J/mm² s) d = Diâmetro da lente (mm) t = Tempo de exposição (s) f = Distância focal da câmera (mm)

Outra consideração relevante sobre câmeras fotográficas é o conceito de velocidade das lentes, conhecido como *f-stop*, e descrito como uma relação entre o diâmetro da lente e a distância focal da câmera, como apresentado na equação 4:

$$fstop = \frac{f}{d}$$

Equação 4

Onde:

 f = Distância focal da câmera (mm) d = Diâmetro da lente (mm)

Dessa forma podemos rearranjar a equação da exposição, (equação 5) assim conforme Coelho e Brito (2007).

$$Exp = \frac{st}{4(fstop)^2}$$

Equação 5

Assim verificamos que na proporção que o *f-stop* aumenta, a exposição diminui. Da mesma forma como, quanto maior a abertura das lentes, mais luz chegará ao sensor, o que também acarreta na diminuição da exposição. Conforme Coelho e Brito (2007), pequenas aberturas de lentes obrigam maiores tempo de exposição, mas em contrapartida, aumentam a profundidade de campo. Uma relação ideal nestes casos não pode ser estabelecida de maneira geral, cabendo ao profissional envolvido determinar as melhores condições para cada circunstância prática.

A classificação das câmeras fotográficas pode ser realizada de acordo com a tecnologia aplicada, em analógicas, que sensibilizam um filme fotográfico, ou em digitais, que em

algumas tecnologias sensibilizam uma matriz de CCD, ou sensores CMOS. Estas últimas de maior interesse para o desenvolvimento deste trabalho.

CCDs são, de acordo com Fernandes, Kanaan e Gomes (2002) sensores semicondutores capazes de captar imagens através de células fotoelétricas ligadas a uma matriz de capacitores. O número de capacitores e o arranjo destes, estão associados diretamente com o número de pixels gerados para composição de uma imagem e consequentemente determinam a resolução desta. Um sensor CCD típico de uma câmera e sua localização estão exemplificados na (Figura 5).

Figura 5 – CCD de uma câmera e sua localização



Fonte: Autor

Sensores CMOS que por sua vez são caracterizados por sua pequena dimensão e formato como aponta Siri (2015), apresentam em função disso o custo reduzido como sua principal vantagem em relação ao CCD. São constituídos com materiais semelhantes, constituídos basicamente de silício e são sensibilizados pela luz, funcionando através do efeito foto elétrico.

A principal diferença entre os sensores está no modo em que a captura de imagem se dá, através da sensibilização de cada elemento fotossensível que irá formar os pixels. Sensores CCD tem a capacidade de sensibilizar todos os elementos de sua matriz de uma vez só, no que é conhecido como total shutter, ao contrário do CMOS, que captura as imagens pelo processo de rolling shutter fazendo a leitura de uma fileira de pixel por fração de segundo. Siri (2015) destaca que é um processo muito rápido, porém há de ser considerado no momento de obter imagem em movimento.

As câmeras fotográficas também podem ser classificadas de acordo com a rigidez de seus parâmetros, sendo divididas em dois grandes grupos: as câmeras métricas e as não métricas.

As câmeras métricas, que também são chamadas de fotogramétricas, vem acompanhadas de um certificado de calibração, que consiste em um documento que atesta os valores precisos de determinados parâmetros fundamentais da câmera, e que são utilizados nos processos fotogramétricos de processamento, segundo Coelho e Brito (2007). Os principais parâmetros de uma câmera são a distância focal e o ângulo de abertura. Informações acerca do fabricante, modelo da câmera e tipos de lentes utilizadas também devem ser bem caracterizados nos certificados de calibração.

2.2.1.3 Imagens Digitais

As imagens digitais são originadas através de um princípio simples, a radiação eletromagnética refletida na superfície da terra e nos objetos dispersos, seguindo em direção ao sensor da câmera na forma de um fluxo com radiação e intensidade próprios, conforme Shimabukuro e Ponzoni (2017). A intensidade recebe o nome de radiância e pode ser medida em faixas espectrais. Deste modo, um fluxo de radiação refletido pela superfície da terra contém diferentes comprimentos de onda associados, que por sua vez tem suas próprias radiâncias. Após o fluxo de radiação interagir com a atmosfera durante a trajetória da superfície aos sensores da câmera, sua radiância é convertida em sinais elétricos pelos sensores, que convertem estes sinais em números digitais, segundo critérios específicos de cada faixa espectral. Os números digitais darão origem aos pixels, e é possível afirmar segundo Shimabukuro e Ponzoni (2017), que estes caracterizam espectralmente os objetos no terreno, o que se chama de assinatura espectral.

Existem de forma fundamental, dois tipos de imagem digital: vetorial e matricial.

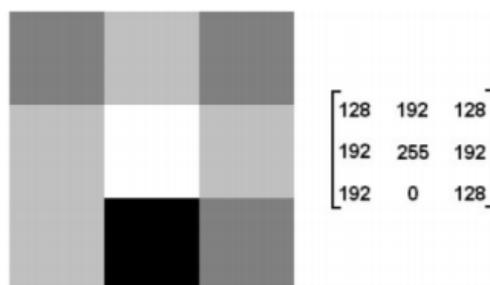
A imagem digital vetorial, de acordo com Lisboa Filho (2000), é caracterizada pela delimitação de objetos pelos pontos que os descrevem através de ligações e representações por elementos de geometria primitiva, como segmentos de retas e polígonos simples. Estas imagens possuem uma característica muito peculiar, pois permitem a sucessiva ampliação sem de fato perder sua resolução. Isso porque a posição de cada objeto no plano de representação é definida de acordo com um sistema de coordenadas, não necessitando que cada espaço do plano de representação esteja preenchido, como ocorre no caso matricial.

A imagem digital matricial, é definida como sendo uma matriz constituída por células quadradas e sem dimensão, chamadas de picture elements, ou como são mais conhecidos no contexto atual, pixels (p). Estes elementos irão compor a resolução espacial da imagem em

questão, destacam Shimabukuro e Ponzoni (2017). Em cada pixel pode haver apenas uma coloração sólida, definida por um número digital (ND).

Pode-se, assim, representar uma imagem digital por uma matriz, tendo por valor de cada um dos termos o número digital equivalente a uma coloração, como podemos melhor perceber na (Figura 6).

Figura 6 - Distribuição matricial (à direita), equivalente a um conjunto de pixels (à esquerda)



Fonte: Coelho e Brito (2007)

Quanto a resolução das imagens digitais, podemos delinear 4 tipos: resolução espacial, resolução radiométrica, resolução espectral e resolução temporal.

A resolução espacial está absolutamente conexa ao número de pixels que compõe esta imagem, conforme Coelho e Brito (2007). A definição deste atributo exprime qual a dimensão física está associada um pixel na imagem, parâmetro fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Como um exemplo, determinada imagem constituída por (128 x 128) pixels, equivale, no terreno a uma área de (128 x 128) metros, deste modo cada pixel equivale a um quadrado de (1 x 1) metro no terreno. A coloração do pixel será definida como uma composição das tonalidades existentes na área compreendida por este pixel, o que em imagens de baixa resolução, levará à um problema definido como sendo a mistura espectral, de acordo com Shimaburkuro e Ponzoni (2017).

Infere-se a partir disso, que o tamanho do pixel projetado no terreno, está diretamente relacionado à capacidade de se discernir objetos presentes neste. De maneira clara, quanto menor o tamanho do pixel maior é a resolução espacial da imagem digital figura 7.

Figura 7 - Diferentes resoluções espaciais para uma mesma cena



Fonte: Droneng Drones e Engenharia (2015)

Coelho e Brito (2017) citam que, no momento em que se arranja uma área física da terra em uma matriz de pixels de dimensões definidas, executa-se um processo chamado discretização. O mesmo autor, explica que, neste processo, o espaço contínuo (ou espaço objeto), que tem medidas físicas com nuances complexas, é simplificado a um conjunto discreto de elementos rearranjados em cada termo de uma matriz. Mais pixels em uma imagem, promovem uma discretização mais realista, porém na mesma proporção aumentam o tamanho do arquivo final, e os requisitos necessários para processar estes dados.

Outra característica de uma imagem digital, a resolução radiométrica, está associada a radiação eletromagnética refletida ou emitida pelos alvos da superfície terrestre e à capacidade de o sensor distinguir uma maior amplitude de tons dentro de uma determinada banda do espectro eletromagnético, definem Coelho e Brito (2007). Em imagens digitais este atributo é quantificado de forma mais simples, uma vez que, em sua definição, a imagem digital deve possuir uma quantidade estabelecida de tons.

Conforme, Souza et al (2007), A radiação radiométrica possui valores de intensidade que diferem de um alvo para outro. A representação destes valores, no formato digital, está ligada ao número de dígitos binários (bits) necessários para armazenar o valor máximo de cada pixel, portanto estes valores devem estar associados a uma potência de 2, como pontua Coelho e Brito (2007). Desse modo, uma resolução radiométrica maior irá proporcionar uma melhor identificação e representação das nuances da superfície analisada, de acordo com Souza et al (2007), melhor percebido na figura 8. Assim como na resolução espacial, resoluções radiométricas mais amplas, irão influenciar diretamente no tamanho dos arquivos da imagem, e na capacidade de processamento requerida.

Figura 8 - Diferentes resoluções radiométricas para uma mesma cena do satélite LANDSAT



Fonte: LANDSAT (2011)

Para um exemplo deste atributo, tomemos uma imagem de 8 bits, que então, pode ter até 256 tons de cinza ($2^8 = 256$).

As imagens coloridas digitais, são constituídas por três diferentes imagens exibidas de forma superposta, representadas visualmente por vermelho (R), verde (G) e azul (B), mas podem ser equivalentes a qualquer combinação de bandas do espectro eletromagnético, conforme Shimaburkuro e Ponzoni (2017). Deste modo, uma imagem colorida de 16 milhões de cores, nada mais é do que a combinação de três imagens de 256 cores, ou ainda uma imagem de 8 bit por banda, exibindo três bandas, como destaca Coelho e Brito (2007).

Finalmente, a resolução espectral está ligada ao número de bandas e a espessura de cada banda que os sensores, são capazes de cobrir, de acordo com Coelho e Brito (2007).

Sensores pancromáticos por exemplo, cobrem a faixa do espectro visível, exibindo-as em tons de cinza, em apenas uma banda. Sensores para captar imagens coloridas, cobrem a mesma faixa do espectro, mas em bandas diferentes, no caso, o sistema RGB como no exemplo anterior. Dessa forma, como o sensor para imagens coloridas possui três bandas elas são mais estreitas que no caso pancromático, uma vez que este equivale as três juntas. Deste modo, pode-se dizer que os sensores coloridos possuem maior resolução espectral do que o pancromático, como exemplifica Coelho e Brito (2007).

2.3 AEROFOTOGRAMETRIA

Aerofotogrametria, ou fotogrametria aérea, são os termos que definem a utilização de imagens obtidas por sensores embarcados em aeronaves como dados para aplicação das técnicas de restituição na elaboração de produtos fotogramétricos, como caracterizam Marchetti e Garcia (1977). Segundo, Coelho e Brito (2007), é o método mais empregado e imprescindível na obtenção de dados cartográficos da superfície terrestre, e por consequência o que mais obteve benefícios de uma organização dos procedimentos e parâmetros.

2.3.1 Geometria Aplicada a Imagens Aéreas

A fotografia aérea, como toda fotografia, é uma perspectiva e a magnitude do deslocamento das imagens está associada, em geral por 3 parâmetros principais: a elevação relativa a

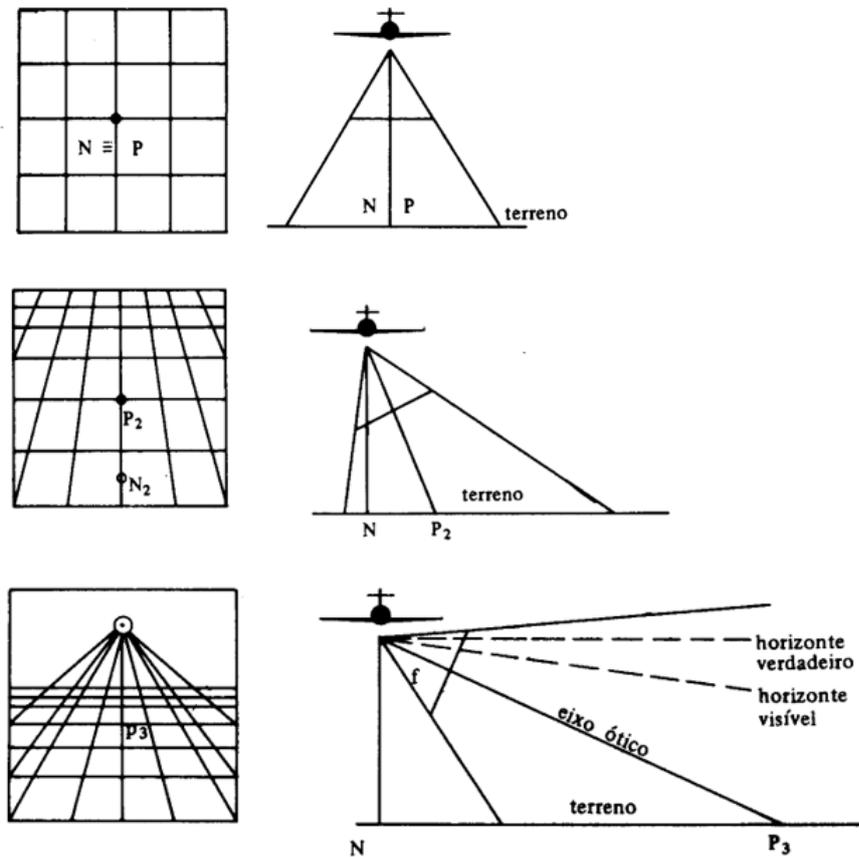
superfície terrestre, a distância focal das lentes e a inclinação do sensor no momento da exposição, conforme apontam Coelho e Brito (2007).

De acordo com Marchetti e Garcia (1977), quanto a inclinação do sensor, existem em geral dois tipos de fotografias aéreas: fotografias verticais, que são tomadas com o eixo óptico do sensor interceptando na vertical o plano de referência, e as fotografias oblíquas, estas obtidas com o eixo óptico do sensor intencionalmente inclinado em relação ao plano de referência.

As fotografias oblíquas podem ser ainda oblíquas altas ou baixas, termos estes associados ao ângulo de inclinação do eixo óptico.

É possível entender este conceito com mais clareza, ainda de acordo com Marchetti e Garcia (1977), imaginando uma mesma câmera fotográfica obtendo imagens de uma superfície aproximadamente plana, demarcada com uma malha quadriculada, como na figura 9. Na fotografia vertical a quadrícula é exibida de maneira perfeita, com uma escala uniforme em toda imagem. Enquanto, na fotografia oblíqua baixa as linhas tendem a convergir para um ponto localizado fora do espaço imagem. Deste modo, a quadrícula é exibida de forma distorcida tendo seus elementos representados por trapézios. O mesmo efeito ocorre com a fotografia oblíqua alta, porém nesta o ponto de convergência está contido no espaço imagem.

Figura 9 - Fotografia vertical (à cima), fotografia oblíqua baixa (ao centro), fotografia Oblíqua alta (abaixo)



Fonte: Marchetti e Garcia (1977)

Outros parâmetros geométricos fundamentais para o sucesso dos procedimentos fotogramétricos são a área de superposição de imagens e a escala de voo.

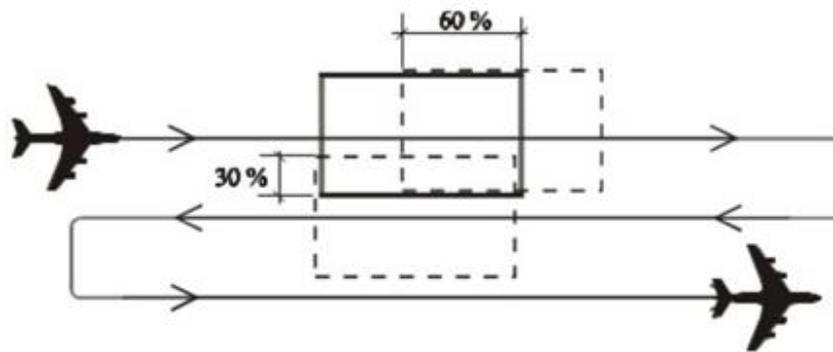
As áreas de recobrimento, ou de superposição, tornam possível a percepção e a interpretação estereoscópica das imagens.

Marchetti e Garcia (1977), explicam que estereoscopia é a habilidade de se obter informações sobre o espaço tridimensional através de imagens tomadas de pontos diferentes e com alguma área de superposição. Mecanismo similar ao que ocorre com o olho humano, que através da visão estereoscópica binocular possui a habilidade de identificar nas imagens formadas, noções de profundidade, distância e tamanho dos objetos.

Para Coelho e Brito (2007), duas imagens adjacentes devem ter um recobrimento mínimo (área de superposição) nominal de 60% e duas faixas de voo devem possuir, pelo menos, um recobrimento lateral de 30%, de modo a garantir a operacionalidade do método figura 10, os

autores ainda observam que quanto maior a área de superposição melhor será a acurácia dos resultados, sendo que para obtenção de parâmetros altimétricos deve-se considerar uma área de superposição de pelo menos 75%.

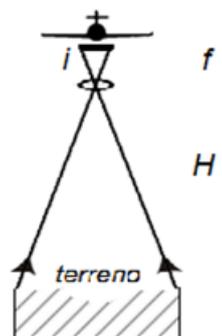
Figura 10 - Superposição longitudinal e lateral



Fonte: Marchetti e Garcia (1977)

A escala de voo, para obtenção de imagens aéreas, é o parâmetro que descreve a relação de uma distância medida na imagem obtida pelo sensor embarcado (D), e a sua correspondente homóloga no terreno (d), conforme Coelho e Silva (2007). Em imagens aéreas, a câmera está focalizada para o infinito, devido à relativa grande distância do sensor até o terreno. Isso possibilita que relações simples de razão e proporção sejam estabelecidas, a fim de que sejam determinadas variáveis dependentes da escala em um voo fotogramétrico, conforme a figura 11 e as equações 6, 7 e 8

Figura 11 - Parâmetros para obtenção da Escala de voo



Fonte: Autor (2018)

$$E = \frac{d}{D} \quad \text{Equação 6}$$

$$E = \frac{f}{H} \quad \text{Equação 7}$$

$$E = \frac{f}{h_m} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

h = Altitude da câmera no momento da captura (m)

h_m = Altitude média do terreno (m)

H = Altura de voo (m)

E = Escala da fotografia

f = Distância focal da câmera (mm)

2.3.2 Veículos Aéreos Não Tripulados

Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), conforme definição do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) do Ministério da Defesa, é qualquer tipo de aeronave que possa ser controlada nos três eixos e que não necessite de pilotos embarcados para ser conduzida. Dessa forma, estas aeronaves são controladas remotamente, quase sempre por meios computacionais, sob a supervisão humana com ou sem sua interferência na pilotagem.

Para Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) os veículos aéreos não tripulados, podem ser: aeromodelos, quando usados para fins puramente recreativos ou Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA), quando aeronaves não tripuladas pilotadas a partir de uma estação de pilotagem remota tenham finalidade comercial, corporativa ou experimental.

A ANAC ainda categorizou os VANTs de acordo com seu Peso Máximo de Decolagem (PMD) em 3 classes, cada uma destas possui regras específicas para operação, como segue a tabela 1

Tabela 1- Classificação dos VANTS

Classe	PMD
Classe 1	Superior a 150 kg
Classe 2	Entre 25 kg e 150 kg
Classe 3	Inferior a 25 kg

Fonte: ANAC

VANTs classe 3, com PMD superior à 250g e classes superiores necessitam ter cadastro homologado na ANAC, no Sistema de Aeronaves Não Tripuladas (SISANT) e ter seu número de identificação exibido na aeronave em local que possa ser facilmente acessado.

São obrigatórias, segundo a ANAC licença e habilitação emitidas pelo órgão para operação de RPA de todas as classes que pretendam alçar voos superiores a 400 pés. Pilotos remotos de RPA classe 1 e 2 deverão possuir ainda o Certificado Médico Aeronáutico (CMA)

Conforme o Regulamento Brasileiro Da Aviação Civil Especial – RBAC-E nº 94 2017, a idade mínima para pilotar um RPA é 18 anos, não sendo necessária habilitação para operar aeronaves RPA com PMD inferior a 250g, desde que não alcem voos superiores a 400 pés.

A operação dos VANTs pode se dar em três modalidades, de acordo com o ponto de vista do piloto. Podem ser: Operações na qual o piloto não consegue manter o VANT dentro de seu alcance visual, mesmo auxiliado por um observador, chamadas de BVLOS; Operações onde o contato visual direto do piloto com o VANT é mantido na totalidade do tempo, conhecida como VLOS; Operações em que o piloto só é capaz de manter contato visual direto com o VANT lançando mão de lentes e outros equipamentos, além de um observador, operação denominada EVLOS.

Durante todas as modalidades de voo com VANTs de peso máximo de decolagem superior a 250g, uma apólice de seguro contra danos a terceiros deve estar ativa. Outros documentos que devem ser portados durante a operação, segundo a ANAC, são o Manual de Voo e um Documento de Avaliação de Risco.

A fiscalização se dá pelos órgãos de segurança pública, que deverão tratar das infrações e contravenções penais. A ANAC incorpora a fiscalização da operação dos VANTs no programa de vigilância continuada, e os infratores estão sujeitos as sanções previstas no Código Brasileiro de Aeronáutica, de acordo com o próprio órgão. De forma cautelar, a ANAC poderá suspender temporariamente as operações nos casos de suspeita de descumprimento do regulamento.

2.3.3 Projeto de Levantamento Aéreo

Um projeto de levantamento aéreo, segundo Silva Neto (2015), de forma geral é desenvolvido em três etapas distintas executadas de forma sequencial: Plano de voo, levantamentos de campo e pós-processamento.

Silva Neto (2015), estabelece que a primeira atividade relacionada a elaboração para um plano de voo é a determinação da área de cobertura do voo fotogramétrico. De maneira geral, a área de sobrevoo é muito superior à área que efetivamente irá ser mapeada e originará os produtos fotogramétricos, assim como na figura 12. Isso se deve geralmente a geometria irregular das áreas a serem mapeadas e as distorções que possam ocorrer nos extremos da área de cobertura na etapa de pós-processamento.

Figura 12 - Comparação entre a área de cobertura do voo fotogramétrico com a área efetivamente mapeada



Fonte: Silva Neto (2015)

A boa prática de projeto, portanto, indica que a área alvo do levantamento deve estar contida de forma aproximadamente centralizada na área que efetivamente será sobrevoada.

Outro parâmetro fundamental a ser estabelecido nesta etapa é o Ground Sample Distance (GSD), que em tradução literal significa: Distância de Amostra do Solo.

Segundo Silva Neto (2015) o GSD é um conceito relacionado a resolução espacial do levantamento aerofotogramétrico digital, que representa o tamanho do pixel de uma imagem em unidades de terreno.

Essa relação se dá em função da altura de voo e a distância focal da câmera utilizada, como vimos nas equações 6, 7, 8 no capítulo 2.3.1. A definição do GSD está atrelada a nitidez desejada para o mapeamento e é uma das variáveis mais importantes a serem definidas, sendo a que garante a resolução espacial do levantamento aerofotogramétrico.

De maneira geral, o tamanho do GSD de um levantamento, é inversamente proporcional ao nível de detalhamento atingido, porém GSDs menores irão exigir maior quantidade de

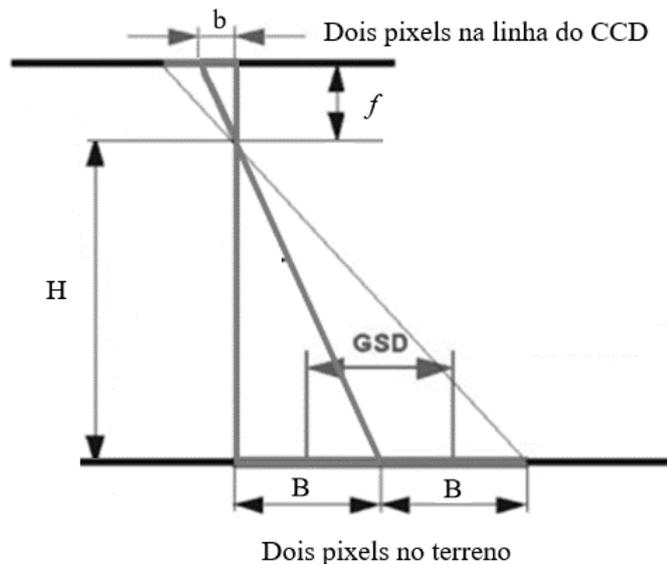
imagens, maior tempo de voo e maior capacidade de processamento, para mapear uma área de mesmas dimensões, do que um GSD maior, como indica Silva Neto (2015). De maneira análoga, pode-se afirmar então, que a capacidade de mapeamento tem relação diretamente proporcional ao tamanho do GSD. Cabe ao projetista equacionar esta relação no momento do projeto, definindo a altura de voo que gere um GSD adequado para a definição requerida.

A altura de voo para um levantamento aerofotogramétrico é definida em função do GSD requerido para resolução espacial estabelecida para o mapeamento, a distância focal, a resolução e a dimensão do sensor CCD da câmera.

Para tanto é necessário, primeiramente relacionar o tamanho de cada pixel gerado pelo sensor com suas dimensões físicas. Esta relação se dá pelo quociente da dimensão horizontal do sensor com o número de pixels gerados por este, em uma linha da matriz de NDs, explica Silva Neto (2015).

O mesmo procedimento deve ser feito, de forma análoga, com a dimensão vertical do sensor. Via de regra estas dimensões resultarão no mesmo valor, devido a definição do próprio pixel de ser um elemento geométrico quadrado. A (Figura 13), e a (Equação 9), tornam claro como podem ser estabelecidos os valores do GSD e da altura de voo, assim como Silva Neto (2015).

Figura 13 - Analogia entre as dimensões do CCD e do Pixel para obtenção da altura de voo



Fonte: Silva Neto (2015)

$$H = \frac{GSD \cdot f}{b}$$

Equação 9

Onde:

H = Altura de voo (m)

b = tamanho de um pixel em relação ao CCD (m)

f = Distância focal da câmera (m)

GSD = Ground Sample Distance (m)

A fim de exemplificar essa relação, tomemos uma imagem com resolução igual a 3000 x 4000 pixels, capturada a partir de um sensor de dimensões 4,62 x 6,16 mm equipado com uma lente de distância focal, $f=18\text{mm}$.

Por tanto, cada pixel projetado no sensor possui $0,154 \times 0,154 \mu\text{m}$. substituindo esta relação na equação 9, para diferentes alturas de voo temos os valores expressos na tabela 2.

Tabela 2 - Variação do GSD teórico com a altura de voo praticada (equação 9)

ALTURA DE VOO (H) [m]	GSD TEÓRICO [cm]
50	0,85
75	0,57
100	0,77
125	0,96

Fonte: Autor

Este cálculo exprime o conceito de GSD teórico, que pode sofrer pequenas variações em campo devido as correções em relação as diferenças de nível do terreno e o sistema de posicionamento que confere rigidez a altura de voo praticada no momento de captura imagem. Estas variações costumam ser leves, porém devem ser consideradas no momento do planejamento das missões.

Para que a fotogrametria tenha resultados adequados, deve-se dispor de dados iniciais de boa qualidade, sem, contudo, implicar em custos excessivos. Esses dados iniciais, servirão de condição de contorno para as etapas de processamento e constituem-se basicamente, na determinação dos pontos de controle e de apoio em campo, bem como na determinação de pontos de checagem, para que se possa aferir a qualidade do mapeamento produzido.

Os pontos devem ser dispostos em lugares em que o terreno ofereça nitidez, preferencialmente em lugares de fácil acesso, como cantos de cercas, regiões lindeiras de estradas e construções. Consideram-se más escolhas árvores, regiões homogêneas e locais próximos a espelhos d'água. Coelho e Brito (2007)

A distribuição e a densidade dos pontos a serem distribuídos em uma área mapeada são funções das características desta área e do plano de voo a ser executado, sendo papel de um bom projetista no momento do planejamento, realizar cuidadoso exame das imagens de satélite disponíveis da área e se possível realizar um reconhecimento de campo das condições do terreno. Recomenda-se fortemente a inclusão de pontos de apoio nas extremidades da área mapeada, a precisão tende a ser afetada devido a menor taxa de sobreposição das imagens nesta região. Silva Neto (2015)

Locais onde a variação de altura é muito pronunciável também devem ser contemplados com um par de pontos de apoio, amarrando o levantamento a estes pontos e melhorando a precisão altimétrica do bloco naquela região. Uma estratégia a se considerar a fim de aumentar a quantidade de imagens apoiada, e o número de vezes que um ponto é registrado por uma imagem, aprimorando assim a orientação exterior do bloco fotogramétrico é distribuir homogeneamente uma malha de pontos contemplando as áreas faltantes.

Pontos de verificação são importantes para um projeto fotogramétrico para a avaliação da acurácia dos processos de triangulação executados, são eles que serão alvos de comparação e darão base para o controle estatístico da qualidade do mapeamento.

2.3.4 Principais Aplicações

O uso da aerofotogrametria como fonte de dados topográficos planimétricos e altimétricos, de acordo com Silva e Costa (2010), teve seu início por volta dos anos 1950. No Brasil, somente em 1970 métodos aerofotogramétricos foram utilizados pelos Departamentos de Estradas de Rodagem (DER).

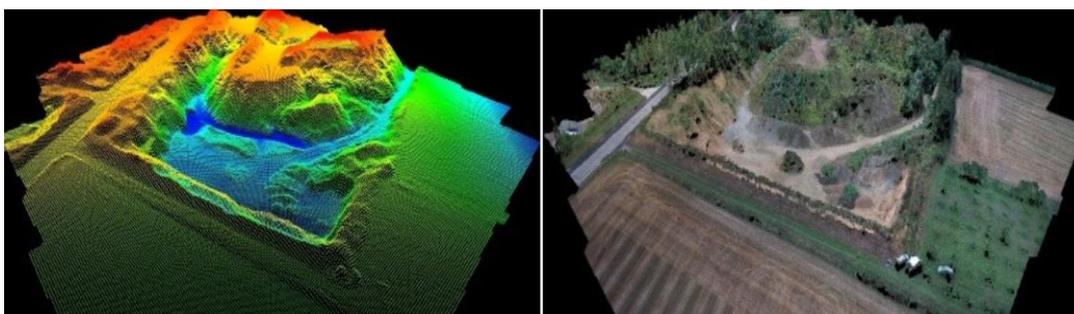
Desde então seu uso vem sendo fomentado nas mais diversas aplicações associadas a engenharia civil, como por exemplo o projeto geométrico de estradas e ferrovias, segundo Silva e Costa (2010) apud Sadowski (1971). A fotogrametria inicialmente foi utilizada nestes casos apenas para fase de reconhecimento do terreno, anteprojeto, estudos de traçado e viabilidade. Porém, mais recentemente o DNIT passou a especificar em suas normas o uso da

fotogrametria também para aferição de dados topográficos também para elaboração de projetos básicos e executivos, destacam Silva e Costa (2010).

Com o advento dos VANTs, de acordo com Silva Neto (2015), a fotogrametria ganhou um grande aliado na obtenção dos dados, tornando sua utilização mais acessível e menos onerosa. O uso dos VANTs como plataforma de aquisição de imagens possibilita a redução das escalas de voo, levando a produtos com precisões ainda maiores.

Silva e Costa (2010), indicam que a fotogrametria é um método eficiente de mapeamento de grandes extensões, permitindo inclusive o levantamento em áreas inacessíveis por meio terrestre. A aplicação da fotogrametria também cria um registro fotográfico da área de projeto, além de outros produtos de grande utilidade como Modelo Digital do Terreno (MDT), Modelo Digital da Superfície (MDS) e as ortoimagens. (Figura 14).

Figura 14 - Modelo Digital do Terreno (à esquerda) e Modelo tridimensional Texturizado (à direita)



Fonte: Droneng Drones e Engenharia (2015)

Apesar disso, a fotogrametria pode ser problemática se as definições dos parâmetros de precisão em relação as exigências de projeto não forem atingidas, podendo acarretar grandes erros, por exemplo no cálculo de volume de terraplenagem, indicam Silva e Costa (2010). Isso pode estar associado a presença de vegetação densa, que provoque a cobertura da superfície real do terreno, não sendo possível aferir parâmetros razoáveis de áreas com essa característica.

Silva e Costa (2010) destacam, que reconhecidamente a fotogrametria oferece níveis de precisão inferiores aos da topografia convencional, entretanto, a aplicação de pontos de controle pode tornar os métodos menos discrepantes. O que irá determinar se o uso da fotogrametria será possível ou não, para obtenção dos dados, é a precisão oferecida pelo equipamento utilizado em comparação à exigida em projeto.

A fotogrametria também possui aplicações na área de arquitetura. Segundo Coelho e Brito (2007), é utilizada para mensurações em obras de restauração e para geração de modelos 3D, utilizados como plataforma de estudo e projeto (Figura 15).

Figura 15 – Modelo Digital Tridimensional da Ponte Hercílio Luz obtido a partir de técnicas fotogramétricas

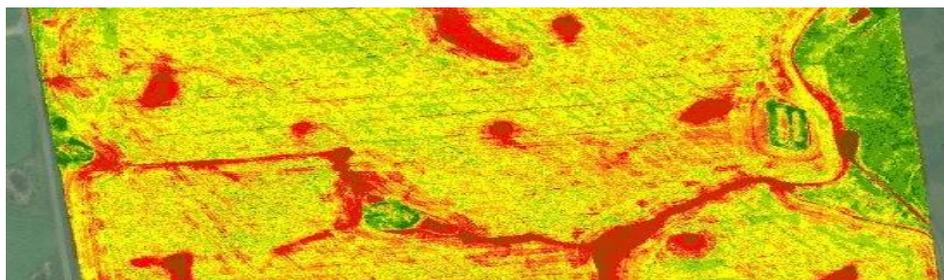


Fonte: Digital Globe (2017)

Shimabukuro e Ponzoni (2017), destacam o papel fundamental da fotogrametria e do sensoriamento remoto na fiscalização de áreas desmatadas da Amazônia brasileira, proporcionando a quantificação dessas áreas, direcionando os planos de ação que combatem o desflorestamento.

Outra aplicação da fotogrametria, associada ao uso de VANTs, tem sido na chamada agricultura de precisão. Segundo Bernardi et al (2014), é possível aferir, conforme a resolução espectral e radiométrica dos sensores empregados, índices que estão atrelados a diversas propriedades fisiológicas da vegetação cultivada, como: vigor, senescência, estresse hídrico. (Figura 16).

Figura 16 – Mapa de saúde da vegetação em uma plantação de canola



Fonte: Droneng Drones e Engenharia (2015)

2.4 PRECISÃO E EXATIDÃO

2.4.1 Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais

O decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, define critérios para a classificação de produtos cartográficos através de parâmetros acerca de sua exatidão e da distribuição de erros presentes, de acordo com Martin (2016). O decreto estabelece o uso de um índice denominado Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), utilizado segundo Rocha (2002), como forma de padronizar e aferir a qualidade dos produtos cartográficos brasileiros através de parâmetros internacionais de precisão e exatidão.

Para tanto, como observado o disposto na norma ISO 19115, segundo Martin (2016), encontram-se os parâmetros relativos a precisão posicional dos dados aferidos de acordo com cada PEC, constando no decreto de lei relacionado a tabela 3. O decreto de lei também estabelece os valores aceitáveis de erros conforme a escala do mapa, classificando os produtos cartográficos em três classes, que dependem da precisão requerida para aplicação do produto gerado.

Tabela 3 - Precisão posicional de acordo com cada PEC

Carta	PEC	Erro padrão	PEC	Erro padrão
	Planimétrico		Altimétrico	
Carta A	0,5 mm x escala	0,3 mm x escala	1/2 equidistância	1/3 equidistância
Carta B	0,8 mm x escala	0,5 mm x escala	3/5 equidistância	2/5 equidistância
Carta C	1,0 mm x escala	0,6 mm x escala	3/4 equidistância	1/2 equidistância

Fonte: decreto nº 89.817

Martin (2016) apud Monico et al. (2009) indicam que a definição original de acurácia estabelecida por Gauss, relaciona os efeitos sistemáticos e aleatórios dos erros nas medições, enquanto que a precisão se relaciona apenas com seus efeitos aleatórios. Deste modo é possível concluir que o conceito de acurácia, por si, define critérios de precisão.

Conforme Martin (2016), como consta o § 4º do item 2. do Art. 8º do Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, o nível de exatidão posicional de um objeto geográfico ou espacial depende diretamente da exatidão do produto cartográfico, sendo assim, é de suma importância que o processo de aquisição, gere dados com geometria posicional igual, ou superior ao

produto final exigido. Ainda de acordo com o decreto, os termos Desvio Padrão (DP) e Erro Padrão (EP), devem ser tomados com sinônimos, para as análises.

Martin (2016), em seu artigo apresenta os valores referentes ao Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), advindos da Especificação Técnicas dos Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais (ET-PCDG). Valores estes que complementam os estabelecidos pelo decreto de lei.

Na tabela 4, conforme Martin (2016), estão elucidados os PEC-PCD Altimétrico para Modelos Digitais de Terreno (MDT), de Elevação (MDE) e de superfície (MDS).

Tabela 4 - Padrão de exatidão Altimétrico dos produtos cartográficos digitais

PEC-PCD	1:1000 (Eqd=1m)		1:2000 (Eqd=1m)		1:5000 (Eqd=2m)		1:10000 (Eqd=5m)	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,67	2,50	1,67
B	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00
C	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50
D	1,00	0,50	1,00	0,50	2,00	1,20	5,00	3,00

Fonte: Martin

Na tabela 5 os PEC-PCD planimétricos para produtos cartográficos digitais.

Tabela 5 - Padrão de exatidão planimétrico dos produtos cartográficos digitais

PEC-PCD	1:1000		1:2000		1:5000		1:10000	
	PEC (m)	EP (m)						
A	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70
B	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00
C	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00
D	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00

Fonte: Martin

3 METODOLOGIA

O método de pesquisa aplicado para o desenvolvimento deste trabalho é o caso de estudo, tendo como fonte de dados bases literárias e projetos semelhantes já realizados, analisados com o intuito de oferecer substancialidade para o levantamento de campo, este que também é fonte de dados para as análises decorrentes desta pesquisa.

O levantamento de campo também foi utilizado como abordagem para obtenção dos dados, cujo processamento e a análise foram efetuados de forma qualitativa e quantitativa, e compõem os resultados deste trabalho.

3.1 PROJETO AEROFOTOGRAMETRICO

Os levantamentos aerofotogramétricos foram executados no terreno pertencente a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), na localidade conhecida como Curva do Arroz, mapeando uma área de cerca de 227.000 m² (22,7 ha) da gleba de terras. Extensão, cuja a determinação levou em conta o tempo de voo necessário para que se pudesse obter as imagens respeitando os demais critérios fixados para controle deste trabalho. O tempo de voo, tem uma relação direta com a altura de voo estabelecida, uma vez que em menores alturas, maior quantidade de imagens será necessária para cobrir uma área com mesma extensão, como estabelece Coelho e Brito (2007).

Para esta pesquisa, as missões de voo foram executadas em três alturas distintas: 120m, 80m, e 40m com área de superposição de 75 % tanto longitudinalmente quanto transversalmente, operando na modalidade Voo Contínuo visando a otimização do uso da bateria, em que o VANT não reduz sua velocidade para capturar as imagens. Isso possibilita uma melhor alocação de recursos em campo, outro critério levado em conta para determinação da extensão da área de pesquisa.

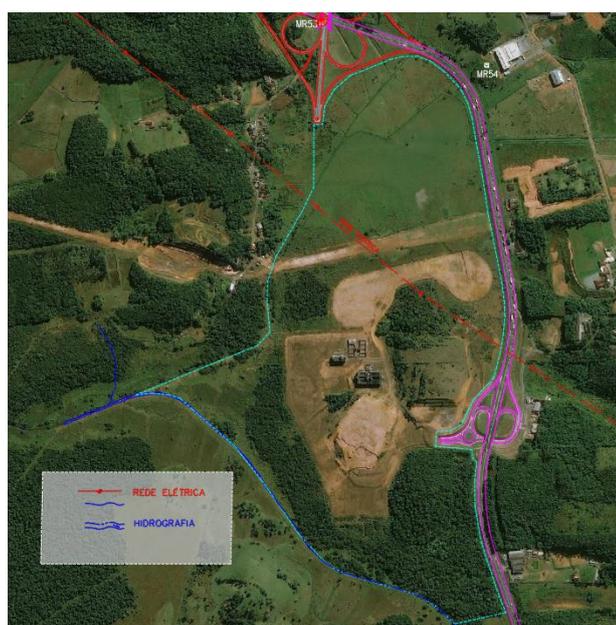
A qualidade do levantamento foi controlada estatisticamente através dos Padrões de Exatidão Cartográfica por meio de 15 pontos de checagem, locados e georreferenciados em campo, juntamente com 15 pontos de apoio, estes, utilizados como condição de contorno para o processamento dos dados. O georreferenciamento destes pontos se deu com a utilização de GPS geodésico RTK, buscando máxima qualidade na determinação dos dados de verificação e de apoio aos processos fotogramétricos.

As etapas que se seguiram, foram de processamento de dados, elaboração dos produtos fotogramétricos digitais, sua análise estatística e comparação com os padrões de exatidões vigentes, aferindo assim a qualidade dos trabalhos desenvolvidos. O Processamento das imagens obtidas se deu com aplicação de um software de processamento digital de imagens fotográficas, onde foram desenvolvidos modelos digitais de terreno, superfície e elevação. O software AutoCad Civil 3D também foi largamente utilizado, na elaboração de representações, no planejamento, bem como, para aplicação dos dados gerados pela fotogrametria.

3.1.1 Área Mapeada

A área selecionada para realização do levantamento fotogramétrico, foi o terreno pertencente a Universidade Federal de Santa Catarina, localizado no km 52 da Rodovia BR 101, na região sul do município de Joinville. A área total de propriedade da universidade mede aproximadamente 1.263.323 m² (126,3 ha) com confrontações irregulares limitando-se a Leste com a BR-101, ao Norte com o trevo de acesso Sul do município de Joinville denominado, saída 50 da BR 101, a Oeste pelo Rio Braço Comprido e a Sudeste pelo Rio Lagoa, figura 17.

Figura 17 - Terreno da Universidade Federal de Santa Catarina localizado na região sul de Joinville



Fonte: Autor (2018)

Como podemos denotar a partir também da figura 17, parte do espaço disponível para realização do levantamento encontra-se coberto por vegetação densa, outra parcela do terreno já possui uso, abrigando torres de linha de transmissão de alta tensão. Que por questões de segurança o sobrevoo dessa área não é recomendado, portanto esta região foi descartada do mapeamento.

Após está prévia análise a partir das imagens de satélite disponíveis e de uma visita ao local, definiu-se que a extensão da área em que o aerolevanteamento seria efetuado, como sendo: 227.000 m² (22,7 ha.), como em destaque hachurado na figura 18.

Figura 18 - Área Seleccionada para mapeamento fotogramétrico



Fonte: Autor (2018)

Cabe observar também que a área seleccionada não apresenta vegetação densa em grandes extensões o que não seria desejável para levantamentos deste tipo, nem mesmo grandes declives, o que poderia oferecer dificuldades de acesso para transporte dos equipamentos e materiais no momento da instalação dos pontos e da realização do georreferenciamento.

3.1.2 Planos de Voo

Para mapear a área seleccionada foram sobrevoados cerca de 320.000 m² (32 ha) de área total, tomando um deslocamento de em média 25 m das extremidades da área definida para ser mapeada. Os planos de voo foram elaborados com o apoio do aplicativo DroneDeploy,

software que apresentou melhor compatibilidade com o VANT utilizado para a captura as imagens durante as missões de voo e com o dispositivo Android utilizado para o pareamento e controle.

O VANT utilizado no aerolevantamento foi o DJI Phantom 4, figura 19, aeronave de uso recreativo que segundo informações da fabricante tem peso de decolagem de 1380g, com 350 mm de tamanho diagonal e tempo operacional de duração de bateria de cerca de 18 minutos, localizando-se através do sistema GPS/GLONASS, com precisão vertical $\pm 0,1$ m e horizontal $\pm 0,3$ m.

O Phantom 4 está equipado com sensor de imagem CMOS de $1/2,3''$ com resolução de 12 Mp [4000X3000], que focaliza automaticamente através de uma lente com campo de visão 94° , de $f=20$ mm, equivalente a 35 mm e $fstop = f/2,8$ com o foco no infinito, como indicado no capítulo 2.1.2.1. Cada imagem capturada pelo sensor requer entorno de 5,2Mb de espaço em memória para armazenamento.

Figura 19 - VANT DJI Phantom 4

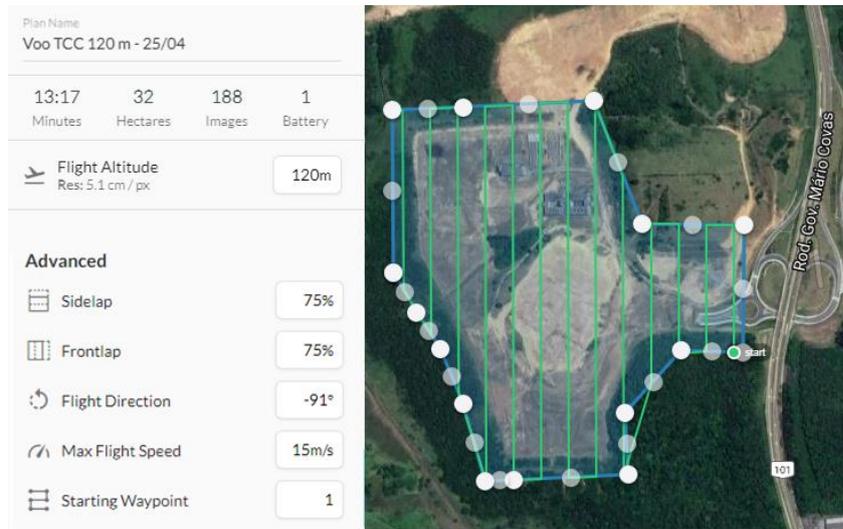


Fonte: DJI (2018)

Para o planejamento de voo a diferentes alturas foram considerados sobreposição longitudinal e transversal como sendo de 75 % para todos os casos, e a duração da bateria para fins de planejamento ficou minorada em 15 minutos por questões de segurança de modo evitar falta de energia durante os voos. Para as missões de voo, estavam disponíveis duas baterias, dando a possibilidade de realização de dois voos por deslocamento a campo.

Para o levantamento a 120 m, figura 20, foram previstas a captura de 188 imagens, totalizando 997,66 Mb de espaço necessário para armazenamento, e a realização de um voo de duração de 13:17 minutos não havendo trocas de bateria. O GSD teórico calculado através da equação 9, é de 5,1 cm/p coincidindo com o valor indicado pelo aplicativo.

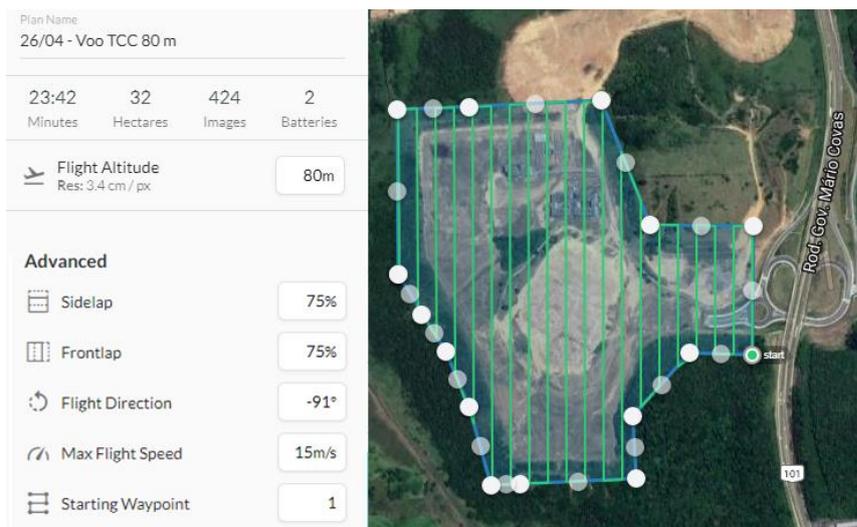
Figura 20 - Plano de voo no aplicativo DroneDeploy para 120 m de sobrevo.



Fonte: Autor (2018)

O levantamento realizado a 80 m, irá requerer, para obedecer aos critérios estabelecidos, a obtenção de 424 imagens e para isso a disponibilidade em disco de 2,15 Gb de espaço para armazenamento, sendo realizadas duas missões de voo, com duração total de 24:42 havendo uma substituição de bateria. O GSD teórico calculado através da equação 9, é de 3,49 cm/px sendo muito próximo do valor indicado pelo aplicativo. figura 21

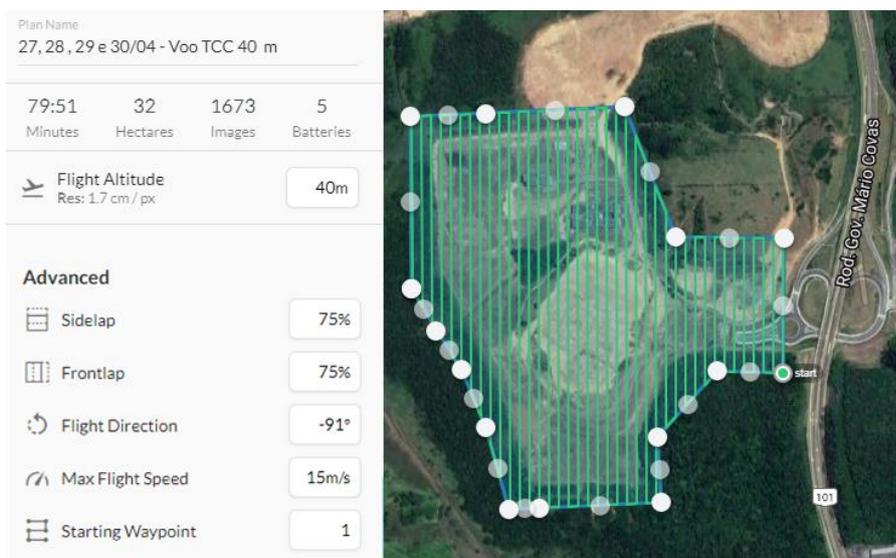
Figura 21 - Plano de voo no aplicativo DroneDeploy para 80m de sobrevo.



Fonte: Autor (2018)

De maneira análoga aos levantamentos realizados em alturas superiores a captura de imagens realizada a 40 m irá requerer a obtenção de um número representativamente maior de imagens, 1673 sendo equivalente 8,29 Gb de armazenamento necessário, neste caso podendo ser dividido em 3 missões distintas. Uma vez que serão necessários cerca de 79:51 de voo para conclusão deste mapeamento. O GSD teórico obtido foi de 1,71 cm/p praticamente o mesmo valor calculado pelo aplicativo.

Figura 22 - Plano de voo no aplicativo DroneDeploy para 40 m de sobrevoo.



Fonte: Autor (2018)

Na tabela 8 estão um resumo dos principais parâmetros determinados para cada altura de voo executada, onde é possível perceber uma variação muito pequena entre o GSD teórico calculado e o GSD indicado pelo aplicativo utilizado para o planejamento de voo:

Tabela 5- Resumos dos parâmetros de voos determinados

H [m]	T (min)	Nº de imagens	Sobreposição lateral	Sobreposição longitudinal	GSD teórico [cm]	GSD app [cm]
120	13:17	188	75 %	75 %	5,09	5,10
80	23:42	424	75%	75%	3,49	3,40
40	79:51	1673	75%	75%	1,71	1,70

Fonte: Autor (2018)

3.1.3 Planejamento da Distribuição dos pontos de apoio e checagem

A distribuição dos pontos foi planejada em função dos planos de voo a serem executados a diferentes alturas sobre a área a ser mapeada, e ainda estando em observância com os requisitos de distribuição geral, como recomendam Silva e Costa (2012). Também foram seguidas as demais recomendações presentes na literatura, contempladas no capítulo 2.3.3 deste trabalho.

Andrade apud Coelho e Brito (1998), recomenda que o espaçamento dos pontos seja de três a cinco bases no sentido longitudinal do voo, e de duas bases no sentido transversal. O termo base, compreende a distância entre o centro de duas exposições sucessivas em uma mesma faixa de voo.

Levando em conta o caráter acadêmico que esta pesquisa se propõe, tendo como variável praticada em campo a altura de voo, julgou-se razoável uma distribuição dispersa ao longo da extensão do terreno, uma vez que em diferentes alturas o posicionamento dos blocos, e o distanciamento das bases ficariam em pontos diferentes dificultando um posicionamento ótimo para as três alturas de voo praticadas.

Deste modo, procurou-se contemplar as áreas mais acidentadas do terreno dispondo os pontos em local aproximadamente plano, com boa visibilidade, e com determinada distância da ocorrência de sombras e de objetos altos como edifícios, árvores, taludes.

Silva e Costa (2012), apontam que quanto maior o número de imagens em que um mesmo ponto é registrado, mais confiáveis serão os valores finais das coordenadas calculadas.

A distribuição dos pontos de controle e de apoio para a realização da instalação dos alvos fotogramétricos está representada na figura 23.

Figura 23 - Distribuição dos pontos de Apoio e Checagem



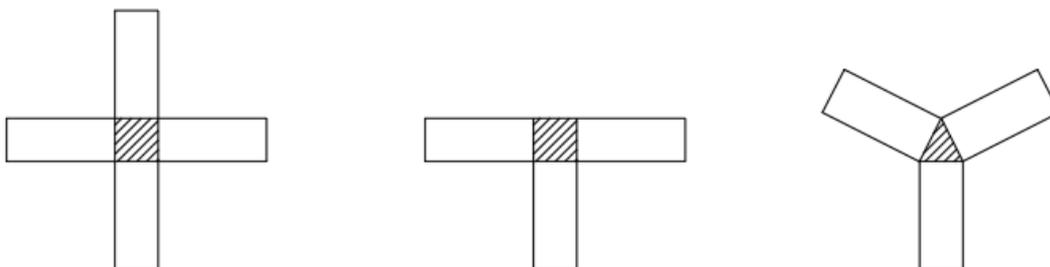
Fonte: Autor

3.1.4 Projeto de Alvos Fotogramétricos e Pré-sinalização

A pré sinalização, conforme indicam Silva e Costa (2012), é uma marcação artificial no terreno possível de ser identificada a partir do sensor aéreo. Seu objetivo mais comum é proporcionar medições mais precisas das coordenadas de pontos de apoio necessários aos processos de orientação fotogramétrica.

As dimensões das marcas dependem da escala da cobertura fotográfica que será realizada. Podendo ser o GSD o critério de partida para estabelecer a dimensão do alvo pré sinalizado. Os desenhos sugeridos para sinalização dos alvos são as formas em Cruz, T e Y, como esquematizados na figura 24, conforme Wollf apud. Silva e Costa (2012). É importante que o centro de cruzamento da sinalização seja coincidente com o marco ou o alvo implantado em campo, pois o mesmo terá suas coordenadas tridimensionais medidas posteriormente como ponto de apoio ou de checagem.

Figura 24 - Formatos recomendados para pré-sinalização fotogramétrica



Fonte: Wollf apud. Silva e Costa (2012)

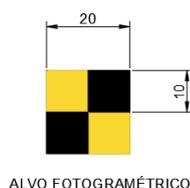
Conforme Silva e Costa (2012), as marcas geralmente são materializadas com tinta, telas plásticas ou tecidos resistentes fixados ao terreno. Do ponto de vista fotogramétrico é desejável que as marcas sejam as mais permanentes possíveis, pois não é conveniente que a pintura se deteriore pela ação das intempéries antes da realização do voo, ou nos intervalos entre as medições. É de fundamental importância que os alvos sejam pré-sinalizados com cores que permitam um contraste satisfatório em relação a coloração predominante do entorno, como também apresentar dimensões satisfatórias.

Os alvos fotogramétricos aplicados neste trabalho foram elaborados pela equipe de pesquisa e tiveram suas dimensões definidas de acordo com o cálculo do GSD para altura de voo mais crítica: 120 m.

O Valor teórico calculado foi de 5,10 cm/p, as dimensões do alvo foram estabelecidas de forma a dar certa folga para o encaixe dos pixels de modo a não haver a ocultação dos alvos através do fenômeno indesejado de mistura espectral, como destacam Shimabukuro e Ponzoni (2017). Cabe salientar que não somente a resolução espacial deve ser levada em conta, mas também aspectos como o contraste local de cores, a luminosidade e as próprias condições de visibilidade da altura em que é realizado o voo são fortemente determinantes para a boa fotovisualização dos alvos fotogramétricos e conseqüentemente para a precisão da medição, estabelecem Silva e Costa (2012).

O alvo fotogramétrico elaborado possui as seguintes dimensões figura 25.

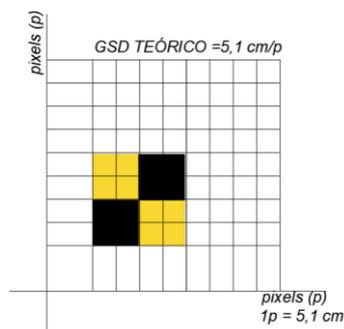
Figura 25 - Alvo fotogramétrico e suas dimensões em centímetros



Fonte: Autor (2018)

Que se comparadas a uma malha contendo as dimensões dos pixels plotadas em um plano 2D, (como na figura 26) podem nos oferecer um indicativo da funcionalidade do mesmo, através de uma comparação das dimensões alvo em relação ao GSD e ao pixel.

Figura 26 - Comparação entre o GSD calculado e o alvo fotogramétrico



Fonte: Autor (2018)

No sentido de tentar validar estas análises feitas, um voo de teste foi realizado, com o objetivo de se refinar o planejamento e dessa forma, obter os dados iniciais com maior qualidade possível, nos posteriores deslocamentos a campo.

O voo de testes ocorreu na Universidade Federal de Santa Catarina, no Centro Tecnológico de Joinville localizado no condomínio industrial Perini Business Park, Zona Industrial Norte do município de Joinville, e foram capturadas imagens de dois alvos fotogramétricos, denominados como Alvo 1 e Alvo 2, um pré-sinalizado, com coloração amarelo e preto. Outro, sem pré-sinalização, com coloração azul e amarelo figura 27.

Figura 27 - Alvos fotogramétricos instalados para teste



(a) Alvo 1

(b) Alvo 2

Fonte: Autor

O voo ocorreu em modo de pilotagem livre, figura 28 com planejamento prévio e foram sobrevoados os níveis de: 50m, 100m e 120m.

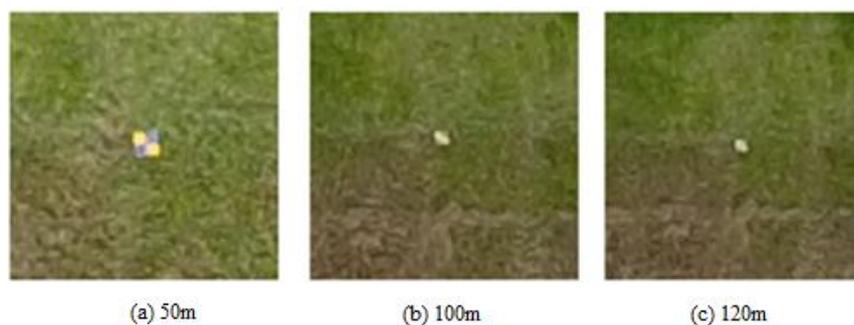
Figura 28 - Vista do aplicativo de Controle do VANT DJI GO



Fonte: Autor

O resultado obtido para o Alvo 1 foi considerado satisfatório para altura de voo igual a 50 m, onde possível realizar a foto identificação do alvo, inclusive percebendo um ótimo contraste da coloração do alvo com a coloração predominante do revestimento do entorno, figura 29a. Para imagem capturada à uma altura de 100 m, figura 29b, já é possível notar uma grande perda na resolução espacial do alvo fotogramétrico, tornando-o pouco nítido, mas ainda assim identificável, tanto seu formato quanto sua coloração. Para este nível de observação, constatou-se então, que a aplicação da pré-sinalização se torna imprescindível, de forma a aprimorar a foto visualização e a identificação dos alvos fotogramétricos nas exposições capturadas.

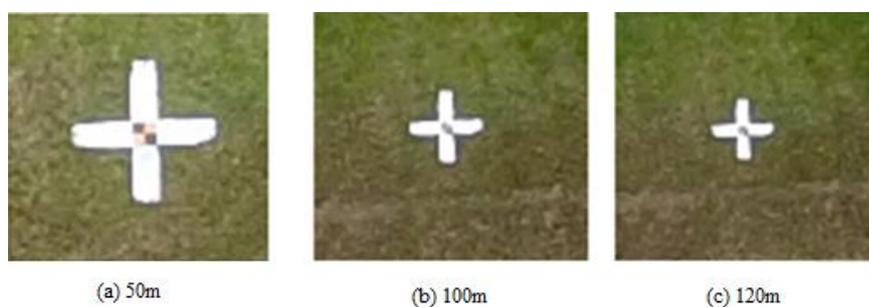
Figura 29 - Resultado da captura de imagens em voo de teste à diferentes alturas (a): 50 m (b): 100m (c):120m, para o Alvo 1



Fonte: Autor

Os resultados obtidos para o Alvo 2 pré-sinalizado foram satisfatórios do ponto de vista foto visual nos diferentes níveis de observações aplicados no teste. A sinalização reflexiva em formato de cruz proporciona um ótimo contraste com a coloração predominante da superfície do entorno, e através do encontro dos seus eixos é possível identificar e foto visualizar o alvo fotogramétrico, objeto de maior interesse de fato, figura 30.

Figura 30 - Resultado da captura de imagens em voo de teste à diferentes alturas (a): 50 m (b): 100m (c):120m, para o Alvo 2 pré-sinalizado



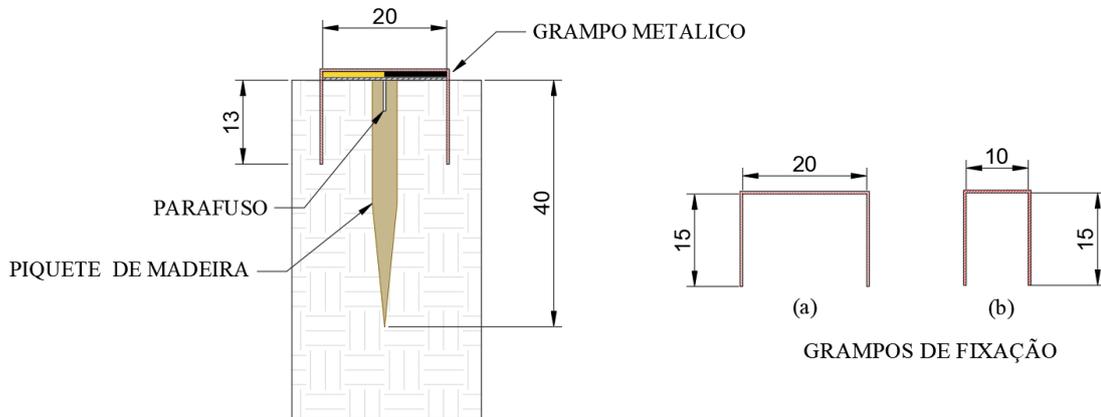
Fonte: Autor

Desta forma, este modelo foi adotado como padrão aplicado para marcação em campo dos pontos de controle e de apoio a serem georreferenciados e registrados para a composição dos resultados desta pesquisa.

A partir do modelo testado, cada alvo fotogramétrico foi produzido com 4 peças de material cerâmico, soldadas sobre uma chapa lisa de zinco com a utilização de adesivo polimérico termoplástico. Material escolhido levando em conta a resistência quanto à exposição as intempéries presentes em campo as quais os alvos estarão expostos durante o horizonte de levantamentos.

A marcação exata do ponto em que o alvo fotogramétrico foi instalado é materializada em campo por um piquete de madeira tratada (2X4X40cm), cravado no solo de forma manual, por percussão até seu arrasamento estar disposto rente ao nível do solo, figura 31. O alvo fotogramétrico é fixado por meio de um parafuso no ponto de tomada de coordenadas. Também são utilizados 2 grampos metálicos em formato U como no modelo indicado na figura 31a nas 4 faces dos alvos como modo de auxiliar no reforço para a fixação do alvo em solo, garantindo sua ancoragem em todo horizonte de levantamentos. Cada alvo fotogramétrico foi previamente identificado e numerado, através de pintura feita com tinta de alta durabilidade, afim de otimizar os processos de localização para o georreferenciamento, e de foto identificação durante o processamento das imagens.

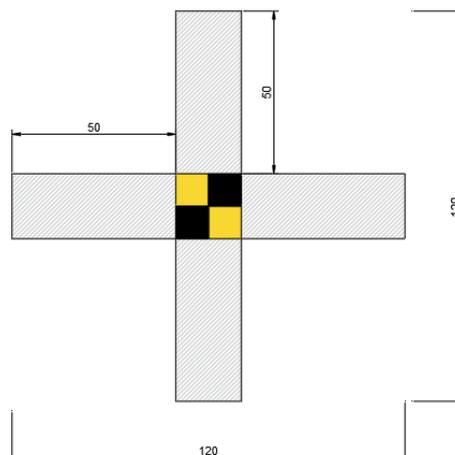
Figura 31 - Instalação de Alvo fotogramétrico em campo vista em corte, e grampos de fixação



Fonte: Autor (2018)

A pré-sinalização, é um artifício utilizado em apoio aos alvos fotogramétricos e serve meramente para facilitar a identificação do mesmo na imagem captada pelo sensor. A pré-sinalização não está de fato ligada ao alvo fotogramétrico, nem tampouco ao piquete que lhe dará suporte, mas é um elemento auxiliar, elaborado em tecido impermeável e resistente fixado ao solo com grampos metálicos de maneira a sinalizar, com dimensões mais expressivas a localização do alvo fotogramétrico, figura 32. Os grampos metálicos utilizados para a fixação da pré-sinalização possuem o formato U, indicado na figura 31b. Optou-se por fazer a identificação correspondente aos alvos, também na pré-sinalização, afim de ampliar as possibilidades da foto visualização da identidade dos pontos no momento do processamento.

Figura 32 - Conjunto Alvo/Pré-sinalização



Fonte: Autor (2018)

3.1.5 1ª Etapa de Campo - Instalação dos Alvos Fotogramétricos

As instalações dos alvos fotogramétricos, projetados, testados e fabricados na etapa anterior foram realizadas entre os dias 13 e 22 de abril de 2018 em 5 deslocamentos, por 4 equipes de campo, compostas por no mínimo duas pessoas. Este foi um critério adotado priorizando a segurança e a produtividade em campo, tendo em vista a distância e o isolamento do local de trabalho. Esta etapa de campo teve como objetivo instalar, localizando de forma aproximada, segundo planejamento preliminar, 30 conjuntos de alvos fotogramétricos pré-identificados com numeração, sendo 15 destes correspondentes aos pontos de apoio com padrão amarelo e preto, e 15 como sendo aos correspondentes aos pontos de controle, com padrão azul e amarelo.

A localização para instalação dos pontos foi obtida de forma aproximada com o uso do aplicativo Mobile Topographer, importando um documento com as coordenadas definidas na etapa de planejamento em formato UTM no DATUM SIRGAS 2000, e utilizando-se da função rastreamento dessa aplicação, consciente das restrições que esse tipo de medição impõe, devido à grande incerteza vinda do dispositivo e do aplicativo em si, porém sendo estas razoáveis para a etapa de localização.

Neste sentido uma relação de equipamento foi preparada para ser levada à campo:

- Dispositivo Android + Aplicativo Mobile Topographer
- Marreta de Aço 2kg
- Parafusadeira à bateria
- 2 Baterias
- Martelo
- Marcador permanente
- Trena
- Enxada

Os materiais utilizados nesta etapa em campo, foram:

- 15 Alvos fotogramétricos padrão; azul/amarelo
- 15 Alvos fotogramétricos padrão; amarelo/preto
- 60 faixas reflexivas para pré-sinalização (20X120cm)
- 120 Grampos (10X15cm) para fixação das faixas
- 60 Grampos (20X15cm) para reforço dos alvos

- 30 Parafusos (7 cm)
- 30 Arruelas de aço
- 30 Arruelas de borracha
- 30 estacas de eucalipto tratado

De forma a melhorar a produtividade em campo, padronizar o procedimento de instalação dos alvos, garantindo uniformidade nos resultados e a correta execução dos passos descritos, procurou-se executar em todos os pontos instalados os seguintes procedimentos:

- Regularização da superfície e limpeza do perímetro de instalação utilizando a enxada, inclusive com remoção da vegetação; (Figura 33).
- Cravação da estaca no ponto definido como sendo de tomada de coordenadas; (Figura 34).

Figura 33 – Limpeza da área de instalação



Fonte: Autor (2018)

Figura 34 – Cravação da estaca



Fonte: Autor (2018)

- Centralização do primeiro elemento da pré-sinalização (faixa 1);
- Fixação das extremidades da pré-sinalização (faixa 1) com os grampos; (figura 35).

Figura 35 – Fixação do elemento de sinalização 1



Fonte: Autor (2018)

- Transpasse, centralização e esquadro do segundo elemento de pré-sinalização (faixa 2);
- Fixação das extremidades da pré-sinalização (faixa 2) com os grampos; (Figura 36).
- Centralização do alvo fotogramétrico com a numeração correspondente à localização;(figura 37).

Figura 36 – Fixação do elemento de sinalização 2 Figura 37 - Centralização do alvo



Fonte: Autor (2018)



Fonte: Autor (2018)

- Fixação do alvo com uso da Parafusadeira e o conjunto parafuso + arruela de borracha + arruela de aço;
- Instalação do reforço na fixação através dos grampos sobre o alvo fotogramétrico;(figura 38).
- Fotografia do ponto;
- Obtenção das coordenadas geográficas aproximadas através do aplicativo para dispositivos Android Mobile Topographer; (figura 39)

Figura 38 – Reforços instalados Figura 39 - Tomada de coordenadas com dispositivo



Fonte: Autor (2018)



Fonte: Autor (2018)

3.1.6 2ª Etapa de Campo - Realização das Missões de Voo

As missões de voo já planejadas em 4.1.2 foram executadas entre os dias 25 e 30 de abril de 2018, por um mesmo operador acompanhado por diferentes observadores, compondo dessa forma distintas equipes de campo.

Como objetivo destes deslocamentos estavam a efetivação dos planos de voo elaborados através da aplicação DroneDeploy sobre a área definida, registrando os dados de campo através da captura de imagens a partir de um sensor embarcado no VANT em questão, respeitando os padrões de voo estabelecidos pela pesquisa. Para tanto, a relação de equipamentos levada a campo em cada deslocamento foi a seguinte:

- VANT-DJI Phantom 4
- Controle Remoto
- Dispositivo Android equipado com aplicativos DroneDeploy e DJI GO
- Cabo USB
- Case de acondicionamento
- Hélices
- 2 baterias
- Cartão de memória,
- Proteção do gimble
- Caderneta de campo
- Checklist

Antes da ativação do VANT e da conectividade com o dispositivo Android e o aplicativo DroneDeploy foi adotado o seguinte procedimento de verificação, como checklist de segurança:

- Verificação da montagem das 4 hélices
- Verificação da fixação da bateria e de sua carga
- Verificação do destravamento do gimble
- Raio para decolagem segura > 5 m

Por fim, como parâmetros de voo, aplicados em todos os planos executados nos diferentes deslocamentos, asseguraram-se os seguintes padrões:

- Sobreposição lateral: **75%**
- Sobreposição longitudinal: **75%**
- Azimute de voo: **+1°**
- Velocidade Máxima: **15 m/s**
- Horário para as decolagens: **entre 11:00 e 14:00** de dias ensolarados ou com poucas nuvens

A figura 40 ilustra o processo de operação de uma das decolagens realizadas para captura de imagens.

Figura 40 - Processo de decolagem (a)Vista do aplicativo de mapeamento, (b)Operador, (c)VANT em processo de subida.



Fonte: Autor (2018)

3.1.6.1 Voo à 120 m

Foi realizado no dia 25/04/2018, tendo duração de 12 minutos, iniciando-se as 13:15. para conclusão do objetivo foi consumida 1 carga da bateria sendo capturadas um total de 204 imagens totalizando 0,98 Gb de espaço ocupado na memória. As condições climáticas eram favoráveis, vento leve e poucas nuvens. Foi considerado como sendo um voo sem adversidades, sinal do rádio controlador dentro da normalidade, bem como localização dos pontos de passagem do aplicativo. Esta missão de voo gerou uma sequência de arquivos em formato jpg denominada: DJI_TCC_120m (x).jpg

3.1.6.2 Voos à 80 m

Realizados em 26/04/2018, tendo início as 12:45 com tempo total de voo de 23 minutos, não contabilizando pausa de 16 minutos para troca de bateria e reposicionamento. Nesta missão de voo foram capturadas 454 imagens somando 2,21 gb de dados armazenados na memória do dispositivo em arquivos no formato .jpg com nome DJI_TCC_80m (x).jpg. As condições climáticas para o mapeamento foram avaliadas como ideais: leve brisa, raras nuvens. Os voos ocorreram sem anormalidades durante toda sua extensão. O rádio controlador manteve conexão com a aeronave durante todo voo e a localização dos pontos de passagem pelo aplicativo ocorreu sem nenhum problema observado.

3.1.6.3 Voos à 40 m

Os voos ocorreram em 4 datas distintas, 27, 28, 29 e 30 de abril de 2018 totalizando 111 minutos de voo, sendo as pausas referentes a cada um deles devidamente registradas nas cadernetas de voo. Não foram percebidas grandes variações na presença de nuvens nos dias dos levantamentos, embora no segundo dia de voos o vento foi um parâmetro observado com cautela, devido o sopro de rajadas mais intensas em alguns momentos. Já no primeiro dia de levantamento houve uma falta de comunicação do rádio controlador com o VANT, situação corrigida com a aproximação do operador e da linha de voo. Em algumas áreas principalmente aquelas definidas como sendo de manobras, o sobrevoo sobre a vegetação ocorreu a menos de 10 m de altura, situação considerada crítica pelo operador. Foi observado também, que durante a retomada da linha de voo, após a troca de bateria o VANT retornou a dois pontos de passagem do que seria o correto reestabelecer o levantamento. Situação esta, que fez que uma missão de voo extra tivesse que ser programada, para suprir as linhas de voos faltantes, uma vez que este erro de localização foi apreciado apenas com a importação das imagens para o programa de processamento. Nos 4 dias de levantamento foram capturadas 1982 imagens, correspondentes à um volume de 9,92 gb armazenados no dispositivo em formato .jpg com nome de arquivo DJI_TCC_40m (x).jpg.

Um resumo dos principais dados quantitativos referentes a realização das missões de voo, pode ser apreciado na (Tabela 9), com destaque para alta capacidade de armazenamento necessária para o voo realizado à uma altura de 40m.

Tabela 9- Resumos dados de campo nas missões de voo

H [m]	T (min)	N° de imagens	Dados	Baterias	Dias	Arquivo
120	12	204	0,98	1	1	DJI_TCC_120m (x).jpg
80	23	454	2,21	2	1	DJI_TCC_80m (x).jpg
40	111	1982	9,82	7	4	DJI_TCC_40m (x).jpg

Fonte: Autor (2018)

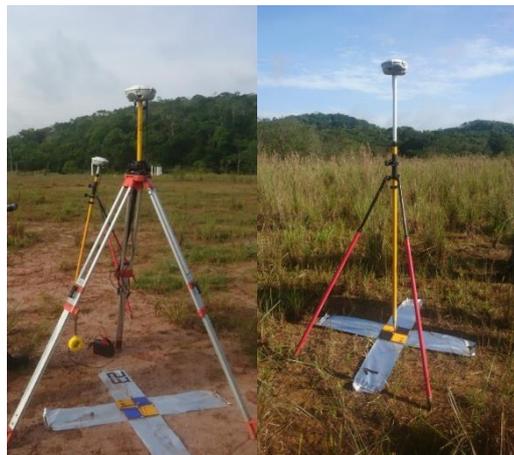
3.1.7 Georreferenciamento

Para o georreferenciamento dos pontos de apoio e de controle buscou-se apoio de uma equipe externa devido as limitações de acesso aos equipamentos requeridos neste processo, visando a melhor qualidade dos resultados e aplicação das técnicas mais refinadas tecnologicamente, uma vez que desta etapa serão obtidos os dados que servirão como parâmetro de controle desta pesquisa.

A aquisição das coordenadas dos pontos de apoio e checagem foi feita através do uso de receptores de dupla frequência do tipo L1/L2, com o tempo de coleta de base de 2 horas e tempo de coleta dos rovers de 5 minutos, sendo que a transformação de altitudes do sistema geométrico para o ortométrico foi feito com o software MAPGEO2015.

Utilizou-se como base, figura 41a um receptor GNSS RTK R8 marca Trimble estacionado sobre tripé devidamente nivelado e como rover, figura 41b uma antena idêntica, porém fixada em bastão apoiado, acompanhada da coletora de dados.

Figura 41 - (a) Base, (b) Rover



Fonte: Autor (2018)

Este tipo de instrumental fornece dados com incertezas da ordem de 10 mm na horizontal e de 20 mm na vertical. Os valores das coordenadas adquiridas estarão apresentados no formato de projeção UTM, Zona 22 Sul, Datum SIRGAS 2000 no capítulo 4.1. A estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) utilizada para obtenção dos dados foi a Santa Catarina/Araquari (SCAQ).

3.1.8 Processamento dos Dados

O processamento dos dados se deu com aplicação de um software de processamento digital de imagens, utilizando como processador uma CPU Intel Core I7 7500 2,90GHZ, com 16 Gb de memória RAM, VGA NVIDIA GeForce 940MX e SSD de 128Gb de capacidade. Tendo como duração respectivamente para os dados obtidos a 120 m, 80 m e 40 m, 6 horas, 18 horas e 22 horas.

O objetivo desta etapa é a geração dos produtos fotogramétricos correspondentes a cada altura de voo, através das imagens adquiridas em campo. Os produtos fotogramétricos extraídos são: o modelo tridimensional da superfície, o modelo digital de elevação, o mosaico de ortoimagens e o mapa com as curvas de nível.

Para tanto 4 rotinas principais de processamento podem ser destacadas, como abordagem para obtenção destes, de acordo com o manual de operações do software.

3.1.8.1 Alinhamento da câmera (Orientação interior e exterior)

Nesta fase, o software procura pontos comuns nas diversas imagens e combina-os, assim como encontra a posição da câmera para o momento de captura de cada foto e refina os parâmetros de ajustamento.

Como resultado, é gerada uma nuvem de pontos esparsos e o conjunto de posições da câmera é estabelecido, com seus respectivos vetores representados. Esta operação corresponde ao conceito de orientação interior, abordado na literatura como sendo a operação que confere informação métrica aos arquivos importados ao software, uma vez que até então, estes eram apenas imagens obtidas de forma isolada e salvas meramente como arquivos digitais no formato .jpg.

A nuvem de pontos esparsos representa os resultados do alinhamento das imagens e não é usada diretamente em nenhum outro processo, uma vez que a reconstituição tridimensional

baseada em nuvens esparsas não é recomendada, pois as áreas de interpolação costumam ser extensas demais para gerarem bons resultados. No entanto, o conjunto de posições da câmera é fundamental para a reconstrução da superfície 3D e para sequência do fluxo de trabalho.

3.1.8.2 Adensamento da nuvem de pontos (Fototriangulação analítica)

A densificação dos pontos é feita através dos parâmetros métricos extraídos pelo software e atribuídos para câmera na primeira rodada de cálculos, e através deles é possível gerar um adensamento de dados na vizinhança dos pontos detectados como comuns em diversas imagens, conforme os desenvolvedores, esta nuvem de pontos pode ser editada e classificada antes da exportação ou do prosseguimento do fluxo de trabalho.

Nesta etapa o software calcula informação de profundidade para cada imagem alinhada para combinar em somente uma entidade, estes processos lançam mão da fototriangulação analítica, técnica fundamental no mapeamento topográfico, modelo matemático que considera a reconstrução ótima dos feixes perspectivos de raios luminosos que formam o espaço-imagem no momento da aquisição das imagens fotográficas, para a reconstrução da profundidade do espaço-objeto.

É este modelo que permite a obtenção das coordenadas de vários pontos no terreno, a partir do conhecimento apenas das coordenadas dos pontos de apoio em campo.

3.1.8.3 Superfície (Modelo Numérico de Elevação)

O terceiro estágio é a geração de uma superfície através da nuvem de pontos densificada. Processo que pode ocorrer por duas abordagens: através da geração de uma malha interligada ou diretamente através da geração do modelo digital de elevação.

A malha interligada poligonal representa tridimensionalmente a superfície do objeto com base na nuvem de pontos densos, este tipo de representação de superfície não é sempre necessário para o desenvolvimento dos trabalhos, embora, se gerada, o MDE possa ser calculado a partir desta malha. Consiste verdadeiramente na reconstrução do espaço-objeto a partir do espaço-imagem em um ambiente digital tridimensional.

O MDE pode ser obtido diretamente a partir da nuvem de pontos densa e é a representação bidimensional do mapeamento realizado, associando uma escala de cores as variações altimétricas ao longo do terreno. O modelo pode ser construído em projeções geográficas,

planares ou cilíndricas, representando tanto MDS quanto MDT, de acordo com o grupo de pontos atribuído no momento do processamento.

3.1.8.4 Texturas e Mosaico de Ortofotos (Retificação e normalização de imagens)

Depois que a superfície é reconstruída tridimensionalmente, ela pode ser texturizada e ainda pode ser retificada em um modelo ortoretificado e este ser projetado em alguma das superfícies.

A operação do software é bastante intuitiva e simplificada, estando a qualidade dos produtos gerados fortemente associadas a rigidez dos padrões de controle aplicados durante a pesquisa e a qualidade dos dados de inserção.

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi aplicado o fluxo de trabalho geral para geração de modelos tridimensionais texturizados sugerido pela fabricante do software, definindo os padrões que se mostraram compatíveis dadas as limitações do hardware frente aos rigorosos requisitos de processamento exigidos pelo software.

A sequência dos passos executados genericamente para cada mapeamento em diferentes alturas foi:

- I. Importação das imagens para o Software
- II. Alinhamento das fotos
- III. Inspeção das falhas e remoção de imagens
- IV. Otimização da Câmera
- V. Construção da nuvem densa de pontos
- VI. Construção da malha interligada (Mesh Model)
- VII. Geração da Textura
- VIII. Geração do modelo Texturizado (Tiled Model)
- IX. Geração do Modelo Digital de Elevação
- X. Geração do Ortomosaico
- XI. Geração das curvas de nível
- XII. Marcação dos pontos de controle e apoio
- XIII. Importação das coordenadas dos pontos de checagem
- XIV. Exportação dos Resultados sem pontos de apoio
- XV. Geração dos relatórios sem pontos de apoio
- XVI. Importação das coordenadas dos pontos de apoio

- XVII. Reprocessamento dos dados com pontos de apoio
- XVIII. Exportação dos resultados com pontos de apoio
- XIX. Geração dos relatórios com pontos de apoio

Os dados referentes a cada parâmetro definido no processamento estão explicitados no capítulo 4.2.4 de forma comparativa em relação a cada altura de voo.

3.1.9 Apresentação e Representação gráfica

Para esta pesquisa o mapeamento com melhor classificação no PEC-PCD foi reproduzido em formato A3 com os produtos cartográficos relacionados a esta altura de voo, de modo otimizar o modo de apresentação e de comparação dos resultados gráficos obtidos com a aplicação de todos os processos descritos no capítulo anterior.

O layout de impressão (Anexo I) reúne os seguintes elementos, referentes a cada altura de voo praticada:

- Escala 1:2000 (Destaque) Mosaico de ortoimagens com marcação dos pontos de apoio e curvas de nível a cada 0,5 m
- Escala 1:20000 Modelo digital de Superfície
- Sem Escala Modelo Tiled 3D

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A apresentação dos resultados obtidos pelo desenvolvimento da pesquisa está organizada em 3 partes, se tratando de: georreferenciamento, do processamento, e da avaliação estatística dos resultados obtidos, está englobando uma análise mais profunda, além da discussão sobre a qualidade dos produtos fotogramétricos obtidos.

4.1 Georreferenciamento

Como resultado do georreferenciamento de campo feito com GPS RTK tem-se as coordenadas dos pontos de apoio e de checagem, apresentados na tabela 6, em coordenadas UTM no Datum SIRGAS 2000 zona 22S, ajustados através da RBMC SCAQ estes dados possuem incerteza de 1 cm na horizontal e 2 cm na vertical, advindos do sistema de medição.

Tabela 6 - Coordenadas dos pontos de Apoio e Checagem

PONTO	E[m]	N[m]	Z[m]	PONTO	E[m]	N[m]	Z[m]
A1	714.841,73	7.078.595,67	11,118	C16	715.071,76	7.078.667,43	11,330
A2	714.995,54	7.078.639,69	12,324	C17	714.891,45	7.078.585,69	11,714
A3	715.100,97	7.078.614,12	13,059	C18	714.870,72	7.078.475,65	12,200
A4	714.934,35	7.078.545,79	12,588	C19	715.025,11	7.078.504,86	16,220
A5	714.833,63	7.078.481,81	11,407	C20	714.919,20	7.078.372,64	11,642
A6	715.119,01	7.078.472,12	16,237	C21	715.029,82	7.078.409,84	21,231
A7	715.095,47	7.078.367,97	20,780	C22	715.124,52	7.078.400,24	20,512
A8	715.251,28	7.078.416,01	26,257	C23	715.319,21	7.078.378,24	23,646
A9	715.367,95	7.078.412,00	24,016	C24	715.082,30	7.078.303,42	22,787
A10	714.941,02	7.078.214,96	10,309	C25	715.232,28	7.078.340,26	19,323
A11	715.001,36	7.078.370,43	23,699	C26	714.962,62	7.078.293,61	14,413
A12	715.066,77	7.078.245,06	19,090	C27	715.149,31	7.078.245,20	18,580
A13	715.211,82	7.078.298,14	18,661	C28	715.066,16	7.078.165,98	15,402
A14	714.973,79	7.078.058,81	10,518	C29	714.982,04	7.078.124,24	10,778
A15	715.133,06	7.078.074,16	11,520	C30	715.050,62	7.078.062,26	11,550

Fonte: Autor (2018)

4.2 Processamento e pós-processamento de dados

O resultado do processamento será apresentado de acordo com relatório gerado pelo software, para cada altura de voo praticada.

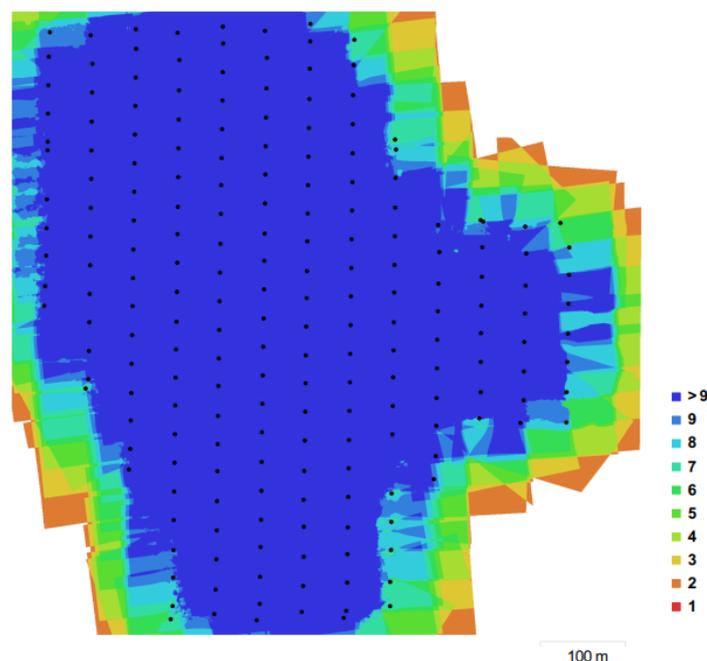
4.2.1 Resultados obtidos à 120m

As 204 imagens importadas para o software geraram um produto cartográfico final com GSD= 5,04 cm/p a uma altura de voo média real de 136m, uma diferença de 16 m dos planos originais, cobrindo uma área de aproximadamente 35 ha ao invés dos 32 ha planejados.

Estas pequenas diferenças eram esperadas e considerada nos planos de voo através dos fatores internos do próprio aplicativo de planejamento DroneDeploy, como indicado anteriormente no capítulo 2.3.3.

A figura 42 trata-se da representação das áreas contempladas pela sobreposição de imagens em relação ao ponto de captura das mesmas.

Figura 42 - Sobreposição de capturas em relação ao ponto de obtenção à 120 m



Fonte: Autor (2018)

Através da análise do mapa de cores, podemos denotar que toda área definida para o mapeamento teve sobreposição de pelo menos 9 imagens, valor considerado adequado para geração dos produtos fotogramétricos e que atende o critério definido como sendo 75% de sobreposição lateral e longitudinal.

Estas informações são obtidas através do processo de alinhamento das capturas, que também gerou uma nuvem de pontos esparsa com 100208 pontos, projetados 608447 vezes com erro de apontamento de 0,709p. Estas informações estão sucintamente resumidas na tabela 7.

Tabela 7 – Resultados obtidos à 120m

Imagens Alinhadas	204
Altura de voo estimada	136 m
GSD final	5,04 cm/p
Área de Cobertura	3.58e+05 m ²
Posições de câmera	204
Nuvem Esparsa	100,208
Projeções	608,447
Erro de projeção	0,709 p

Fonte: Autor (2018)

4.2.1.1 Posição Estimada de captura de imagens

Através da posição estimada da captura de imagens é possível estimar qual seria a incerteza do mapeamento caso não fossem aplicados pontos de apoio e controle em campo, e o referenciamento ocorresse apenas baseado no GPS embarcado no VANT, que atribui em cada captura suas coordenadas. Os resultados obtidos com esta consideração estão representados na tabela 8. Obtidos através do cálculo da média do erro medido entre a coordenada de captura de cada imagem, registrada pelo GPS embarcado no VANT, e a estimativa desta mesma coordenada através do modelo numérico, ajustado com o uso dos pontos apoio georreferenciados.

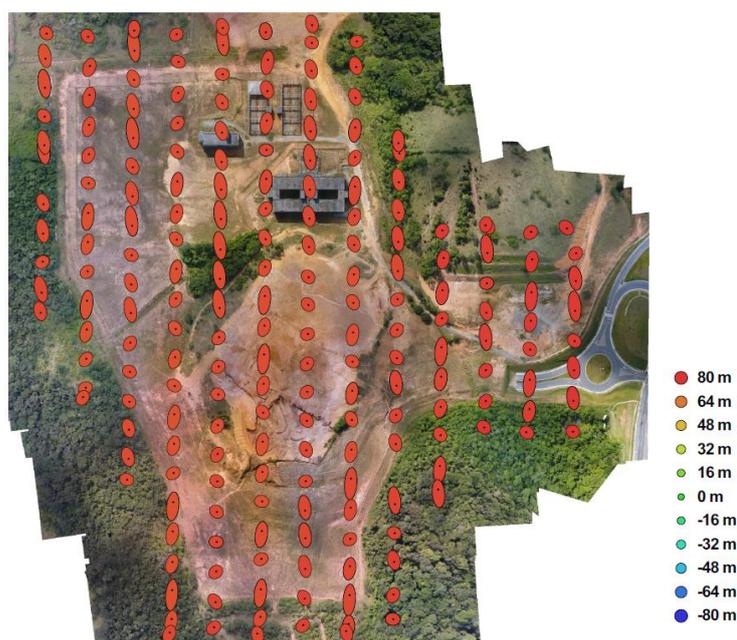
Tabela 8- Erro em relação a posição de captura de cada imagem à 120 m

E erro[m]	N erro[m]	E N Erro[m]	Z erro[m]	Erro Total [m]
1,07565	5,3233	5,43089	74,51056	74,7133

Fonte: Autor (2018)

Denota-se grande incompatibilidade na localização do eixo Z, atribuindo uma componente da ordem de 75m no erro médio calculado. O que não se percebe nas componentes planares de localização E e N que apresentaram valores de 1,07 e 5,32 respectivamente, esta última componente mais pronunciada por estar alinhada com o sentido de variação de posição do VANT, o que pode-se perceber mais facilmente com a análise da figura 43, que representa em cada ponto de captura o erro dos eixos E e N por uma elipse, sendo a excentricidade da elipse indicativo da magnitude do erro e representa o eixo Z através da coloração da elipse.

Figura 43 - Representação do erro relacionado ao posicionamento de cada captura à 120 m



Fonte: Autor (2018)

4.2.1.2 Avaliação dos pontos de checagem

O erro de apontamento dos pontos de apoio na imagem deve ser menor que 1 pixel, valor que lhe confere incerteza inferior ao valor do GSD final atingido pelo mapeamento, neste caso o valor de 0,169 é razoável, produzindo precisão dos pontos de controle igual a 3,010 cm valor, excelente levando em conta o GSD final do mapeamento igual a 5,04cm/p, considerando que grande parte desta incerteza advém do eixo Z, tabela 9. Também observa-se que o ponto que obteve menor valor de projeções, o que é equivalente ao número de imagens em que foi registrado, identificado e teve suas coordenadas calculadas, foi o ponto A5 com 13 projeções,

valor suficiente para se obter um bom ajuste, uma vez que o módulo do erro, expresso na coluna (Erro Total) foi igual a 3,645 cm, valor ainda inferior a resolução do mapeamento.

Os pontos de checagem, tomados como principal indicador de qualidade desta pesquisa, assumem a função de, mediante o cálculo da discrepância da coordenada estimada pelos processos de aerotriangulação executados pelo software e a coordenada adquirida em campo pelo processo de georreferenciamento, indicar o erro médio quadrático referente às várias observações. Para este mapeamento o resultado obtido foi igual a 4,225cm, que comparado como valor do GSD final é considerado excelente m tabela 10

Tabela 9 - Avaliação do erro médio quadrático dos pontos de apoio. Dados obtidos à 120m

PONTO	E Erro [cm]	N Erro [cm]	Z Erro [cm]	Erro Total	Projeções	Erro [p]
A1	2,281	2,781	0,089	3,598	15	0.039
A2	-2,564	0,292	-0,196	2,588	19	0.093
A3	-2,587	0,341	-1,461	2,990	16	0.631
A4	-1,389	0,680	0,320	1,579	19	0.043
A5	3,475	0,727	0,827	3,645	13	0.029
A6	2,184	-1,402	1,342	2,922	17	0.029
A7	1,117	-2,441	1,745	3,202	17	0.031
A8	-1,924	2,084	-0,915	2,981	15	0.076
A9	-0,641	0,965	0,344	1,208	14	0.047
A10	3,694	-0,837	1,332	4,015	15	0.000
A11	0,262	1,690	-3,238	3,662	16	0.631
A12	-1,854	-1,191	-0,779	2,337	17	0.038
A13	-1,428	-0,261	1,870	2,367	18	0.082
A14	1,202	0,274	0,665	1,400	15	0.050
A15	-1,606	-3,697	-1,893	4,453	15	0.050
Total	2,667		1,394	3,010		0.169

Fonte: Autor (2018)

Tabela 10 - Avaliação do erro médio quadrático dos pontos de controle. Dados Obtidos a 120m

PONTO	E erro [cm]	N erro [cm]	Z erro [cm]	Erro Total	Projeções	Erro [p]
C16	-3,218	0,279	-1,538	3,577	17	0.010
C17	-0,219	1,815	4,555	4,908	20	0.012
C18	-2,943	0,287	0,374	2,981	18	0.014
C19	0,043	0,321	-0,003	0,324	17	0.014
C20	2,342	-0,731	2,131	3,250	19	0.010
C21	1,716	-1,825	-4,135	4,834	17	0.056
C22	1,525	-2,023	1,409	2,899	18	0.014
C23	-1,954	0,484	-4,474	4,906	17	0.010
C24	-1,639	-0,011	-5,196	5,448	14	0.007
C25	-1,833	0,837	-0,005	2,015	20	0.006
C26	-1,025	0,011	-3,461	3,609	20	0.014
C27	0,500	-0,705	1,766	1,966	13	0.023
C28	-0,892	-1,354	-2,997	3,408	17	0.014
C29	0,203	-0,484	-6,271	6,293	19	0.006
C30	1,630	-1,309	-7,285	7,578	18	0.019
Total	2,020		3,745	4,255		0.019

Fonte: Autor (2018)

4.2.1.3 Análise e qualidade PEC PCD

A partir do erro médio quadrático calculado com os pontos de verificação foi possível calcular a média, a variância e o desvio padrão dos resultados para cada eixo do levantamento, para então, finalmente fazer a determinação do Erro Padrão Horizontal e o Erro Padrão Vertical e classificar o mapeamento como sendo CLASSE A, com EP (E,N)= 1,96 cm; EP (Z) =3,35cm podendo ser reproduzido em escala 1:1000, tabela 11

Tabela 11 - Parâmetros estatísticos e o Erro Padrão para o mapeamento a 120 m

Parâmetro	E [cm]	N [cm]	Z [cm]
Média aritmética	-0,38435	-0,29378	-1,67521
Variância	2,81696	1,02884	11,21740
Desvio Padrão	1,67838	1,01432	3,34924
Erro Padrão	1,96107		3,34924

Fonte: Autor (2018)

4.2.1.4 Produtos Fotogramétricos

O principal produto fotogramétrico extraído pelo processamento é o mosaico de ortoimagens, figura 44, com GSD = 5.04 cm/p, georreferenciado em coordenadas UTM, Zona 22 S no Datum SIRGAS 2000.

Figura 44- Mosaico de Ortoimagens obtidas à 120 m

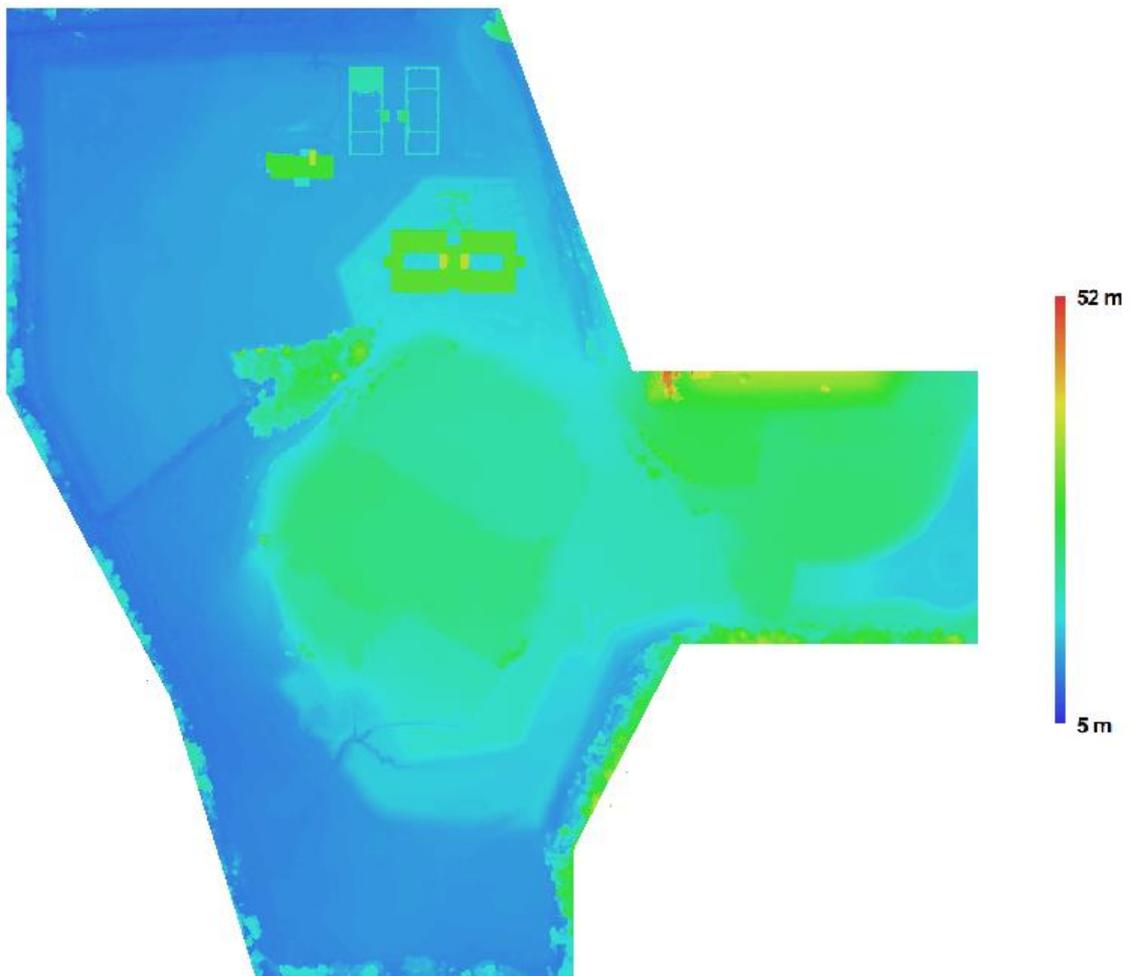


Fonte: Autor (2018)

O MDE , figura 45, foi gerado através da nuvem densa de pontos, sem classificação, e sem filtragem, portanto descrevendo a superfície exposta as capturas das imagens, sendo reconstruídos 98,53 pontos /m² mapeado, a resolução do produto fotogramétrico foi igual a 10,1 cm/p. Neste modelo de representação, georreferenciado em coordenadas UTM, Zona 22 S no Datum SIRGAS 2000, a altimetria do terreno é representada por uma escala de cores,

variando de pixel a pixel, onde cores mais quentes representam áreas com maiores altitudes, e cores mais frias áreas mais baixas.

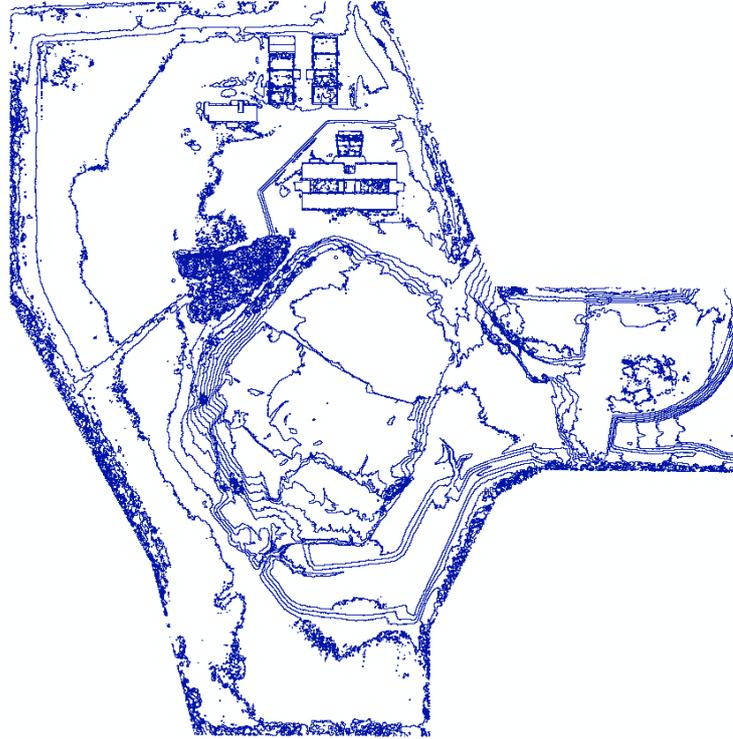
Figura 45 - Modelo Digital de Elevação correspondente a superfície exposta a captura das imagens a 120 m



Fonte: Autor (2018)

Na cartografia e na topografia, uma das formas mais difundidas e simplificadas de representação de elevação é a representação por curvas de nível, para tanto com os resultados obtidos com o modelo digital de elevação apresentado, foi possível gerar o seguinte mapa com a representação da altimetria do terreno em curvas de nível, figura 46.

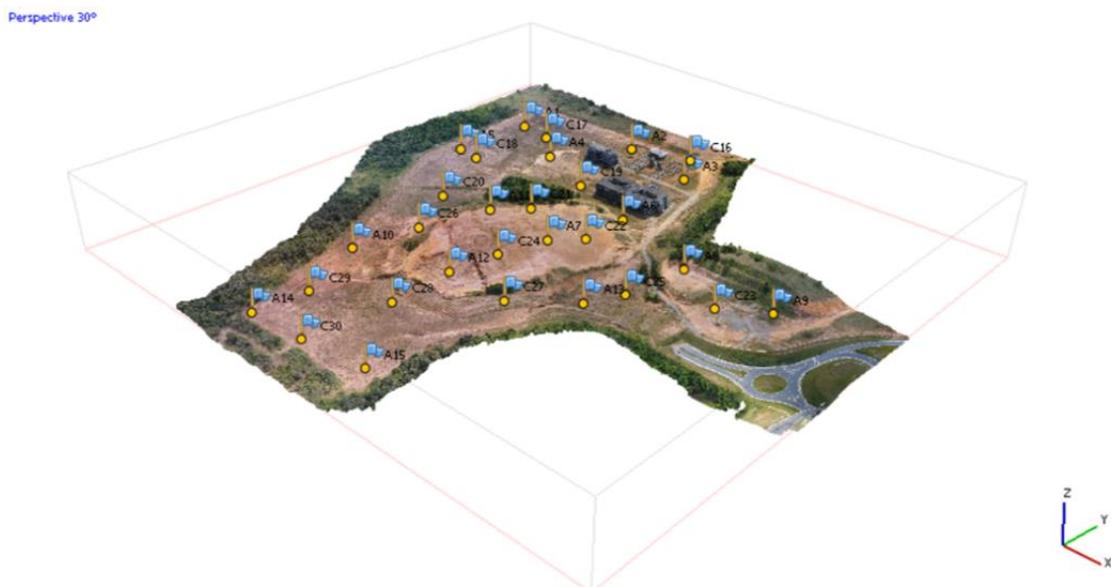
Figura 46 - Representação em Curvas de Nível a cada 1 m



Fonte: Autor (2018)

Na figura 47 está a representação tridimensional texturizada do terreno mapeado, produto fotogramétrico que pode ter diversas aplicações tanto na arquitetura quanto no planejamento urbano, viário entre outras aplicações, este modelo possui resolução de 5,5 cm/p

Figura 47 - Representação Tridimensional Modelo Tiled



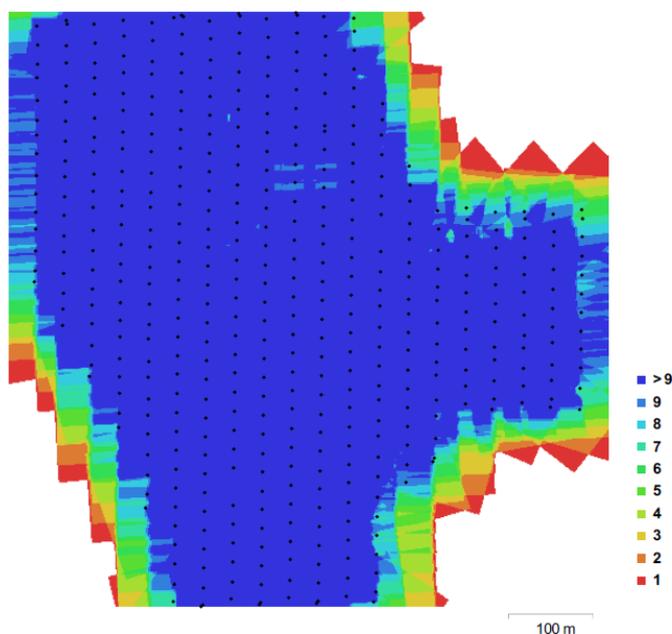
Fonte: Autor (2018)

4.2.2 Resultados obtidos à 80 m

De forma análoga ao levantamento executado a 120m, através das 453 imagens importadas para o software foi possível gerar um produto cartográfico final com resolução espacial igual a 3,94 cm/p a uma altura de voo média real de 92,3 m, uma diferença de 12,3 m da altura planejada. Através da análise do mapa de cores, podemos denotar que na área definida para o mapeamento ocorreu a sobreposição de pelo menos 9 imagens, valor que garante a superposição lateral e longitudinal definias em projeto.

A figura 48 trata-se da representação das áreas contempladas pela sobreposição de imagens em relação ao ponto de captura das mesmas.

Figura 48 - Sobreposição de capturas em relação ao ponto de obtenção à 80 m



Fonte: Autor (2018)

Estas informações são obtidas através do processo de alinhamento das capturas, que também gerou uma nuvem de pontos esparsa com 222345 pontos, projetados 1404186 vezes com erro de apontamento de 0,723p. Estas informações estão sucintamente resumidas na tabela 12.

Tabela 12 - Resultados obtidos à 80m

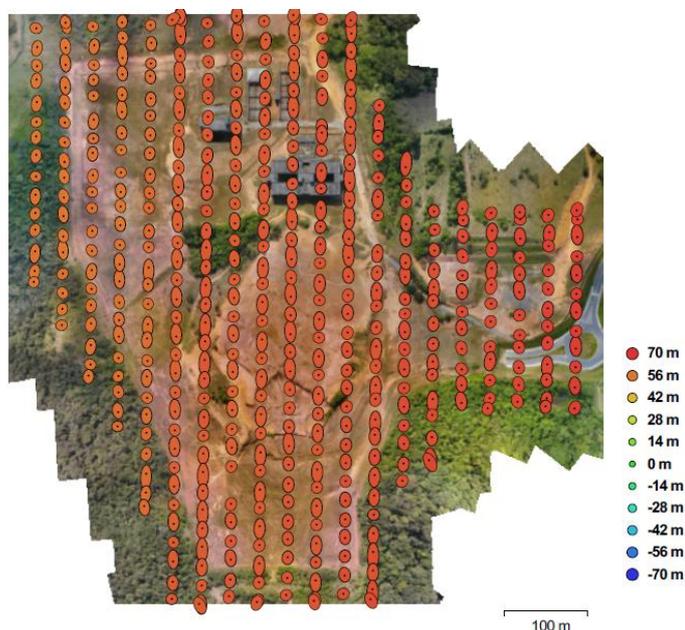
Imagens Alinhadas	453
Altura de voo estimada	91 m
GSD final	3,37 cm/p
Área de Cobertura	35e5m ²
Posições de câmera	453
Nuvem Esparsa	222.325
Projeções	1.404.186
Erro de projeção	0.723

Fonte: Autor (2018)

4.2.2.1 Posição Estimada de captura de imagens

Os valores equivalentes à discrepância, quando a localização das imagens é considerada como sendo as coordenadas atribuídas em cada imagem pelo GPS embarcado no VANT no momento de cada captura, figura 49.

Figura 49 - Representação do erro relacionado ao posicionamento de cada captura à 80 m



Fonte: Autor (2018)

Os valores observados para a discrepância na localização das imagens foram inferiores ao levantamento à 120 m, embora no eixo Z essa diferença ainda se manifeste numa magnitude muito superior aos outros eixos, tabela 13.

Tabela 13- Erro em relação a posição de captura de cada Imagem

E erro[m]	N erro[m]	E N Erro[m]	Z erro[m]	Erro Total [m]
0,410116	3,65274	3,67569	61,2787	61,3889

Fonte: Autor (2018)

4.2.2.2 Avaliação dos pontos de checagem

A avaliação do erro de apontamento dos pontos de apoio na imagem, para o mapeamento à 80 m foi de 0,126 valor que lhe confere incerteza no plano horizontal, inferior ao valor do GSD final atingido pelo mapeamento, tabela 14

Tabela 14 - Avaliação do erro médio quadrático dos pontos de apoio. Dados obtidos à 80m

PONTO	E Erro [cm]	N Erro [cm]	Z Erro [cm]	Erro Total	Projeções	Erro [p]
A1	0,147	0,768	6,726	6,7716	25	0,076
A2	0,169	-0,013	-8,645	8,6468	20	0,091
A3	-0,392	0,756	-1,502	1,7263	16	0,027
A4	0,132	0,178	-11,219	11,2213	19	0,072
A5	1,247	0,547	-7,750	7,869	23	0,095
A6	-0,061	0,343	7,708	7,7156	18	0,052
A7	0,338	0,105	-9,848	9,8541	16	0,430
A8	-1,344	0,541	-7,713	7,8483	12	0,041
A9	-0,860	0,312	-2,660	2,8132	16	0,069
A10	0,224	-0,786	-7,717	7,7605	21	0,050
A11	-0,188	0,267	-8,513	8,5193	11	0,036
A12	0,607	-0,611	-1,511	1,7391	12	0,024
A13	0,026	-0,527	-7,525	7,5434	18	0,051
A14	-0,172	-0,411	-6,064	6,0805	21	0,114
A15	-0,508	-0,296	-7,096	7,1207	18	0,081
Total	0,00765513		0,0734485	0,0738463		0,126

Fonte: Autor (2018)

Para este mapeamento o resultado obtido para o Erro Médio Quadrático relacionado a discrepância entre os valores apontados pelo georreferenciamento e a estimativa através da do modelo obtido com dados à 80 m, foi igual a 5,39 cm, que comparado como valor do GSD final é considerado um bom valor, uma vez que grande parte deste erro advém da componente relacionada ao eixo vertical 5,35 cm , quando considerado apenas o erro de projeção no plano

E-N o erro observado é de apenas 0,6 cm o que é considerado excelente, em relação a resolução espacial obtida equivalente ao GSD=3,94cm , tabela 15.

Tabela 15 - Avaliação do erro médio quadrático dos pontos de controle. Dados Obtidos a 80m

PONTO	E erro [cm]	N erro [cm]	Z erro [cm]	Erro Total	Projeções	Erro [p]
C16	-1,152	-0,232	2,580	2,835	23	0,086
C17	0,486	0,504	7,654	7,686	17	0,090
C18	0,729	0,493	6,118	6,181	22	0,105
C19	0,345	-0,013	2,024	2,053	16	0,209
C20	0,250	-0,123	7,093	7,099	20	0,164
C21	0,375	-0,040	3,015	3,039	16	0,161
C22	-0,048	0,169	3,540	3,544	19	0,226
C23	-0,872	0,414	7,048	7,114	12	0,149
C24	0,237	-0,362	2,011	2,057	16	0,22
C25	-0,404	0,145	5,573	5,590	17	0,153
C26	0,366	-0,379	-0,088	0,534	17	0,171
C27	0,293	-0,240	7,521	7,530	18	0,163
C28	0,097	-0,302	5,966	5,974	15	0,198
C29	0,268	-0,455	5,133	5,160	20	0,146
C30	-0,391	-0,555	6,957	6,990	21	0,086
Total	0,00609831		0,0535662	0,0539123		0,161

Fonte: Autor (2018)

4.2.2.3 Análise e qualidade PEC PCD

Através do cálculo da média, da variância e o desvio padrão dos resultados do erro médio quadrático, para cada eixo do levantamento, finalmente fazer foi possível a determinação do Erro Padrão Horizontal e o Erro Padrão Vertical e classificar o mapeamento como sendo CLASSE A, com $EP(E,N) = 0,43$ cm; $EP(Z) = 2,36$ cm podendo ser reproduzido em escala 1:1000 ,tabela 16.

Tabela 16 - Parâmetros estatísticos e o Erro Padrão para o mapeamento a 80 m

Parâmetro	E [cm]	N [cm]	Z [cm]
Média aritmética	0,038	-0,065	4,810
Variância	0,255358	0,110821	5,560117
Desvio Padrão	0,509399	0,316865	2,367368
Erro Padrão	0,431009696		2,35799

Fonte: Autor (2018)

Entretanto, devido a acurácia associada ao sistema de GPS aplicado, a classificação a adequada para o levantamento é a correspondente a CLASSE A, com $EP(E,N)= 1,00\text{ cm}$; $EP(Z) = 2,36\text{cm}$, respeitando a incerteza do georreferenciamento dos pontos de apoio.

4.2.2.4 Produtos Fotogramétricos

O mosaico de ortoimagens, produto fotogramétrico final, apresentou resolução igual $3,94\text{cm/p}$, apresentado na figura 50.

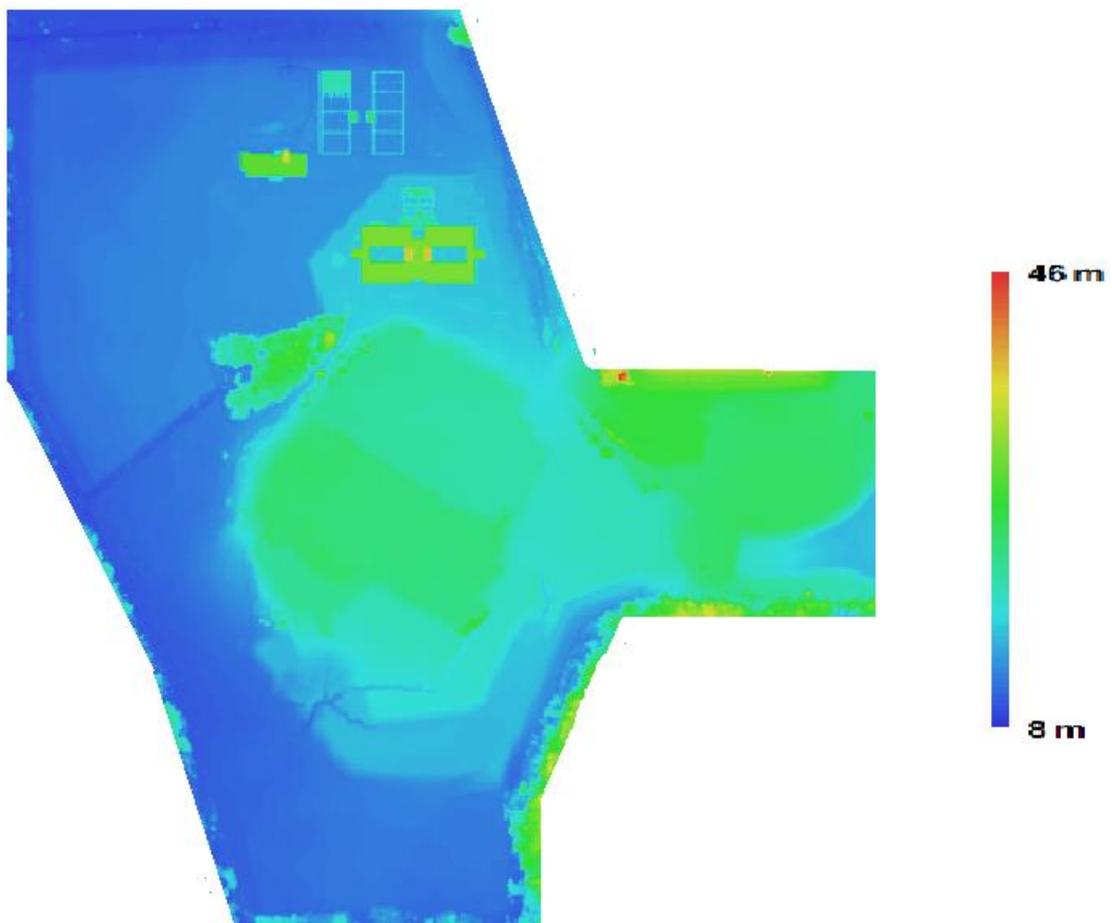
Figura 50- Mosaico de Ortoimagens obtidas a 80 m



Fonte: Autor (2018)

O MDE, figura 51, mais uma vez foi gerado através da nuvem densa de pontos, sem classificação, e sem filtragem, portanto descrevendo a superfície exposta as capturas das imagens, sendo reconstruídos 294,65 pontos/m² mapeados, a resolução do produto fotogramétrico foi igual a 6,74cm/p.

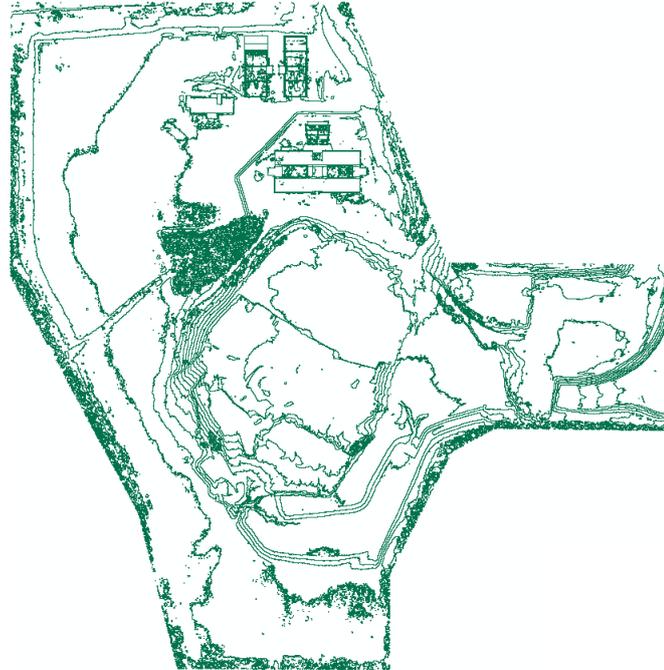
Figura 51 - Modelo Digital de Elevação Correspondente a superfície exposta a captura das imagens à 80 m



Fonte: Autor (2018)

Altimetria do terreno em curvas de nível, equivalência de 1 m entre os níveis, apresentada na Figura 52.

Figura 52 - Representação em Curvas de Nível a cada 1 m



Fonte: Autor (2018)

Na figura 53, está a representação tridimensional texturizada, com resolução final de 3,37cm/p, proporcionando excelente qualidade na reconstrução da superfície e na identificação de objetos.

Figura 53 - Representação Tridimensional Modelo Tiled



Fonte: Autor (2018)

4.2.3 Resultados obtidos à 40 m

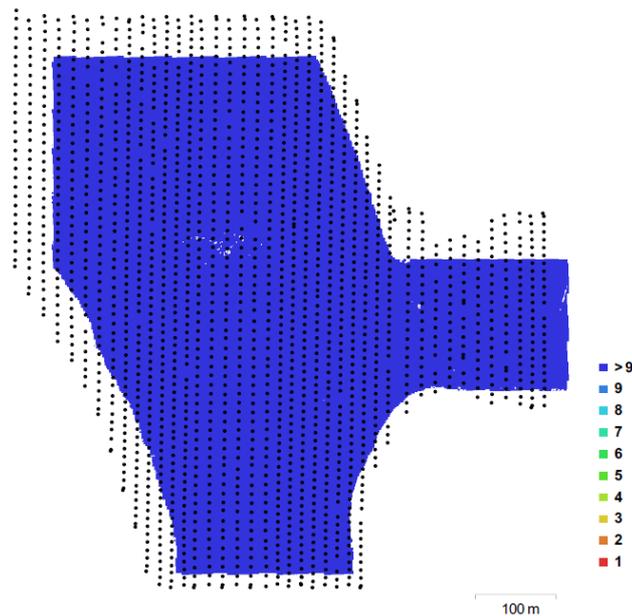
Devido a limitações na capacidade de processamento do hardware aplicado, uma abordagem diferente foi dada quanto ao processamento das imagens capturadas à 40 m. Dividindo a extensão do terreno em diferentes cenas, cada uma com um número menor de imagens, mas que da mesma forma contemplassem um número equivalente de pontos de apoio e controle, de forma a manter a homogeneidade do conjunto.

O total de 1936 imagens foi distribuído em três grupos contendo, respectivamente 276, 881, 779 imagens com 5 pontos de apoio e 5 pontos de controle em cada grupo. Isso se justifica devido ao consumo de memória RAM associada ao processo de densificação da nuvem de pontos em qualidade elevada, que para 1000 imagens é estimado em cerca de 16 gb, capacidade do hardware utilizado para esta pesquisa. Para o processamento das 1936 imagens em simultâneo, em qualidade elevada seriam necessários 32 gb de memória RAM instalados levando à interrupção do processo.

Entretanto, para avaliação dos resultados foi aplicado uma rotina para agrupamento das diferentes cenas, concentrando os dados obtidos nas diferentes etapas em somente um conjunto referente a cada uma delas. Na sequência estão apresentados os resultados que dizem respeito a este agrupamento, de forma similar às alturas de voo superiores.

A partir da avaliação da figura 54 é possível notar que aos critérios de sobreposição foram atingidos, tendo toda área coberta por pelo menos a captura de 9 imagens distintas. É possível denotar também, em comparação, com a área considerada no processamento em alturas superiores uma sensível redução na área de cobertura. Este critério foi definido, manualmente, de forma a se economizar recursos computacionais, sendo processadas de fato apenas as imagens referentes a área a ser representada

Figura 54 - Sobreposição de capturas em relação ao ponto de obtenção à 40 m



Fonte: Autor (2018)

O processo de alinhamento das imagens gerou a nuvem de pontos esparsa com 925104 pontos, com erro de projeção igual a 4,04p, tabela 17, valor considerado alto e fora dos padrões, para um mapeamento de alta precisão. A principal razão apontada para este fato é a falta de um ciclo de processamento que contemple todos os dados das cenas montadas simultaneamente, bem como uma maior densidade de pontos de apoio, georreferenciados em campo, uma vez, que como veremos na sequência, muitas imagens não registraram nenhuma marcação, sendo ajustadas com valores de suas vizinhanças.

Tabela 17 - Resultados obtidos à 40m

Imagens Alinhadas	1982
Altura de voo estimada	26,1 m
GSD final	1,87 cm/p
Área de Cobertura	23.5e+05 m ²
Posições de câmera	1936
Nuvem Esparsa	925104
Projeções	5765487
Erro de projeção	4,04p

Fonte: Autor (2018)

4.2.3.1 Avaliação dos pontos de checagem

Com o erro de projeção indicado como sendo 4,04 p, e com a impossibilidade de se realizar mais um ciclo de ajustes em razão das limitações operacionais relacionadas a memória RAM disponível, os resultados obtidos pelo mapeamento realizado a 40 m, nestas condições, ficam inaptos de serem classificados quanto ao padrão de exatidão cartográfica, embora os produtos fotogramétricos possam ainda ser gerados e analisados de forma qualitativa, em comparação aos dados gerados pelos mapeamento nas demais alturas.

4.2.3.2 Produtos Fotogramétricos

Mosaico de ortoimagens figura 55, com resolução espacial = 1,94 cm/p, neste caso, ajustado de forma aproximada em coordenadas UTM, Zona 22 S no Datum SIRGAS 2000.

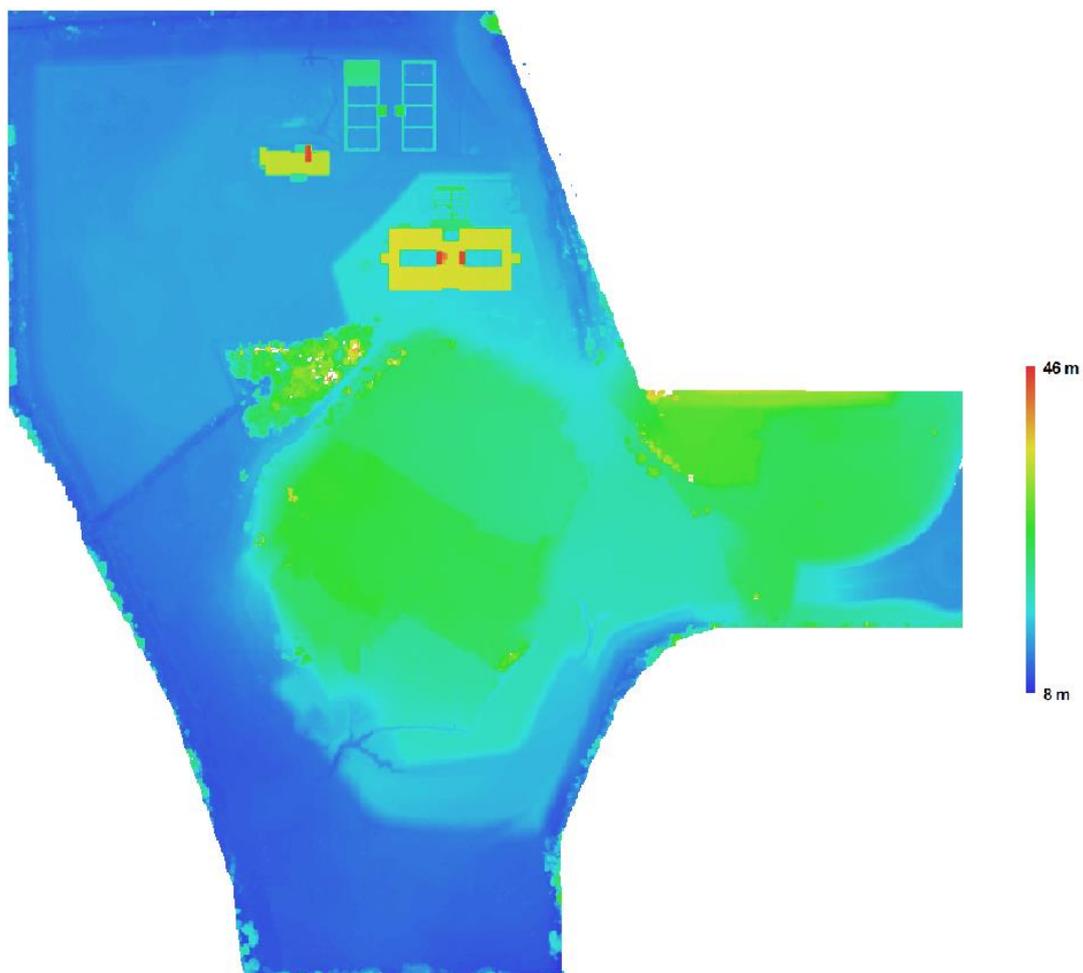
Figura 55 – Mosaico de Ortoimagens obtidas à 40m



Fonte: Autor (2018)

O MDE, figura 56, foi gerado através da nuvem densa de pontos, resultante do agrupamento das 3 cenas desmembradas inicialmente, e descreve a superfície exposta as capturas das imagens, a resolução obtida para o produto fotogramétrico foi de 8,43 cm/p, valor inferior ao resultado obtido para o mapeamento à 80 m, isto se explica mais uma vez pelo número insuficiente de pontos de apoio em relação ao número de imagens obtidas e pela impossibilidade de se realizar o reproprocessamento dos dados de maneira simultânea, devido ao gargalo na memória RAM.

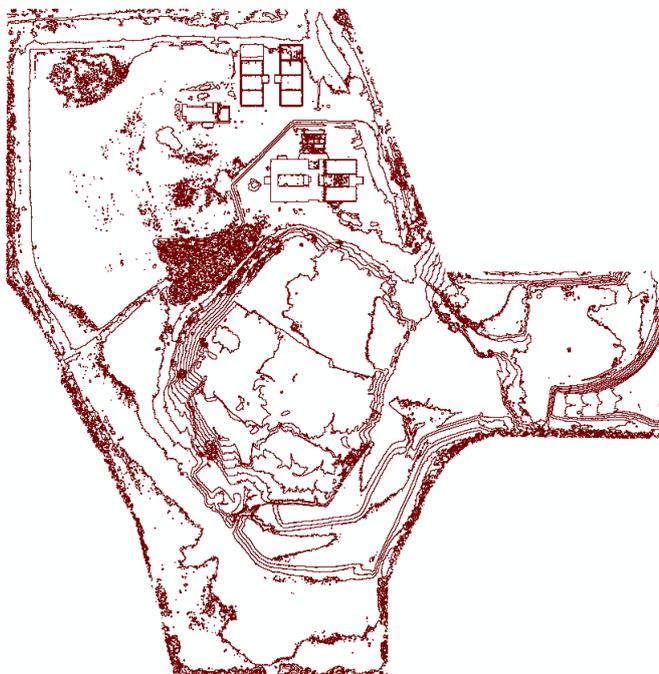
Figura 56 - Modelo Digital de Elevação Correspondente a superfície exposta a captura das imagens à 40 m



Fonte: Autor (2018)

Altimetria do terreno em curvas de nível, equivalência de 1 m entre os níveis, figura 57.

Figura 57 - Representação em Curvas de Nível a cada 1 m



Fonte: Autor (2018)

4.2.4 Análise comparativa e resumo dos parâmetros de processamento utilizados

Utilizando o mosaico de ortoimagens, e o MDE como principais produtos fotogramétricos gerados, e avaliando a qualidade dos levantamentos quanto ao PEC-PCD, indicado em 2.4.1, foram obtidos excelentes resultados para os levantamentos executados à 120m e a 80 m ambos correspondendo a CLASSE A de representação que determina que o erro padrão calculado para cada levantamento deve ser inferior a 17cm no plano horizontal (E,N) e inferior a 33cm no eixo vertical (Z). Entretanto, como esperado nos resultados obtidos a 80 m, foi possível notar um melhor desempenho devido a maior proximidade o eixo óptico com o solo, proporcionando uma melhor resolução espacial para o levantamento, embora seu processamento tenha sido mais oneroso do ponto de vista computacional, consumindo maior quantidade de recursos. Conclui-se que para área mapeada, para os pontos de apoio e controle aplicados, e com a aplicação dos recursos computacionais disponíveis, o mapeamento à o 80 m se mostrou mais adequado frente às outras alturas de voo praticadas, não só por apresentar maior resolução espacial em relação ao mapeamento realizado a 120 m, mas por questões de

planejamento, segurança, agilidade para realização do levantamento em campo, equilíbrio entre requisitos computacionais e os recursos disponíveis, tabela 18.

Tabela 18 – Comparativo do padrão de exatidão obtido para as diferentes alturas de voo e as resoluções espaciais correspondentes

120m	CLASSE A	EP(E,N)= 1,96 cm	EP (Z) =3,35cm	5,04	10,1
80m	CLASSE A	EP(E,N)= 1,00 cm (0,43)	EP (Z) =2,36cm	3,94	6,74
40m	N/C	N/C	N/C	1,87	8,43

N/C: não classificado

Fonte: Autor (2018)

A análise dos produtos gerados pelos levantamentos a 40 m não foi contemplada pela classificação através do PEC-PCD, ficando restrita apenas às resoluções dos produtos fotogramétricos geradas e aspectos qualitativos quanto a observação dos alvos e a foto identificação de objetos de interesse. Para melhores ajustes dos resultados obtidos para esta altura de voo, é necessário a aplicação de mais um ciclo de processamento contemplando a nuvem densa de pontos agrupada das diferentes cenas consideradas, para tanto uma estação de trabalho com pelo menos as seguintes configurações deve ser utilizada para tratamento dos dados: processador Intel Core i7 CPU, memória RAM DDR3-1600, 8 x 4 GB (32 GB no total), placa de vídeo Nvidia GeForce GTX 980 Ti. Entretanto, não é esperado que os resultados obtidos possam ter qualidade superior ao levantamento realizado à 80 m isso devido a um número insuficiente de pontos de apoio aplicados em campo, em relação ao levantamento realizado a 40 m. Com os pontos de apoio e controle aplicados na pesquisa, o espaçamento entre as bases ficou extenso demais, levando a muitas capturas não registrarem nenhum ponto de coordenada conhecida e aferida pelo sistema de baixa incerteza, sendo ajustadas apenas pelos valores de suas vizinhanças, prejudicando a qualidade do produto final. Analisando os levantamentos quanto a foto-identificação dos alvos fotogramétricos, ajustando o nível de zoom das capturas para a resolução ideal do levantamento sem distorções, podemos obter o comparativo da figura 58, ficando evidente a maior facilidade de identificação dos alvos em alturas de voo inferiores.

Figura 58 Comparativo da resolução espacial à diferentes alturas para o nível de zoom ideal -



Fonte: Autor (2018)

Em destaque, para o levantamento realizado a 40 m, em que no mosaico de ortofotos é possível fazer a identificação de todos os elementos presentes no alvo fotogramétrico, inclusive o numeral identificador, figura 59

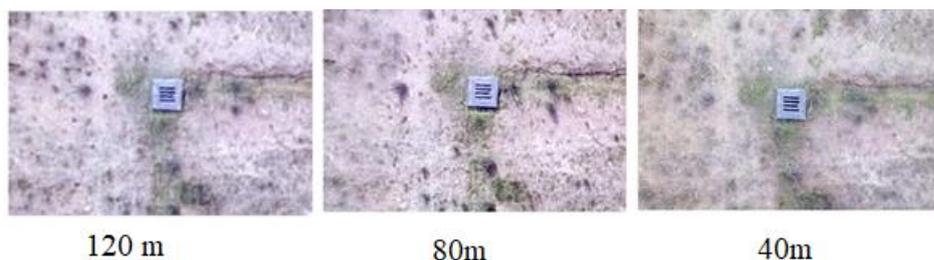
Figura 59 – Alvo fotogramétrico identificado à uma altura de 40 m



Fonte: Autor (2018)

Finalmente, em diferentes níveis de observação um comparativo da resolução espacial obtida com os diferentes levantamentos fotogramétricos pode ser observado na figura 60, sendo comparada a observação de um alvo comum para um mesmo nível de zoom para as diferentes observações.

Figura 60 - Comparativo da resolução espacial à diferentes alturas correspondentes ao mesmo nível de zoom



Fonte: Autor (2018)

Na tabela 19 estão apresentados de forma comparativa todos os parâmetros considerados para o processamento das imagens, bem como o quantitativo dos principais resultados apontados em cada processo.

Tabela 19 – Comparativo entre os parâmetros de processamento para diferentes alturas

Geral	120 m	80 m	40 m
Imagens importadas	204	453	1982
Imagens alinhadas	204	453	1936
Marcadores	30	30	30
Sistema de Coordenadas	SIRGAS2000 / UTM	SIRGAS2000 / UTM	SIRGAS2000 / UTM
Nuvem de Pontos Esparsa	100208 pontos	222345 pontos	925104 pontos
Erro Médio de Reprojção	0,310614 (0,708643 p)	0,317143 (0,733676 p)	0,694852 (4,03603 p)
(Distorções máximas)	2,87926 (32,5367 p)	2,48199 (22,3091p)	26,8663 (118,922 p)
Tamanho Médio dos Pontos Chave	2,25276 p	2,25297 p	7,09804 p
Sobreposição efetiva	5,90601	5,98647	7,11041
Alinhamento			
Precisão	Ultraelevada	Ultraelevada	Elevada
Pré-seleção de pares	Referência	Referência	Referência
Limite de pontos chave	40000	40000	40000
Limite de pontos de amarração	4000	4000	4000
Reconstrução			
Nuvem de pontos densa	59876652 Pontos	103567123 Pontos	211830218
Qualidade	Elevada	Elevada	Elevada
Filtro de profundidade	Moderado	Moderado	Moderado
Modelo			
Faces	8612145	15142861	X
Vértices	4322240	7595143	X
Textura	4096 x4096,8 bits	4096x 4096, 8 bit	X
Tipo de superfície	Mapa de alturas	Mapa de Alturas	X
Fonte	Nuvem densa	Nuvem densa	X
Interpolação	Desativada	Desativada	X
Qualidade	Elevada	Elevada	X
Filtro de profundidade	Moderado	Moderado	X
Número de faces final	8753808	15346994	X
Texturização			
Modo de mapeamento	Ortofoto	Ortofoto	X
Modo de combinação	Médio	Médio	X
Tamanho da textura	4,096 x4,096	4,096 x4,096	X

Fonte: Autor (2018)

5 CONCLUSÃO

A metodologia aplicada, evidencia o processo de racionalização e automatização da aquisição dos dados em campo por meio de VANTS pilotados de forma remota além da quantificação objetiva dos resultados, através da elaboração de mapas e modelos digitais detalhados de superfícies extensas.

Através dos resultados obtidos pelos mapeamentos realizados a 120 e a 80 m e a aplicação de 15 pontos de apoio e 15 pontos de controle foi possível, estabelecer através da utilização de técnicas de fotogramétrica digital bases cartográficas para uma área correspondente à 230.000 m² classificadas como sendo CLASSE A do Padrão de Exatidão Cartográfico Brasileiro, produzindo precisão centimétrica nos três eixos do levantamento, desta forma comprovando, assim como Silva Neto (2015), a adequabilidade do uso do VANT DJI Phantom 4 para a aquisição de dados à serem aplicados em processos fotogramétricos, bem como a qualidade dos mapas produzidos, em relação aos métodos de aquisição de dados convencionais.

Também é notável, em razão dos dados obtidos em voos a 40 m, que levantamentos aerofotogramétricos nessa escala cobrindo áreas de mesma extensão, requer projeto específico, desmembrando a área em menores setores, com os devidos pontos de amarração de modo a tornar os procedimentos de processamento de imagens menos onerosos, bem como, é necessário a implantação de um conjunto de pontos de apoio mais denso, devido ao refinamento da malha.

Deste modo, é possível considerar a fotogrametria com VANTS como sendo uma alternativa mais rápida e menos onerosa para levantamentos topográficos de áreas extensas e com dificuldades de acesso, a depender dos critérios de tolerância desejados em projeto, e os refinamentos necessários entorno destes dados.

5.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Determinação e fixação de parâmetros de dimensionamento para projetos fotogramétricos efetuados com DJI Phantom 4 e para o estudo de viabilidade para utilização de levantamentos fotogramétricos com DJI Phantom 4 na realização de inspeção de defeitos em pavimentos rodoviários.

A fixação de parâmetros a serem observados contribuiria para reforçar a qualidade de futuros levantamentos realizados a partir deste mesmo equipamento, padronizando valores acerca do número mínimo de pontos de controle e apoio a serem aplicados na amarração dos blocos, bem como seu espaçamento e dimensão recomendada em relação à captura das imagens. Informações que tornariam o projeto de levantamento fotogramétrico, atividade mais simples e ágil.

Em outro sentido, em observação a qualidade gráfica obtida com os produtos fotogramétricos gerados a partir de imagens capturadas na altura de 40 m, indica-se o estudo mais aprofundado de experiências de levantamentos fotogramétricos realizados em menores alturas para se avaliar a viabilidade da utilização destas técnicas para identificação e classificação de defeitos em superfícies de pavimentos rodoviários em obras de inspeção.

REFERÊNCIAS

- BURCH, R. **A short history of photogrammetry**. Estados Unidos: The Institute for Digital Mapping, Ferris State University, 1997
- COELHO, L.; BRITO, J. **Fotogrametria digital**. 2. ed. Rio de Janeiro: EDUERJ, 2007. 196 p.
- COMNINOS, Peter. **Mathematical and computer programming techniques for computer graphics**. Fern Barrow: Springer, 2006. 556 p.
- LISBOA FILHO, Jugurta. **Projeto de banco de dados para sistemas de informação geográfica**. In: ESCOLA DE INFORMÁTICA DA SBC - SUL, 8., 2000, Ijuí. Artigo. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000. p. 1 - 38.
- SHIMABUKURO, Yosio Edemir; PONZONI, Flávio Jorge. **Mistura Espectral: modelo linear e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 127 p.
- FERNANDES, Roberto Cid; KANAAN, Antônio; GOMES, Jean Michel. **As ferramentas do Astrônomo: O que medimos, como medimos e o que aprendemos**. Florianópolis: Ufsc, 2009.
- SOUZA, Celso Coelho de et al; **no Brasil: Uma revisão bibliográfica**. In: CIÊNCIA FLORESTAL SANTA MARIA, 17., 2007, Santa Maria. Artigo. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2007. p. 409 - 417.
- SILVA NETO, Manoel (Ed.). **Planejamento de Voo e GSD**. 2015. Disponível em: <<http://blog.droneng.com.br/planejamento-de-voo/>>. Acesso em: 12 out. 2017.
- MARTIN, Laurent. **PEC, como aplicar**. 2016. Disponível em: <<http://www.engesat.com.br/pec-o-que-e-e-como-aplicar-2/>>. Acesso em: 4 out. 2017.
- BERNARDI, Alberto Carlos de Campos et al. **Agricultura de precisão: Resultados de um novo olhar**. Brasília: Embrapa, 2014. 596 p.
- SILVA, Daniel Carneiro da; COSTA, Glauber Carvalho. **Aerofotogrametria em projetos de estradas**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 3, 2010, Recife. **Artigo**. Recife: Alb, 2010. p. 1 - 13.
- CMOS Animation Sequence. Direção de Raymond Siri. Nova York: Siri, 2015. (1 min.), Digital, color. Animation to show how CMOS image sensor works.. Disponível em: <<https://vimeo.com/103279734>>. Acesso em: 10 mar. 2018.
- CCD Animation Sequence. Direção de Raymond Siri. Nova York: Siri, 2015. (1 min.), Digital, color. (Full HD 15-25Mbps). Disponível em: <<https://vimeo.com/103279734>>. Acesso em: 10 mar. 2018.
- RAMOS, José Augusto Sapienza; PRATES, Izabela. **PEC: 30 anos do Padrão de Exatidão Cartográfica no Brasil**. 2014. Disponível em: <<http://mundogeo.com/blog/2014/08/10/30-anos-do-padrao-de-exatidao-cartografica-no-brasil/>>. Acesso em: 10 maio 2018.

AGISOFT PHOTOSCAN. Assistência técnica/instruções de uso. Agisoft PhotoScan **User Manual: Professional Edition, Version 1.2**. 1.ed. São. Petersburgo,, 2016. 103p.

BRASIL. **Decreto nº 80.817, de 20 de junho de 1984**. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Diário Oficial, Brasília, DF, 20 jun. 1984. Seção 1, p. 1. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/d89817/>. Acesso em: 15 novembro 2017.